

Ports de commerce et de pêche

Aménagement et équipements intérieurs

par **Pierre BONAFOUS**

Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées

Ancien Chef du Service des Études techniques du Port Autonome du Havre

Xavier LE BARS

Ingénieur des Travaux Publics de l'État

Chef du Service des Études techniques du Port Autonome du Havre

et **Francis LEGRAS**

Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Chef du Service technique de l'Outillage du Port Autonome du Havre

1. Aménagement général intérieur	C 4 640 - 2
1.1 Fonction des ports. Différents types de ports	— 2
1.2 Plan masse général	— 4
1.3 Conception et dimensionnement des plans d'eau	— 5
1.4 Conception et dimensionnement des terminaux.....	— 7
1.5 Aménagements divers intérieurs	— 12
1.6 Dessertes et liaisons intérieures terrestres	— 12
2. Infrastructures des terminaux.....	— 13
2.1 Classement fonctionnel.....	— 13
2.2 Caractéristiques communes aux ouvrages	— 13
2.3 Classification des ouvrages selon leur structure	— 17
2.4 Entretien et réparations. Transformations des ouvrages.....	— 24
3. Outillage	— 25
3.1 Considérations générales	— 25
3.2 Trafic des passagers	— 25
3.3 Trafic des marchandises diverses	— 26
3.4 Postes pour marchandises pondéreuses en vrac	— 33
3.5 Manutention des liquides en vrac	— 36
4. Autres équipements intérieurs des ports	— 36
4.1 Accueil et guidage des navires.....	— 36
4.2 Écluses maritimes.....	— 37
4.3 Formes de radoub et docks flottants	— 39
4.4 Divers.....	— 43
Pour en savoir plus.....	Doc. C 4 640

Les mutations technologiques en matière de manutention portuaire ont comme dans beaucoup de secteurs profondément bouleversé le paysage des ports au cours de ces trente dernières années. Il y a peu, en effet, ceux-ci ressemblaient encore à de véritables fourmilières où le recours à la force humaine était la règle et créait cette atmosphère si particulière dont les films de l'époque restent le seul témoignage.

Aujourd'hui, les ports semblent déserts, comme abandonnés.

À y regarder de plus près pourtant, ceux-ci, s'ils ont perdu en pittoresque, ont gagné en efficacité, se transformant en des ensembles industriels où les notions de productivité et de compétitivité sont devenues la règle.

Les anciens quais imbriqués dans les cités, devenus obsolètes, ont perdu leurs vocations premières et les magasins qui les bordaient, reconvertis en ensembles immobiliers ou de service, ont obtenu un certain succès auprès des citadins (docks de Londres, Amsterdam, Gênes, Montréal, etc.).

De nouveaux terminaux spécialisés ont vu le jour, dédiés à un seul type de trafic, parfois même intégrés à un processus industriel (postes à vrac pour les centrales thermiques, la sidérurgie les pieds dans l'eau comme à Dunkerque ou à Fos en France).

Parallèlement, le nombre de « terminaux d'usine » qui ne se limitaient à l'époque qu'à des installations de transbordement de liquide se sont diversifiés.

Le présent document se propose de passer en revue et de décrire les différents ouvrages et aménagements qui font les ports d'aujourd'hui.

1. Aménagement général intérieur

Dans l'article *Principes d'implantation et d'aménagement des ports* [C 4 630] ont été examinées les conditions qui conduisent au choix de la localisation d'un port et au dimensionnement de ses ouvrages extérieurs. Le présent article aborde les considérations relatives à l'aménagement intérieur du périmètre ainsi défini.

1.1 Fonction des ports. Différents types de ports

1.1.1 Fonction des ports

Le port peut se définir comme l'ensemble des équipements devant répondre aux besoins des opérations réalisées à l'interface terre-navire. Ces équipements concernent soit les fonctions relatives aux navires, soit celles relatives aux opérations à terre.

Le navire attend d'un port des services pour son abri, son accostage, son avitaillement et ses réparations.

Liées aux navires, les opérations portuaires à terre concernent essentiellement le traitement des marchandises et des personnes transportées par voie maritime et transitant par les installations portuaires où elles sont soit chargées, soit déchargées.

1.1.2 Différents types de ports

Un port est à l'origine conçu pour remplir une mission bien définie et donc une activité bien spécifique. Cependant, profitant des équipements mis en place, d'autres activités viennent généralement se greffer sur l'activité d'origine. Par ailleurs, la localisation d'un port en fonction des besoins à remplir (position stratégique militaire, proximité des lieux de production et de consommation...) doit en général être optimisée en fonction des impératifs nautiques (tirants d'eau des navires par exemple) et des caractéristiques des sites en présence (courants, houles, sédimentation...).

La classification des ports ne peut, dans ces conditions, être faite d'une façon unique. On peut l'aborder en distinguant les ports, soit par leurs fonctions principales, soit par leur implantation.

1.1.2.1 Classification par fonctions principales

■ Ports militaires

Le port militaire requiert des espaces abrités importants où les navires peuvent stationner disséminés dans un but de protection.

L'espace abrité peut être naturel comme à Brest avec sa rade ou artificiel comme à Cherbourg où de très importantes digues de protection ont été réalisées. Des installations lourdes de protection peuvent être nécessaires : bases sous-marines par exemple. Les équipements d'un port militaire comprennent généralement aussi des installations pour l'armement et l'entretien des navires (quai d'armement, forme de radoub).

Le port militaire est localisé dans un endroit stratégique (exemple de Cherbourg au centre de la Manche). Afin d'assurer la fiabilité et la rapidité des interventions, le port est généralement situé sur la côte avec accès direct à la mer sans contraintes de marées ni d'ouvrages d'accès (écluses maritimes).

■ Ports de commerce

Ils permettent de traiter les trafics de marchandises et de passagers. Ils sont le point de rupture dans la chaîne de transport : soit entre le mode terrestre et le mode maritime, soit entre deux modes maritimes. Le coût de transport terrestre étant nettement supérieur au coût de transport maritime, ils doivent être localisés le plus près possible de l'origine ou de la destination des trafics, sous réserve de présenter des accès nautiques satisfaisants.

La nécessité économique de réduire les coûts de transport terrestre peut même imposer, dans certains cas, de localiser l'origine ou la destination des trafics en site portuaire (raffinerie de pétrole, centrales thermiques, sidérurgies...).

Les installations des ports de commerce, autrefois très polyvalentes, sont de plus en plus spécialisées en terminaux (rouliers, conteneurs, passagers, hydrocarbures...).

■ Ports de pêche

Outre la fonction accueil des navires, ces ports sont équipés de façon conséquente pour débarquer, traiter et commercialiser les produits de la pêche. De récentes normes sanitaires, édictées au niveau européen, imposent à ces ports de s'équiper d'installations particulièrement étudiées.

■ Ports de plaisance

Se reporter à l'article spécialisé du présent traité.

1.1.2.2 Classification par implantation

Les contraintes physiques des sites qui se présentent pour l'implantation d'un port et les nécessités économiques qui justifient sa création conduisent à des types d'implantations très variées. Il s'agit bien souvent de compromis technico-économiques entre les impératifs en présence.

Suivant le critère de l'implantation, on peut retenir la classification suivante.

Ports au large

L'accroissement des tirants d'eau des navires peut nécessiter des travaux d'aménagement d'infrastructures (chenaux, ports) et d'entretien très onéreux. Une alternative est offerte avec des installations aménagées au large, là où les profondeurs naturelles existent.

Il peut s'agir d'îles artificielles ou simplement de bouées d'amarrage (figure 1).

Ces installations peuvent servir à des transferts de navire à navire ou être reliées à la terre par des oléoducs sous-marins (trafic d'hydrocarbures) ou des bandes transporteuses.

Ports à la côte

Ils peuvent être établis dans des sites naturellement abrités (golfe de Fos) ou protégés artificiellement (terminal pétrolier du Havre-Antifer, figure 2).

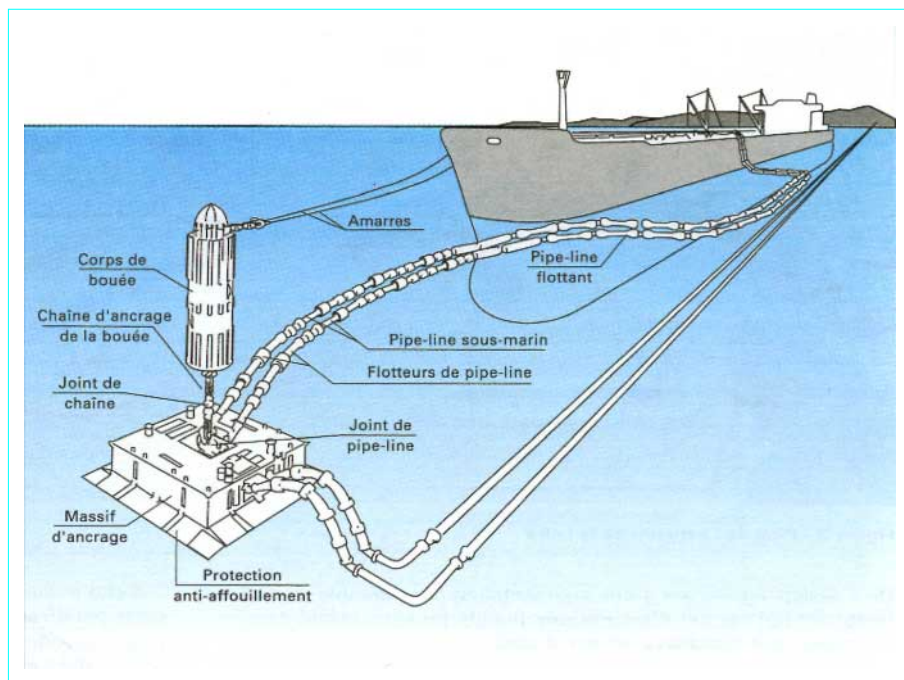


Figure 1 – Type de bouée d'amarrage au large

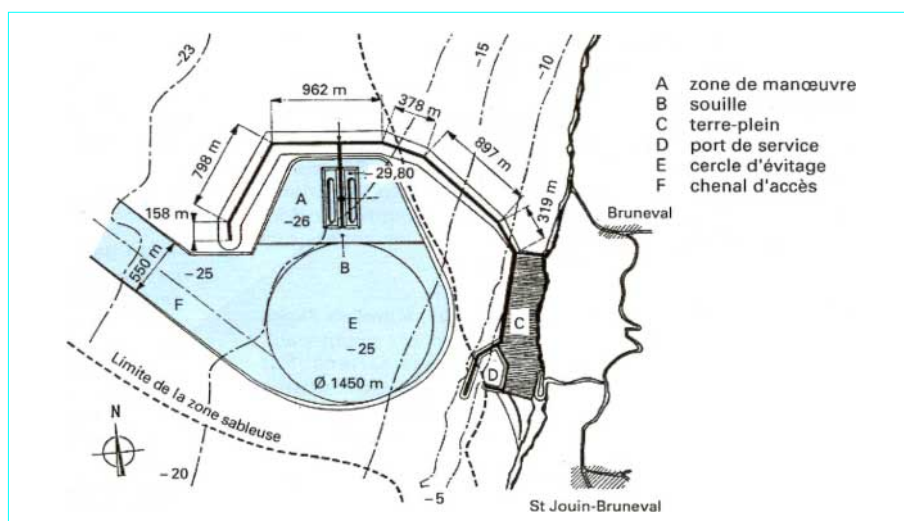


Figure 2 – Plan masse du port du Havre-Antifer

Les terre-pleins et plans d'eau portuaires peuvent être aménagés soit par remblaiement sur la mer, soit par creusement à l'intérieur des terres.

■ Ports intérieurs

Ils sont établis, souvent de longue date, le long de cours d'eau ou de canaux maritimes [Nantes (figure 3), Anvers, New York].

Leurs débouchés à la mer peuvent être soit naturels (Québec), soit aménagés (Rouen). Le débouché à la mer peut être équipé par des écluses (Anvers).

Un certain nombre de ces ports s'étendent progressivement vers l'extérieur pour recevoir des navires plus importants (extension de Bordeaux vers le Verdon et de Rotterdam vers le Maasvlakte).

1.2 Plan masse général

Le port est le lieu de contact entre les modes d'acheminement terrestre et maritime des personnes et des biens. Il doit permettre un passage le plus rapide possible entre ces deux modes.

Dans ce passage sont concernés : le navire, les marchandises et les terminaux situés à l'interface.

Pour chacun de ces éléments, qui seront analysés plus en détail dans les paragraphes suivants, le concepteur du plan masse d'un port doit intégrer de nombreux paramètres indépendants les uns des autres dans une chaîne de transports dont le port est l'un des maillons.

L'augmentation considérable, ces dernières décennies, des échanges internationaux, effectués pour une bonne part par voie maritime, a ainsi conduit les modes de transport à évoluer souvent vers des techniques industrielles.

1.2.1 Tendances par catégories d'activités

■ Marchandises diverses

Autrefois conditionnées par petites unités de charge très diverses, elles sont maintenant de plus en plus traitées par l'intermédiaire de conteneurs normalisés sur le plan international. On a assisté égale-

ment à une augmentation considérable du trafic roulier qui permet d'assurer une fluidité presque idéale dans le passage des marchandises par le port.

Cette évolution a imposé de doter les ports d'infrastructures de desserte intérieure plus largement dimensionnées, évitant pour des raisons de nuisance les agglomérations. Les navires ont eu tendance à se spécialiser et à connaître un accroissement de taille pour répondre aux besoins de ces nouveaux modes de transport. À l'interface ports/navires sont apparues ainsi des installations spécialisées : les terminaux à conteneurs plus largement dimensionnés et dotés d'engins de manutention spécifiques (les portiques), les terminaux rouliers, etc.

■ Marchandises en vrac

Poussés aussi par l'augmentation du trafic international, les transports de marchandises en vrac (pétrole, charbon, minerais, céréales...) ont évolué non pas à partir de la marchandise mais à partir du navire, ceux-ci étant devenus de plus en plus importants en taille. Les infrastructures portuaires ont dû s'adapter (profondeurs admissibles, largeur des quais) ainsi que les superstructures (outillages de manutention plus puissants).

■ Passagers

Les transports intercontinentaux de passagers, autrefois exclusivement effectués par voies maritimes, ont recouru maintenant, dans l'immense majorité des cas, aux moyens aériens. Par ailleurs, le développement de l'automobile et celui du tourisme ont conduit à l'apparition de techniques de transport par navires rouliers (car-ferries) auxquelles les ports ont dû s'adapter. Dans ce même temps, les grandes gares maritimes à paquebots (Le Havre, Cherbourg) étaient petit à petit désaffectées. Depuis peu, toutefois, on assiste en Europe à un renouveau des escales de paquebots liées au développement des croisières touristiques.

1.2.2 Évolutions du plan masse

Le port a très souvent été conçu, cela fait plusieurs décennies, voire plusieurs siècles, pour des types d'activités qui ont aujourd'hui disparu. Compte tenu de l'évolution des besoins à satisfaire par le port, le plan masse de ce dernier a dû s'adapter.

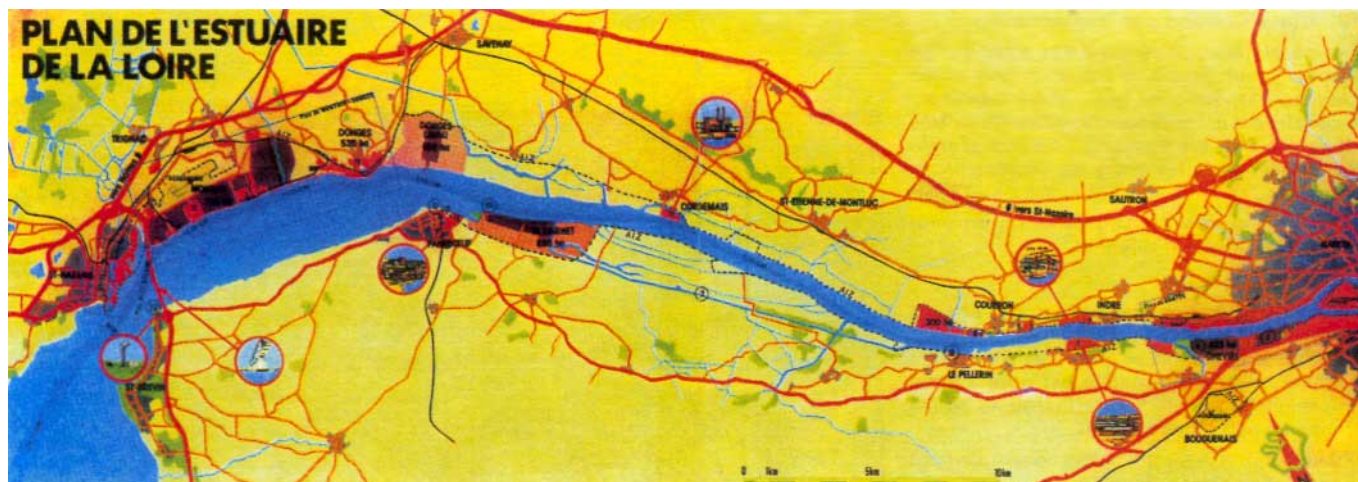


Figure 3 – Plan de l'estuaire de la Loire

L'adaptation s'est faite, au départ, dans le cadre physique des infrastructures d'origine qui ont été réorganisées. Cela est le cas, par exemple, pour les bassins de la Manche et de la Citadelle au port du Havre (figure 4) qui ont été réaménagés pour recevoir des trafics rouliers. Dans de nombreux ports, des bassins anciens ont été affectés aux besoins des navires de plaisance.

Cette évolution a cependant très vite connu ses limites et les ports ont dû se déplacer en dehors de leurs frontières ancestrales pour répondre aux nouveaux besoins (figure 5). Des sites portuaires délocalisés se sont développés sur le littoral, comme évoqué ci-avant (§ 1.1.2.2).

1.3 Conception et dimensionnement des plans d'eau

Les plans d'eau intérieurs d'un port sont réalisés essentiellement pour les besoins des navires. Il importe donc de bien analyser les caractéristiques de ces derniers avant de dimensionner les plans d'eau.

1.3.1 Caractéristiques des navires

Un port peut être appelé à recevoir plusieurs catégories de navires (pétroliers, porte-conteneurs, rouliers, etc.) avec leurs caractéristiques propres. Les ouvrages généraux d'accès doivent prendre en compte les navires les plus contraignants. Par contre, pour les terminaux spécialisés, ce sont les caractéristiques propres à la catégorie de navires concernés qui sont à retenir. Cela se fait à partir d'une analyse des flottes de navires en service au moment de l'élaboration du projet. Mais il est essentiel également de mener une étude des tendances afin de définir les caractéristiques des navires qui seront en service dans l'avenir, les installations portuaires, très onéreuses, étant aménagées pour plusieurs décennies.

Dans ces conditions, il y a lieu de définir au début de cette réflexion le navire de projet. Cela se fait généralement en retenant les caractéristiques suivantes :

tirant d'eau en charge – longueur hors tout – largeur hors tout

À titre indicatif le tableau 1 donne des caractéristiques maximales pour les navires modernes actuellement en service.

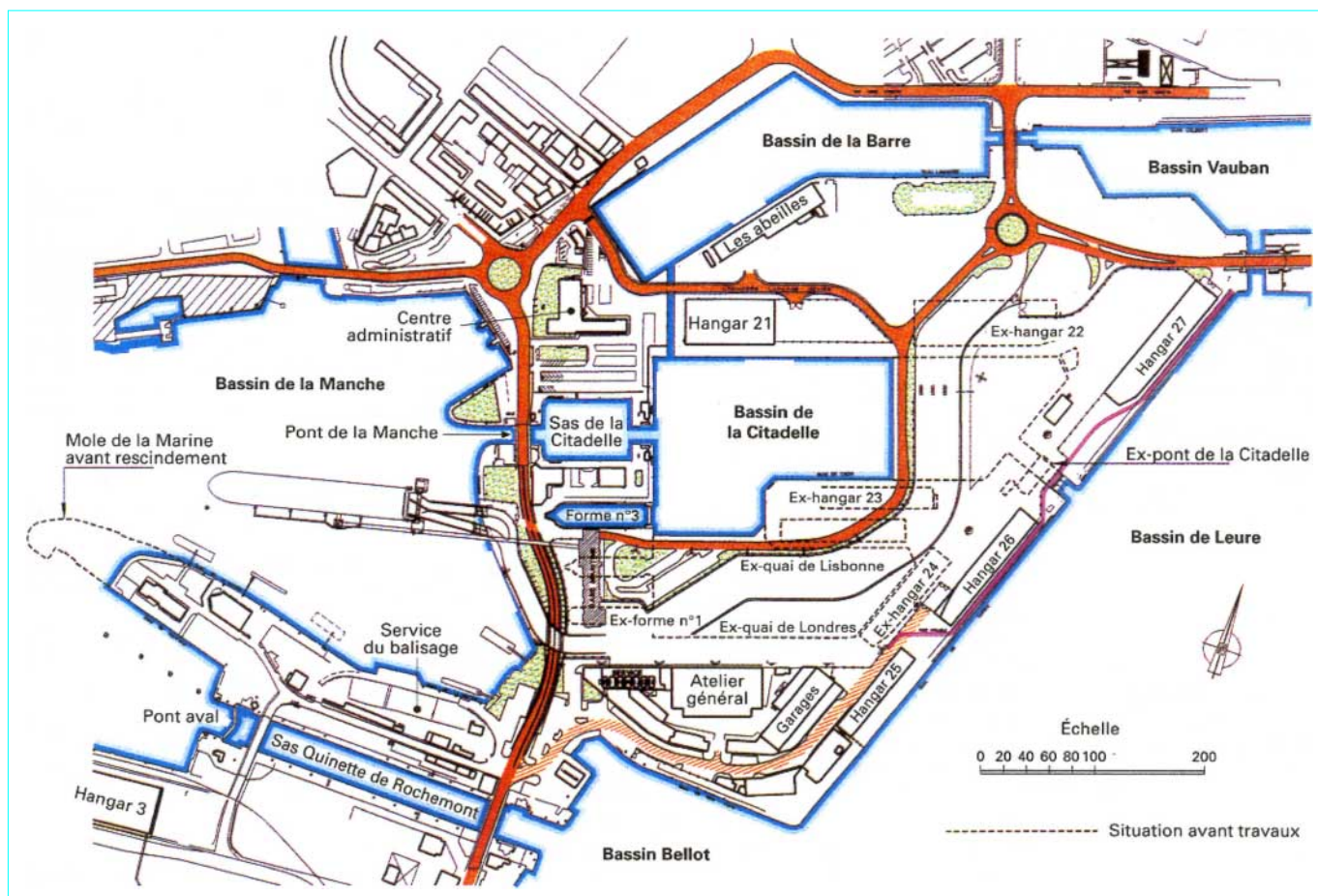


Figure 4 – Aménagement du secteur Manche-Citadelle au Havre

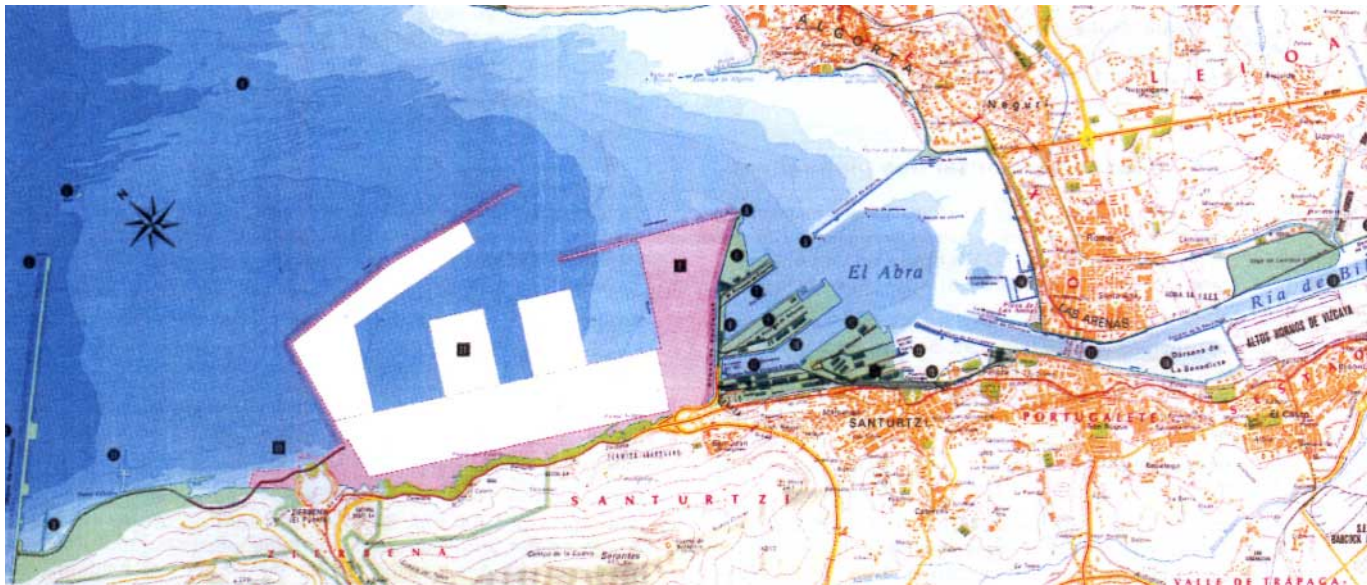


Figure 5 – Projet d’extension à la côte du port de Bilbao

Tableau 1 – Caractéristiques maximales des navires actuels			
Type de navire	Tirant d'eau (m)	Longueur (m)	Largeur (m)
Cargo traditionnel de 15 000 à 20 000 tpl	9,5 à 10	140	22 à 25
Porte-conteneurs de la 4 ^e génération (Panamax 4 250 EVP)	11 à 13	290	32,2
Porte-conteneurs Over Panamax 5 000 EVP	13 à 14	≥ 290	39,5
Minéralier de 225 000 tpl	20,5	315	50
Minéralier de 360 000 tpl	23,2	340	63,5
Pétrolier 300 000 tpl	23	350	55
Pétrolier de 550 000 tpl	28,5	415	63
La capacité de transport d'un navire (c'est-à-dire le tonnage qu'il peut transporter) s'exprime en tonnes de port en lourd (tpl), en anglais (tdw) ton dead-weight			
EVP équivalent vingt pieds (en longueur)			

1.3.2 Caractéristiques du site

Afin de répondre aux besoins ci-avant définis, le site doit être aménagé en conséquence. Cela nécessite une analyse des données naturelles locales. Pour l'étude de l'implantation du port et de ses ouvrages extérieurs (cf. article *Principe d'implantation et aménagement des ports* [C 4 630]) ces données ont déjà été largement prises en compte. En ce qui concerne la conception des plans d'eau, une étude plus approfondie est à mener sur :

— les **données météorologiques** et notamment le vent. Les postes doivent en effet être orientés dans le sens des vents dominants afin de faciliter la manœuvre des navires. De même, dans les zones de navigation aux largeurs réduites (chenaux, pertuis, écluses), les vents traversiers ne doivent pas être excessifs ;

— les **hauteurs d'eau disponibles**. La connaissance du niveau de l'eau est essentielle pour la conception d'un port. Si cet aspect du problème ne revêt qu'une importance moindre dans les mers à faibles variations de niveaux (Méditerranée, par exemple), il est par contre primordial dans les mers à marée. Dans celles-ci, la variation du niveau de l'eau peut atteindre des amplitudes très importantes, jusqu'à 14 m (baie de Fundy au Canada) ;

— les **données géologiques**. La nécessité d'offrir une hauteur d'eau suffisante pour les manœuvres de navire peut conduire à draguer ou à dérocter les fonds. Une très bonne connaissance géologique du site est, dans ce cas, nécessaire.

1.3.3 Dimensionnement horizontal des plans d'eau

Venant d'une navigation en route libre au large, le navire, avant d'être immobilisé au poste où il doit effectuer ses opérations, effectue un certain nombre de manœuvres : chenalage pour arriver dans l'avant-port, évitage et approche du poste, accostage au poste.

Le **chenal d'approche** est généralement de largeur réduite en raison des coûts d'établissement et de maintien des profondeurs. Le navire, par contre, doit composer avec des courants et des vents traversiers, ce qui nécessite qu'il dispose d'une largeur de chenal supérieure à sa largeur propre. En première approximation on retient généralement une largeur de chenal égale à la longueur du navire.

Afin de casser son erre et de se présenter à la zone d'accostage, le navire manœuvre dans une **zone d'évitage**. Il s'agit d'un plan d'eau largement dimensionné et contraignant dans l'élaboration d'un plan masse (figure 2). La forme de la zone d'évitage est généralement circulaire. La détermination de son diamètre avec des conditions normales de courants (1 nœud ≈ 0,5 m/s) et de vents (15 nœuds) prend en compte la capacité de manœuvre du navire, et en particulier son nombre d'hélices, ainsi que les aides apportées par le port, et en particulier le nombre et la présence des remorqueurs d'assistance. On peut retenir qu'en fonction de ces divers paramètres, le diamètre du cercle d'évitage est à dimensionner entre 1,5 et 5 fois la longueur du navire.

Le dimensionnement des **zones d'approche** des postes pose principalement celui des darses et bassins, et plus particulièrement leur largeur. Cette largeur doit permettre d'accueillir, le long de chaque quai, un navire avec ses engins de servitude (pontons, grues, allèges...). Elle doit, de plus, dégager une largeur minimale égale à deux fois la largeur du plus grand navire reçu dans le bassin. Dans ces conditions, une largeur de 100 m est un minimum à prévoir. Des largeurs supérieures sont cependant souvent retenues, en particulier quand le bassin a une longueur importante (par exemple, le nouveau bassin du Pacifique du port du Havre pour les navires porte-conteneurs de 4^e génération a une largeur de 300 m).

1.3.4 Dimensionnement des profondeurs

La donnée de base est le **tirant d'eau du navire de projet**. À celui-ci s'ajoute une marge de sécurité appelée **pied de pilote** (figure 6).

La détermination du pied de pilote est complexe. Elle doit intégrer de nombreux facteurs tels que :

- les engraisements entre deux campagnes de dragage ;
- la précision des mesures des fonds ;
- l'abaissement du niveau de l'eau et l'enfoncement du navire pendant le déplacement de ce dernier (phénomène de squat, cf. article *Navires. Navigation* [C 4 620]. *Balisage* dans ce traité) ;
- l'agitation du plan d'eau ;
- les décotes accidentelles du niveau d'eau.

En pratique, on peut retenir un pied de pilote approximativement dimensionné comme suit :

- 20 % du tirant d'eau dans la zone d'approche au large ;
- 10 à 15 % du tirant d'eau dans les chenaux selon l'exposition ;
- 10 à 15 % en site exposé et 7 % en site abrité pour les zones de manœuvre et d'accostage.

Ce calcul conduit bien souvent à des valeurs de profondeurs théoriquement nécessaires, mais difficilement réalisables soit d'un point de vue technique, soit d'un point de vue économique.

Dans les ports à marée, il peut être remédié à cette difficulté en utilisant la hauteur d'eau supplémentaire offerte au moment de la pleine mer. Dans ce cas, les accès et sorties du port ne peuvent s'effectuer qu'à ce moment de la marée et l'exploitation du port doit être conçue en conséquence.

À titre d'exemple, on peut citer le terminal pétrolier du Havre-Antifer (figure 2). Le tirant d'eau du navire de projet retenu, un pétrolier de 550 000 tpl, est de 28,50 m. Les études ont montré que le pied de pilote brut pouvait être limité à 2,50 m. La profondeur d'eau nécessaire est donc de 31 m. Le chenal d'accès au port a été dragué à la cote - 25 par rapport au zéro des cartes marines. La hauteur d'eau nécessaire en supplément, 6 m, est obtenue en opérant à pleine mer.

On peut aussi avoir recours à des ouvrages de retenue des eaux dans des bassins à niveau constant ou à flot. Il s'agit de portes de flot ou d'écluses derrière lesquelles un approfondissement moindre des bassins est compensé par une hauteur d'eau disponible en permanence plus grande. Dans ce cas aussi l'exploitation du port doit être adaptée en conséquence.

1.4 Conception et dimensionnement des terminaux

Le terminal est la zone du port où un navire peut accoster et où ses opérations à terre, liées à son escale, peuvent être effectuées. La spécialisation des navires et des engins de transports terrestres a conduit de plus en plus à équiper les ports de terminaux affectés à tel ou tel type de trafic. Cela nécessite des investissements importants, souvent moins utilisés par rapport à des ouvrages banaux. Cependant les économies d'exploitation qu'ils permettent d'obtenir compensent les investissements supérieurs qu'ils requièrent.

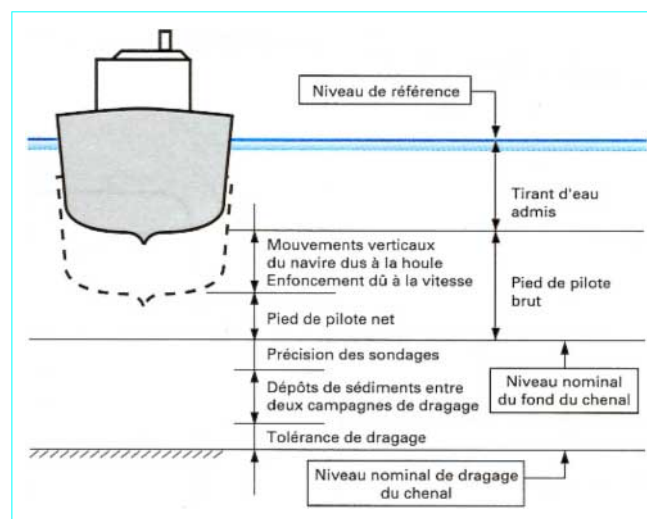


Figure 6 – Définition des pieds de pilote

Toutefois, dans des petits ports, des terminaux peuvent être aménagés afin de recevoir divers types de trafics. Ils sont alors conçus en fonction des caractéristiques propres aux activités locales et des trafics prédominants.

Dans ce qui suit seront analysées les structures des terminaux spécialisés pour des trafics individualisés. Seront abordés, dans ces conditions, les terminaux à vrac, à marchandises diverses, de pêche, et de voyageurs.

D'une façon générale, la longueur de chaque poste dépend de celle du navire de projet. À celle-ci doivent être ajoutés 30 ou 40 m pour l'amarrage. Concrètement, cela conduit à des longueurs, pour des navires accostés sur leurs murailles, de 150 m pour des cargos, 300 m pour les paquebots et plus de 400 m pour les plus grands transporteurs de vracs.

À l'extrême, quand les amarrages se font sur des ducs-d'Albe pour les plus grands pétroliers, les distances requises peuvent atteindre 500 à 600 m.

1.4.1 Terminaux à vrac

On opérera une distinction entre les vracs liquides et les vracs solides.

■ Vracs liquides

La manutention de ces vracs se fait par pompage soit par refoulement à partir des pompes du navire pour l'importation, soit par refoulement à partir des pompes de terre pour l'exportation.

Les terminaux doivent être équipés d'aires de stockage à terre. Elles sont formées de bacs de contenance globale au moins égale au volume de la cargaison manutentionnée.

Dans ces bacs, les liquides sont stockés soit avant d'être embarqués pour les exportations, soit après avoir été débarqués pour les importations. Ces stockages nécessitent en général d'être reliés aux destinations finale ou d'origine par des réseaux de canalisations qui sont très contraignants dans les plans masses portuaires.

Dans les terminaux pétroliers, les capacités des bacs peuvent atteindre 150 000 m³ de volume unitaire pour le pétrole brut.

Ces équipements, qui sont des installations classées pour la protection de l'environnement (loi n° 76663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement), demandent à être soigneusement étudiés du point de vue de leur sécurité et de leur compatibilité avec leur environnement.

■ Vrac solides (charbon, minerai de fer, céréales, etc.)

Ces installations sont plus complexes que celles des terminaux de vrac liquides car les opérations de manutention et de transfert se font par l'intermédiaire d'équipements situés à terre, en général lourds et volumineux. Par ailleurs, les équipements de déchargement sont différents des équipements de chargement.

L'accroissement de la taille des navires a nécessité une augmentation des rendements des engins de manutention.

Dans le cas de chargement, l'opération se fait d'une façon relativement simple par gravité. Au déchargement, par contre, la nécessité de relever la marchandise conduit à un rendement moindre. On peut, dans ces conditions, atteindre un rendement de 8 000 t/h au chargement et seulement 4 000 t/h au déchargement par engin (§ 3.4.1).

L'équipement de transbordement à terre est complété par une aire de stockage qui doit être dimensionnée avec ses facilités terrestres d'approvisionnement et d'évacuation, de façon à ne pas entraver les cadences de transbordement (figure 7).

1.4.2 Terminaux à marchandises diverses

Longtemps opérées par conditionnements unitaires de faible volume et à caractères très disparates, les marchandises diverses sont maintenant de plus en plus traitées par unités de charges plus importantes et de plus en plus normalisées. La technique de manutention, autrefois presque exclusivement verticale, s'est diversifiée pour, en particulier, faire une part plus importante aux techniques de manutention horizontale.

On examinera successivement les terminaux à marchandises diverses classiques, les terminaux à conteneurs, les terminaux rouliers.

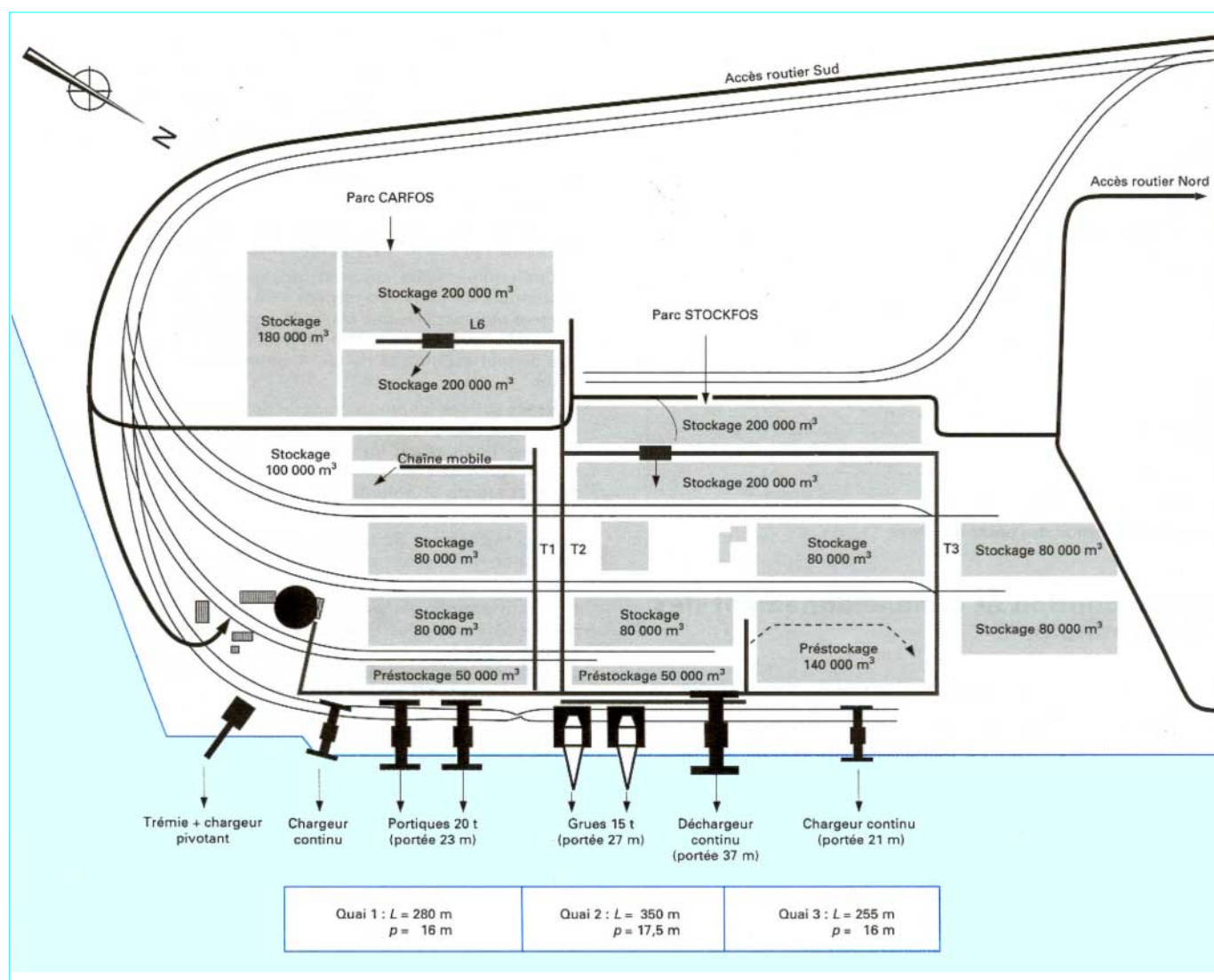


Figure 7 – Terminal minéralier de Fos

1.4.2.1 Terminaux à marchandises diverses classiques

Le navire cargo classique a une capacité de 8 000 à 10 000 tpl, ce qui requiert une longueur de poste de l'ordre de 150 m.

Les marchandises peuvent être transbordées soit directement entre le moyen de transport terrestre et le navire, soit indirectement avec passage sous hangar ou sur terre-plein. La technique de transbordement indirect nécessite d'importantes surfaces de transit, mais elle assure une meilleure fluidité dans l'exploitation et réduit les temps d'immobilisation des moyens de transport. La technique de transbordement direct réduit par contre le nombre d'opérations de manutention.

Transversalement, sur un poste à marchandises diverses classique, on trouve une voie de grue enjambant une voie ferrée. Les grues ont une force de levage courante de 15 t. En arrière, le poste est doté de une ou deux voies ferrées (transbordement direct). Ces voies, de même que celles des grues, doivent être du type « rails à gorge » afin de ne pas entraver la circulation des engins de manutention et de transport sur pneus.

Une zone d'empilage (transbordement indirect) est à prévoir pour le stockage intermédiaire des marchandises. Puis viennent des zones de stockage en plein air et couvertes (hangars) pour les marchandises fragiles.

En arrière des hangars, l'équipement du terminal est complété par des routes et des voies ferrées destinées à l'acheminement ou à l'enlèvement des marchandises.

La largeur d'un tel dispositif est de l'ordre de 150 m pour un poste à transbordement direct et de 250 m pour un poste à transbordement indirect.

On peut retenir que l'optimum économique d'occupation d'un poste par les navires est de l'ordre de 50 % du temps. Avec un équipement normal, le rendement d'un tel poste est d'environ 700 t/m/an. Un poste de 150 m de long permet donc d'assurer un trafic annuel de 100 000 t.

1.4.2.2 Terminaux à conteneurs

Depuis une trentaine d'années, le développement des conteneurs a profondément marqué le transport maritime et a imposé aux ports (figure 8) de s'adapter à cette nouvelle technique de conditionnement de la marchandise (cf. article *Transport par voie navigable* [AG 8 130] dans le traité L'entreprise industrielle).

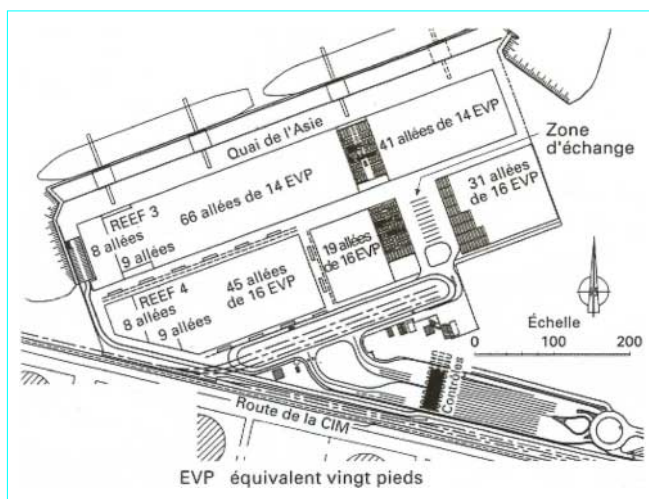


Figure 8 – Plan masse du terminal de Normandie du port du Havre (terminal à conteneurs)

Le conteneur est généralement caractérisé par sa longueur exprimée en pieds. Dans la normalisation traditionnelle cette longueur peut être de 20, 30 ou 40 pieds. L'unité de comptage est l'équivalent vingt pieds (EVP) ou le *twenty equivalent unit* (TEU). Il y a lieu de noter qu'apparaissent des conteneurs non conformes aux normes traditionnelles (*High cube* par exemple), qui nécessitent des adaptations particulières.

Les navires ont évalué considérablement en taille avec le développement de la conteneurisation.

Au départ, la 1^{re} génération, qui était formée en fait d'anciens cargos adaptés, pouvait porter de l'ordre de 700 EVP. Les évolutions successives ont conduit à des navires de 290 m de long avec une capacité de 4 000 EVP (4^e génération).

Plus récemment sont apparus des navires dont la largeur excède celle des écluses du canal de Panama (32,35 m). Cette nouvelle génération dite « Over Panamax » offre des capacités de charge très importantes, de l'ordre de 5 000 EVP ; elle nécessite toutefois des engins de manutention à quai adaptés avec, en particulier, des portées plus grandes.

Les grands navires porte-conteneurs modernes représentent des investissements très importants avec des coûts d'exploitation élevés. Le port doit, dans ces conditions, être situé près de grandes routes maritimes. Le terminal doit être proche de l'entrée du port, et accessible rapidement 24 h sur 24 tout au long de l'année. Cela impose des localisations de terminaux très contraignantes pour des navires ayant une durée d'escale très réduite qui doivent pouvoir accéder au port à tout moment. C'est ainsi, en particulier, que les ports d'Anvers et du Havre ont implanté leurs nouveaux terminaux à conteneurs en aval de leurs écluses maritimes (figure 9).

Un grand terminal moderne est formé de plusieurs postes ; pour chacun d'entre eux on retient une longueur de quai de 300 m et des profondeurs d'eau de 14 à 15 m pour les grands navires porte-conteneurs de la 4^e génération.

En arrière des quais, le terminal à conteneurs doit avoir des terre-pleins très vastes. Une profondeur de 200 m est un minimum (pour les trafics de cabotage *feeders*). Cependant, dans les grands terminaux modernes la profondeur peut atteindre 500 m.

En bordure de quai, une zone de 50 m environ de large doit être réservée pour le transfert et la circulation.



Figure 9 – Terminaux à conteneurs en aval de l'écluse François 1^{er} du Havre

En arrière, les terre-pleins comprennent des zones de stockage distinctes liées à l'importation et à l'exportation ainsi que des zones de circulation. Des emplacements particuliers doivent être réservés pour les conteneurs réfrigérés (avec prises électriques), pour le stockage des conteneurs transportant des produits dangereux, pour la réparation des conteneurs et pour les transbordements ferroviaires.

Les superficies nécessaires pour un terre-plein à conteneurs ne peuvent être définies qu'après une étude approfondie des conditions locales d'exploitation, en y intégrant notamment la durée de stationnement des conteneurs avant exportation et après importation et les techniques de manutention (chariot élévateur, chariot cavalier, portique de parc).

En première approximation, on peut retenir une valeur moyenne de 1 m² par EVP par an pour les surfaces de stockage, et considérer que celles-ci représentent 60 % de la surface du terminal.

1.4.2.3 Terminaux rouliers

Dans ces terminaux, la manutention se fait par roulage direct de la marchandise entre le navire et les terre-pleins bord à quai. Cette technique est également appelée RO-RO (*roll on, roll off*).

Dans ce cas, on a affaire à des navires spécialisés équipés de rampe d'accès se situant soit à l'avant, soit à l'arrière, soit sur le côté du navire (3/4 arrière pour des ports à faible marnage). Il faut cependant noter que certains navires porte-conteneurs sont également équipés de rampes. Dans ce cas, le terminal à conteneurs doit également être équipé pour la manutention horizontale.

La liaison terre/navire se fait par l'intermédiaire de rampes : la rampe mobile dont est équipé le navire venant s'appuyer sur une rampe dont est doté le poste. Cette dernière est conçue après analyse spécifique à chaque cas particulier (§ 3.2.1.2). Le poste pourra être doté d'une rampe fixe si la variation de niveau du plan d'eau est inférieure à 1,50 m. Au-delà, on devra avoir recours à une passerelle mobile. La longueur de cette dernière devra permettre d'offrir des

pententes n'excédant pas 14 %. De même on veillera à ce que les changements de pentes permettent le passage des véhicules à faible garde au sol.

La rampe dont est équipé le poste est souvent le point limitant dans le débit de traitement de la marchandise. On veillera à ce qu'elle ait une largeur suffisante.

Les terre-pleins doivent être dimensionnés compte tenu de la nature des cargaisons (palettes, remorques de parc, semi-remorques), de la nécessité de séparer les flux import et export et de l'aménagement de zones de circulation qui représentent 30 à 40 % de la superficie totale (figure 10). La surface d'un terre-plein de poste roulier est supérieure d'environ 50 % à celle d'un poste conventionnel. Une surface moyenne de l'ordre de 5 ha est à retenir.

Un poste roulier peut assurer un trafic annuel de 500 000 à 600 000 t de marchandises.

1.4.3 Terminaux de pêche

Le port de pêche doit offrir aux navires les facilités requises, d'une façon générale, pour les autres types de port. Il présente cependant un certain nombre de spécificités qui imposent qu'il soit conçu et aménagé d'une façon particulière. Ces spécificités tiennent, d'une part, aux conditions d'usage du port par les navires et, d'autre part, à la nature de la marchandise débarquée.

Pour ce qui concerne les navires, le port de pêche doit, entre deux campagnes, leur permettre de débarquer le poisson, d'effectuer les opérations de réparation et d'avitaillement, de stationner dans l'attente de la campagne suivante.

En ce qui concerne le produit de la pêche, celui-ci doit pouvoir être débarqué, trié, vendu, conditionné, transformé et expédié.

■ Zones d'accueil des navires

Les caractéristiques des navires de pêche les plus courants sont indiquées dans le tableau 2.

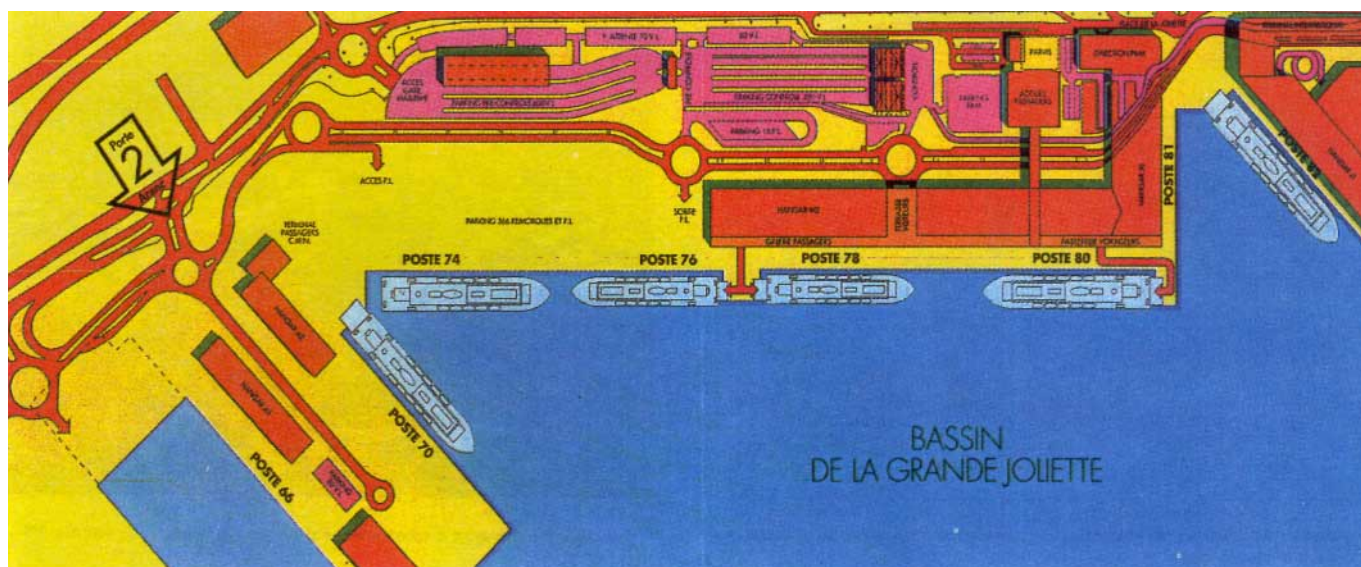


Figure 10 – Terminal roulier à Marseille

Tableau 2 – Caractéristiques des navires de pêche

Déplacement ⁽¹⁾ (t)	Longueur totale (m)	Largeur (m)	Tirant d'eau ⁽¹⁾ (m)
2 800	90	14,0	5,9
2 100	80	12,0	5,3
1 550	70	10,5	4,8
800	55	8,5	4,0
400	40	7,0	3,5

(1) Pour les définitions de ces termes, se reporter à l'article *Navires. Navigation. Balisage* [C 4 620] de ce traité.

■ Quais de déchargement

La zone de déchargement se situe en face des installations destinées aux premières opérations effectuées sur le poisson : pesage, triage, vente. Cette contrainte limite forcément la longueur de ce quai. Cette longueur doit être étudiée soigneusement en fonction, par ailleurs, de la longueur des navires, du nombre de ces derniers à traiter simultanément et du temps nécessaire à un déchargement.

Dans des installations récentes, on trouve des aménagements avec accostage perpendiculaire au quai et déchargement frontal pour s'affranchir de la contrainte ci-avant.

■ Quais d'avitaillement

Dans cette zone, les navires sont chargés en carburant, glace, nourriture. Là aussi les longueurs de quai requises doivent être soigneusement calculées en fonction du nombre des navires à avitailler, de leur longueur et de la durée des opérations.

■ Quais de stationnement

Dans cette zone, le navire est en attente avant la prochaine campagne. Les longueurs d'ouvrages d'accostage sont déterminées suivant les critères évoqués ci-avant. Mais on peut y admettre des navires stationnés à couple.

■ Quais à usages particuliers

Il peut être nécessaire de prévoir, dans le plan masse du port de pêche, un poste pour navires pétroliers afin d'alimenter la flotille en carburant.

Il faut mentionner aussi, dans les ports situés à proximité des zones de pêche, l'intérêt de zones d'abri où les navires peuvent venir rapidement se réfugier en cas de fortes tempêtes.

■ Équipements à terre

Généralement, dans un port de commerce traditionnel, la marchandise ne subit qu'une simple opération de transfert d'un mode de transport à un autre. Dans le cas d'un port de pêche, le poisson subit d'autres opérations : tri, lavage, vente, etc.

Sur la figure 11 figurent schématiquement les diverses opérations à prévoir dans la chaîne d'acheminement portuaire.

L'attention doit être appelée sur le règlement sanitaire européen des ports de pêche qui impose des contraintes très strictes, du point de vue de l'hygiène, aux installations portuaires de traitement et de transit.

On peut retenir les ordres de grandeur suivants pour ces installations :

- par mètre de quai, les rendements de déchargement sont de 120 t par an dans les grands ports et de 60 t dans les petits ;
- pour les zones de dépôt et de tri, les rendements de 6 à 8 t de pêche par mètre carré et par an sont normaux.

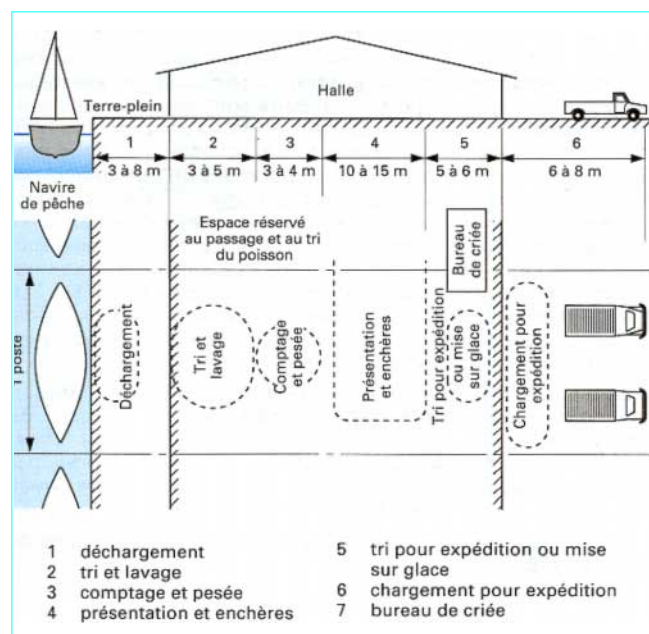


Figure 11 – Chaîne de traitement des produits de la pêche

1.4.4 Terminaux de voyageurs

Le transport des voyageurs s'est fait depuis la plus haute antiquité par voie maritime. Ce mode de transport a longtemps été, en effet, le seul techniquement possible pour relier deux points, en particulier pour les liaisons entre continents séparés par des océans. Le recours à la voie maritime a permis aussi de pallier l'inexistence de voies de liaison terrestres ou l'insécurité de ces dernières.

Cependant, avec le développement considérable qu'a connu ces dernières décennies la voie aérienne, le transport des voyageurs par voie maritime a subi un important déclin. Le dernier grand paquebot français, le « France » avait été conçu pour assurer d'une façon intensive des transports de voyageurs sur l'Atlantique Nord. La concurrence de l'avion a, entre autres raisons, nécessité de le reconverter pour d'autres fonctions.

Le passage des voyageurs par les ports, très intensif dans la première moitié du 20^e siècle, a nécessité l'aménagement de terminaux spécifiques. Ceux-ci ont été dotés, en particulier, de gares maritimes, bâtiments très importants, qui étaient le maillon principal de la liaison terre-mer dans le port.

Elles subsistent dans certains sites portuaires (Cherbourg, Le Havre par exemple) mais ne sont plus guère utilisées et sont réaffectées à d'autres usages, souvent non portuaires.

Il subsiste cependant actuellement des terminaux de voyageurs dans les ports. Ceux-ci répondent essentiellement à deux types de besoins : la croisière et les transports rouliers de passagers avec véhicules.

Le transport maritime, pris comme activité de liaison, a conduit au développement des croisières qui se sont considérablement démocratisées ces dernières années. Pour faire face à la demande, les armateurs ont mis en ligne des unités de grandes dimensions pouvant accueillir plus de 2 000 passagers : longueur de plus de 250 m, largeur de plus de 30 m, mais tirant d'eau n'excédant pas 8 m. Ces navires luxueusement équipés ont des fardages importants. Cependant, grâce à des équipements développés (double ligne d'arbres avec gouvernails indépendants et propulseurs transversaux), ils restent très manœuvrants et ne nécessitent pas de

cercles d'évitage supérieurs à deux fois leur longueur. Sont apparus également sur le marché des navires de croisière de petite taille, sophistiqués, de type voiliers (135 m de long, tirant d'eau inférieur à 4 m, nombre de passagers allant de 100 à 150).

En ce qui concerne les transports de type *car-ferry*, indépendamment des petites unités affectées à des liaisons locales, la course au gigantisme marque également cette activité. Des navires de 50 000 tjb (tonneau de jauge brute ; 1 tjb = 2,83 m³) et de 200 m de longueur existent ou sont en commande. Ils pourraient atteindre des capacités de 3 000 passagers et de 1 000 voitures.

Les terminaux spécialisés pour l'accueil des voyageurs doivent être localisés dans des sites qui doivent satisfaire, outre les contraintes nautiques, celles de proximité des zones urbaines. Le transit de voyageurs en grand nombre est un élément important pour l'animation d'une ville portuaire et pour son activité économique. Cette particularité a également pour conséquence de nécessiter un aménagement du terminal de grande qualité sur le plan esthétique. Sur le plan architectural, la gare maritime, élément essentiel du terminal, doit faire l'objet d'un soin particulier (figure 12). L'agencement d'une gare maritime est précisé au paragraphe 3.2.2.

1.5 Aménagements divers intérieurs

En dehors des terminaux spécialisés décrits ci-avant, le port peut comprendre d'autres aménagements, répondant à des besoins moins directement liés au changement de modes de transport maritime-terrestre. Il s'agit d'activités à caractère industriel ou commercial qui s'intègrent cependant naturellement dans un contexte portuaire (figure 13).

■ Chantiers de construction navale

Dotés de formes de construction ou de plans inclinés de lancement, ils doivent être, pour des raisons évidentes, en liaison avec le plan d'eau. L'équipement du chantier doit être complété par un quai d'armement doté de moyens de levage puissants où le navire reçoit ses équipements de finition.

■ Chantiers de réparation navale

Véritables stations-service des océans, ils doivent pouvoir offrir aux navires tous les services de maintenance nécessaires soit à flot, soit à sec. Pour les navires pétroliers, des équipements de déballastage et de dégazage sont nécessaires. Cette fonction doit être complétée par les services d'avitaillement, en particulier en carburant.

■ Zones d'accueil pour bâtiments de servitude

Les diverses unités flottantes qui concourent au fonctionnement du port : bateaux-pilotes, remorqueurs, dragues, vedettes de lamassage et de travaux... doivent pouvoir stationner dans une ou plusieurs zones qui leur sont affectées. Le plan masse du port doit le prévoir.

■ Zones industrielo-portuaires

Implanter une usine dans une zone portuaire permet de raccourcir à l'extrême les acheminements terrestres pour les marchandises empruntant la voie maritime et consommées ou produites par l'usine. Il en résulte des économies très sensibles sur les transports terrestres.

Les sites portuaires à vocation industrielle sont cependant relativement rares en raison des caractéristiques qu'ils doivent réunir : surfaces disponibles importantes, possibilité de recevoir des navires vraquiers de grandes dimensions, desserte en énergie et en eau industrielle importante, support commercial et tertiaire important et de qualité, etc.

Les usines doivent, par ailleurs, bénéficier d'un hinterland de consommation de leur production proche.

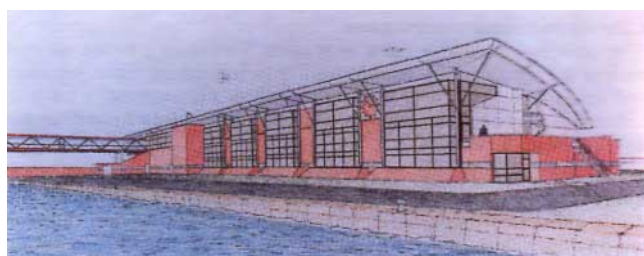


Figure 12 – Gare maritime du terminal Manche-Citadelle au Havre



Figure 13 – Zone industrielle portuaire du Havre

La liste ci-avant n'est pas exhaustive, d'autres activités ayant un lien avec la fonction portuaire pouvant trouver place dans les ports. À cet égard, l'intégration de plus en plus forte de l'organisation logistique des transports des marchandises entre la production et la consommation peut donner au port, avec sa fonction intermodale, un intérêt particulier.

C'est ainsi que certains sites portuaires se trouvent être des lieux privilégiés pour recevoir des centres de stockage et de distribution des marchandises. Dans ce cas, cependant, une très bonne localisation du port vis-à-vis des centres de production et de consommation est indispensable.

1.6 Dessertes et liaisons intérieures terrestres

Les marchandises et les voyageurs embarqués ou débarqués dans un port n'ont que rarement une destination ou une origine internes au port lui-même. Ils ont généralement à être transportés, jusque ou depuis la zone portuaire (pré- et post-acheminements), par des voies terrestres. Il importe donc que la zone portuaire puisse se connecter harmonieusement à ces dessertes. Dans le flux de passage mer-terre ou inversement, l'entrée ou la sortie des terminaux maritimes ne doivent pas constituer des goulots d'étranglement qui pourraient pénaliser l'efficacité du port. Les plus grands ports mondiaux sont en butte à ce problème actuellement, leurs capacités de trafic sont en effet limitées, non pas par leur potentiel maritime,

mais par leurs dessertes terrestres. L'énorme développement qu'ont connu, ces dernières décennies, les transports par mer s'est accompagné d'une adaptation non seulement des ouvrages maritimes, mais aussi des équipements terrestres. Le port, qui avait vu bien souvent une ville se développer autour de ses installations, se trouvait considérablement entravé dans le développement de ses liaisons terrestres du fait de la présence de la ville. Dans le même temps, celle-ci subissait des nuisances croissantes avec l'augmentation des transports qui la franchissaient.

La réponse à ce double problème d'environnement et d'équipement portuaire a bien souvent résidé dans une solution de délocalisation du port (Fos-sur-Mer, Bilbao, Gênes...). Mais, même dans un site délocalisé, le port doit être bien irrigué par l'ensemble des moyens de transports terrestres (routes, voies ferrées, canaux, canalisations).

Le tableau 3 donne la répartition modale du trafic portuaire du Havre en 1993.

Tableau 3 – Répartition modale du trafic portuaire du Havre en 1993

Mode	Tonnage (Mt)	Pourcentage (%)
Transbordements maritimes.....	7,5	14
Canalisations	27,1	49
Voie ferrée.....	4,3	8
Canaux	1,5	3
Route	14,5	26
Total	54,9	100

Ces chiffres mettent en évidence l'importance des dessertes portuaires par les canalisations. Cela est le reflet de la part essentielle des hydrocarbures dans les trafics portuaires. Il s'agit de vrac liquides dont les pré- et post-acheminements sont assurés principalement par canalisations. Le passage de ces dernières dans la zone portuaire s'opère en général de façon souterraine, ce qui permet d'affecter la surface à d'autres usages.

Cela est cependant limité du fait de la nécessité de visiter et d'entretenir les canalisations. Elles font par ailleurs obstacle aux aménagements souterrains comme les fondations profondes d'ouvrage. Aussi est-il préférable de prévoir, dans les plans masses, des couloirs de passage de canalisations qui, s'ils ne peuvent éviter de croiser les équipements linéaires (routes, voies ferrées...), permettent d'éviter les autres ouvrages (terre-plein, usine...).

Dans la détermination du tracé de ces couloirs, une attention particulière devra être attachée aux franchissements des plans d'eau et canaux, qui se font généralement par siphons. Lors de la conception du plan masse général du port, ces importants éléments structuraux doivent impérativement être intégrés.

Pour les liaisons par voies ferrées, routes et canaux, les équipements portuaires à prévoir comportent trois types d'ouvrages :

- les **embranchements aux réseaux extérieurs**. Il s'agit de bretelles routières ou ferroviaires de liaison avec le réseau général. Dans le cas de la voie d'eau, la liaison peut nécessiter l'aménagement d'une écluse fluvio-maritime, en particulier dans les ports à marée (écluse de Mardyck à Dunkerque) ;

- les **réseaux de dessertes internes**. Ceux-ci doivent permettre aux différents véhicules (trains, péniches, camions) de parvenir le plus près possible des terminaux spécialisés. Des intersections entre ces diverses liaisons ainsi qu'avec la liaison maritime sont en général inévitables. Elles nécessitent des équipements particuliers (passages à niveau, ponts mobiles) qui doivent être conçus afin de minimiser la gêne apportée à la fluidité des divers trafics ;

- les **chantiers de transbordement**. La liaison directe navire-transport terrestre est rarement possible. Une reprise intermédiaire de l'un à l'autre est en général indispensable. Aussi chaque terminal spécialisé doit-il être doté de chantiers de transbordement : chantier ferroviaire, poste pour péniches, zone d'accueil de camions.

2. Infrastructures des terminaux

Les terminaux portuaires comportent tous, quels que soient leurs trafics (passagers, pétrole, conteneurs, vrac solides, etc.), des ouvrages d'infrastructure appelés aussi ouvrages d'accostage et d'amarrage des navires et des ouvrages de superstructure, pour la manutention et le stockage.

Le présent paragraphe traite des infrastructures des terminaux. Il donne d'abord le classement des divers **types d'ouvrages d'accostage** du point de vue fonctionnel, c'est-à-dire selon les **rôles** remplis par l'ouvrage. Puis sont examinées les caractéristiques communes à ces divers types (dimensions, efforts supportés, méthode générale de calcul). Enfin sont présentées une à une les principales **structures** utilisées en pratique, qu'on peut classer en **catégories d'ouvrages**.

2.1 Classement fonctionnel

Le classement selon les types d'ouvrages est établi en fonction des rôles qui peuvent être remplis par l'ouvrage :

- **rôle d'appui** du navire pour son accostage et **rôle d'amarrage**, ces deux fonctions correspondant à l'immobilisation du navire à poste et facilitant donc l'escale et les manutentions ;
- **rôle de liaison** entre le navire et la terre et **de support** des installations pour la manutention et les services au navire (avitaillement, fourniture d'eau et d'électricité, téléphone, etc.) ;
- **rôle de soutènement** des terres à la limite du plan d'eau.

Selon les rôles remplis, on distingue, du point de vue fonctionnel, les types d'ouvrages indiqués dans le tableau 4, classés par ordre de confort croissant pour le navire et pour l'exploitation du terminal et en même temps par ordre de coût croissant à taille de navire donnée.

Dans ce tableau, on a omis les types d'ouvrages n'assurant que la fonction d'amarrage, sans l'accostage, constitués seulement par un ou deux coffres ou bouées d'amarrage : ces installations, très sommaires, n'existent en général pas à l'intérieur des ports, mais seulement en offshore.

Les divers rôles cités dans le tableau sont tous remplis par la même structure dans le cas d'ouvrage de type quai continu ; par contre les fonctions peuvent être séparées entre des structures distinctes (ducs-d'Albe séparés, points d'amarrage à terre, plate-forme) pour un ouvrage de type appontement.

2.2 Caractéristiques communes aux ouvrages

Les caractéristiques géométriques et les efforts à supporter dépendent du navire de projet, c'est-à-dire du navire le plus contraignant à recevoir au poste, des rôles à remplir par l'ouvrage, des conditions météorologiques et océanographiques dans la zone plus ou moins bien abritée du poste d'accostage, des aides envisagées pour la manœuvre d'accostage, des cadences et des caractéristiques des engins de manutention envisagés, du stockage

prévu sur l'ouvrage, de la nature des sols, etc. La méthode générale de calcul des ouvrages d'accostage ainsi que les équipements communs à toutes les catégories d'ouvrages sont également présentés.

Tableau 4 – Classement fonctionnel des ouvrages

Type d'ouvrage	Rôle		
	Appui Amarrage	Liaison Support	Soutènement des terres
Poste sur ducs-d'Albe A ducs-d'Albe d'accostage et d'amarrage B points d'amarrage à terre	X		
Appontement sur pieux A défenses d'accostage (ou ducs-d'Albe séparés) B points d'amarrage C plate-forme de manutention D passerelle (s) d'accès	X	X	
Poste roulier A ducs-d'Albe latéraux B ducs-d'Albe arrière C porte du navire D passerelle de liaison fixe ou articulée	X	X	
Quai court avec ducs-d'Albe A murs de soutènement B défenses C ducs-d'Albe	X	X	X
Quai continu A défenses	X	X	X

2.2.1 Dimensions des ouvrages

2.2.1.1 Hauteur totale

La hauteur totale H d'un ouvrage au droit du front d'accostage, mesurée depuis le fond du bassin jusqu'au niveau supérieur de l'ouvrage appelé couronnement, constitue sa caractéristique la plus importante. En effet, la hauteur de l'ouvrage est une condition limitante rigoureuse pour le tirant d'eau du navire à recevoir, et elle est difficile à augmenter dans l'avenir pour certaines catégories d'ouvrages (§ 2.4.2) ; en outre, elle intervient avec un exposant α supérieur à 1 dans le coût de construction ($C = kH^\alpha$, α étant de l'ordre de 4/3 à 3/2 selon la catégorie). Il importe donc de la déterminer avec circonspection. La hauteur totale dans le cas général d'un bassin marnant (figure 14) est la somme :

- d'une **marge de sécurité** contre la submersion, entre le niveau de pleine mer de vives eaux d'équinoxe (PMVEE) ou de la crue exceptionnelle en rivière, et celui du couronnement du quai, déterminée en fonction de surcotes accidentelles du plan d'eau possibles dans la zone géographique, de l'agitation résiduelle dans le port ou des vagues de batillage ;
- du **marnage** dans le bassin, entre les pleines mers et les basses mers de vives eaux d'équinoxe (BMVEE) ;
- du **tirant d'eau** du navire de projet (§ 1.3.1) ;
- d'un **pieu de pilote**, distance entre la quille du navire à son niveau le plus bas et la cote nominale du fond au pied de quai, qui doit être de l'ordre de 3 à 7 % du tirant d'eau, selon l'agitation du plan d'eau, la dureté du fond (risque d'avarie par échouage) et l'importance des apports solides.

La **hauteur de calcul**, pour l'étude de la stabilité de l'ouvrage, se détermine à partir du **niveau nominal de dragage** situé environ 0,50 m à 1,00 m au-dessous de la cote nominale du fond, surprofondeur correspondant à la tolérance d'exécution des travaux de dragage et de sondage et au risque d'affouillement du fond par les hélices.

2.2.1.2 Longueur et largeur des ouvrages

Pour un quai continu, sa longueur totale doit être la somme des longueurs hors tout des navires à recevoir simultanément, plus une certaine marge aux extrémités (§ 1.4) et entre deux navires consécutifs pour assurer leur placement et leur amarrage.

Pour un appontement minéralier à un seul poste, sa longueur dépend de la longueur des cales à desservir par les engins de manutention ; sa largeur dépend des engins de manutention prévus : l'entre-axes des rails peut varier de 15 à 35 m selon les ports.

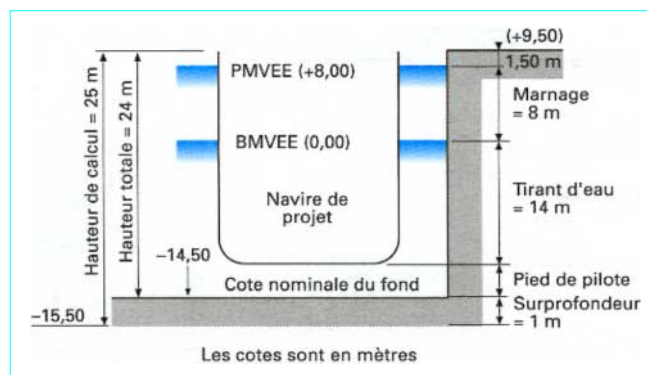


Figure 14 – Hauteur totale d'un ouvrage d'accostage

En ce qui concerne les appontements pour liquides en vrac, la plate-forme (longueur et largeur) peut être beaucoup plus réduite (de 50 m² pour les plus petits à 800 m² pour les plus grands postes) : son rôle est de supporter les bras de déchargement ou de chargement des produits liquides, avec les tuyaux de raccordement aux stockages à terre et les pompes, et de permettre l'accès des véhicules d'avitaillement, de sécurité et d'intervention.

2.2.2 Efforts extérieurs agissant sur les ouvrages d'infrastructure

2.2.2.1 Énergies d'accostage

En fin de manœuvre d'accostage, le navire doit avoir un angle nul ou très faible (5 à 8° maximum) avec la direction du front d'accostage et une vitesse aussi faible que possible, dirigée au plus près de la normale au front d'accostage. Il le touche en général en un point du bordé situé vers l'avant ou vers l'arrière, sur un duc-d'Albe, ou sur une défense de couronnement du quai ou de l'appontement, ce qui occasionne un choc dont l'énergie est absorbée par un effort de contact et une déformation du duc-d'Albe ou de la défense dans la direction du choc.

Le présent paragraphe concerne le choix de l'énergie d'accostage de projet à prendre en compte dans la conception de l'ouvrage afin que la probabilité de dépassement de cette valeur soit suffisamment petite (de l'ordre de 1/1 000 à 1/10 000) et que les dégâts correspondant à un dépassement accidentel de cette énergie puissent être considérés comme étant du domaine de l'assurance ; cependant, la réaction transmise par une défense d'accostage n'étant pas proportionnelle à l'énergie reçue (§ 2.2.4), il est recommandé d'examiner les conséquences d'un dépassement de l'énergie de projet.

L'AIPCN (Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation) recommande d'utiliser l'expression suivante pour calculer l'énergie de projet à adopter par impact, à partir de l'énergie cinétique globale du navire :

$$W = \frac{1}{2} m v^2 C_e C_m C_c \quad (1)$$

W est l'énergie (en kJ) transmise au point d'impact dans la direction de la vitesse du navire v .

m est la **masse totale du navire** (en t), c'est-à-dire son déplacement au moment de l'accostage (le déplacement est de l'ordre de 1,15 fois le port en lourd à pleine charge pour les grands pétroliers chargés, mais le coefficient peut atteindre 1,2 à 1,5 pour les navires de moindre tonnage selon leur type ; il est donné par les constructeurs).

v est la **vitesse d'accostage de projet** (en m/s) du navire, supposé en translation pure, au moment de l'impact. Son choix est important en raison de l'exposant 2 et en même temps très délicat car cette vitesse dépend d'un grand nombre de facteurs locaux (humains, météorologiques, océanographiques, techniques tels que les aides à la manœuvre, etc.). Pratiquement, en se basant sur des mesures et leur exploitation statistique, on obtient selon les conditions d'abri (vent, courant, vagues) les fourchettes suivantes :

- 0,15 à 0,25 m/s pour les grands navires ;
- 0,25 à 0,40 m/s pour les autres.

L'AIPH a défini ainsi les grands navires :

- pétroliers et minéraliers : 200 000 tpl et plus ;
- porte-conteneurs : 250 m de longueur et plus ;
- rouliers : 90 m ou 4 500 tpl et plus.

C_e , C_m et C_c sont des coefficients correcteurs sans dimension.

C_e est le **coefficient d'excentricité** tenant compte du fait que le premier point d'impact ne se trouve pas au milieu du navire, et donc qu'une partie de l'énergie est conservée par le navire pour tourner autour de ce point d'impact et n'est pas transmise à la défense ou au duc-d'Albe touché :

$$C_e = \frac{k^2}{a^2 + k^2}$$

avec k rayon de giration longitudinal du navire, soit environ 0,25 L (longueur hors tout),

a distance entre le centre de gravité du navire et le point de contact (figure 15) ;

c'est-à-dire que pour $a = 0,2 L$ on aura $C_e = 0,6$ et pour $a = 0$ on aura $C_e = 1$.

Pour le choix de a on suppose, pour les grands navires, une distance de 15 m au maximum entre le centre de gravité G du navire et le point situé à mi-distance des deux ducs-d'Albe externes.

C_m est le **coefficient de masse ajoutée**, supérieur à 1, qui prend en compte le fait que, avec le navire, se déplace une certaine masse d'eau l'entourant, qu'il faut aussi arrêter. Ce coefficient est très difficile à évaluer expérimentalement car il dépend d'un grand nombre de facteurs et, selon les auteurs, des valeurs de 1,2 à 2 sont proposées. On pourra adopter une valeur comprise entre 1,5 pour un grand pied de pilote (20 % du tirant d'eau) et 1,8 pour un petit pied de pilote (5 % du tirant d'eau).

C_c est le **coefficient de configuration** qui vaut 0,8 avec un quai plein, car le matelas d'eau situé entre le bordé du navire et le quai absorbe une partie de l'énergie par effet de laminage, et qui vaut 1 avec un quai creux ou un appontement sur pieux.

Une application de la formule (1) est donnée au paragraphe 2.3.4.1.2.

2.2.2.2 Efforts d'amarrage

Les efforts d'amarrage sont exercés par les amarres sur les bollards ou crocs sur lesquels elles sont frappées. Des organismes tels que l'AIPCN, le STCPMNV (Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables), l'OCIMF (Oil Companies International Marine Forum) ont établi des notices détaillées sur le calcul des efforts (direction et intensité), à partir :

- de l'**effort global** exercé par le vent sur la voiture du navire (on peut appliquer les règles Neige et Vent NV 65) et le courant sur sa carène (pression proportionnelle au carré de la vitesse du courant) ;
- du **plan d'amarrage** donnant le nombre et la direction de toutes les amarres, entre lesquelles on décompose l'effort global.

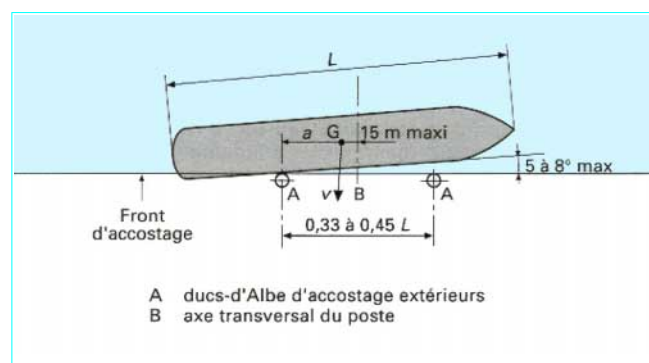


Figure 15 – Schéma d'accostage

Les conditions locales, les caractéristiques géométriques du navire et son plan d'amarrage particulier exigent une étude pour chaque cas ; on peut cependant, pour un avant-projet d'apportement de grand navire pétrolier ou minéralier, retenir des efforts concentrés de $200 \text{ à } 300 \cdot 10^4 \text{ N}$ sur les piles bollards. Si le navire accosté est exposé à la houle, celle-ci sollicite le navire de façon alternée et il peut en résulter des efforts dynamiques importants liés au phénomène de résonance.

Pour un quai continu, le long duquel le schéma d'amarrage des navires est plus classique, on peut adopter, pour navires porte-conteneurs moyens ou grands et en site moyennement exposé, des efforts de $50 \text{ à } 100 \cdot 10^4 \text{ N}$ par bollard, avec un espacement d'une vingtaine de mètres entre bollards, ce qui conduit à un effort réparti moyen perpendiculaire au front d'accostage de $2 \text{ à } 5 \cdot 10^4 \text{ N}$ par mètre de quai.

2.2.2.3 Efforts du vent sur les superstructures

Pour l'ouvrage d'infrastructure, la direction du vent la plus défavorable est perpendiculaire au poste d'accostage, vers le bassin. Les efforts du vent, calculables par les règles Neige et Vent (pour une superstructure fixe) et les règles de la Fédération Européenne de la Manutention (pour les engins mobiles), se réduisent, aux appuis des superstructures, en une réaction horizontale et une réaction verticale vers le haut ou vers le bas due à l'effet de portique ; en cas d'appui encastré, il y a aussi un moment. Il peut y avoir lieu de distinguer les efforts en service et hors service (au-delà du vent de service normal ou exceptionnel). L'ordre de grandeur des efforts horizontaux sur portiques ramenés au mètre de quai ou d'apportement peut atteindre $3 \cdot 10^4 \text{ N}$ à $5 \cdot 10^4 \text{ N}$.

2.2.2.4 Poussée et butée des terres. Dénivelée hydrostatique

Nota : on se reportera aux articles *Ouvrages de soutènement. Poussée et butée* [C 242] et *Drainage. Rabattement* [C 256] de ce traité.

Les actions et réactions du sol jouent un rôle essentiel dans la stabilité des ouvrages d'infrastructure d'un type avec soutènement des terres, tableau 4 ; les poussées et butées sont déterminées par les formules classiques de la mécanique des sols ou mieux selon la théorie élastoplastique, en tenant compte des déplacements. L'attention est attirée sur les points suivants :

- il est intéressant de réduire localement la poussée arrière en disposant une « chaise » quand cela est possible (ouvrages massifs) ;
- la contrainte de butée stabilisatrice est très sensible au choix de son inclinaison sur la normale à l'écran : il sera prudent d'adopter un angle de frottement nul ou faible ;
- il faut s'abstenir de prendre en compte une butée stabilisatrice au pied du quai dans l'épaisseur du sol risquant d'être remanié ou même affouillé ;
- en bordure des bassins marnants, l'ouvrage est soumis à la dénivelée hydrostatique entre la nappe en arrière et le niveau de la basse mer, dont l'effet défavorable à la stabilité peut être très important. À l'inverse, un rabattement permanent dans le terre-plein en arrière de l'ouvrage réduit et peut même inverser le sens de la dénivelée, améliorant ainsi la stabilité du quai (cf. exemple au paragraphe 2.3.2.2) ;
- un filtre en arrière de l'ouvrage peut réduire la surpression hydrostatique, mais il faut qu'il soit bien dimensionné et bien réalisé (exécution délicate sous l'eau ou « à la marée ») pour ne pas être colmaté rapidement par les éléments fins entraînés par l'écoulement et perdre son efficacité ;
- en milieu perméable, du fait des écoulements dus à la dénivelée, les pressions d'eau dans le sol derrière, sous et devant l'ouvrage ne sont pas hydrostatiques : ne pas oublier qu'en plus des conséquences directes de ces pressions sur la stabilité de l'ouvrage les gradients d'écoulement modifient le poids volumique apparent des sols dans le sens défavorable, tant en poussée, derrière, qu'en butée, devant.

2.2.2.5 Efforts verticaux

Avec le **poids propre**, les **sous-pressions** (à pleine mer ou à basse mer) et les **surcharges d'exploitation** (présentes ou absentes) doivent être combinées de la façon la plus défavorable pour l'effet étudié.

Les surcharges de calcul sur terre-plein bord à quai des terminaux à conteneurs sont couramment prises égales à $4 \text{ ou } 5 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$. Les charges concentrées des engins de parc peuvent être encore plus contraignantes.

Pour les terminaux à vracs solides, elles sont beaucoup plus variables selon le produit et la proximité ou non de stockage de matières pondéreuses.

Les galets de portique apportent des réactions pouvant atteindre $75 \cdot 10^4 \text{ N/m}$ de rail.

2.2.3 Vérifications de stabilité

Quelle que soit la structure de l'ouvrage d'accostage, il faut en vérifier la stabilité, dans les cas de charges les plus défavorables. Les vérifications peuvent être faites soit en état limite ultime en pondérant les efforts de service, soit selon la méthode des coefficients de sécurité appliqués aux caractéristiques des matériaux (béton, acier, sol, etc.). Les efforts de service étant fixés par le cahier des charges, on pourra adopter pour les états limites ultimes les coefficients de pondération indiqués au fascicule 62, titre V du CCTG, ce document fixant également les sécurités requises. La stabilité doit être vérifiée pour les divers modes de rupture possibles (figure 16) :

- **stabilité d'ensemble** de l'ouvrage considéré comme un monolithe, c'est-à-dire son équilibre statique **au niveau de sa fondation, vis-à-vis** :
 - du renversement de l'ouvrage autour de son appui avant,
 - du poinçonnement du sol par le radier ou les pieux,
 - du glissement de la base sur le sol ;
- **stabilité par grands glissements** le long d'arcs de cercles traversant le sol en arrière et sous l'ouvrage ;
- **stabilité interne**, c'est-à-dire celle de chacun des éléments et de leurs liaisons entre eux.

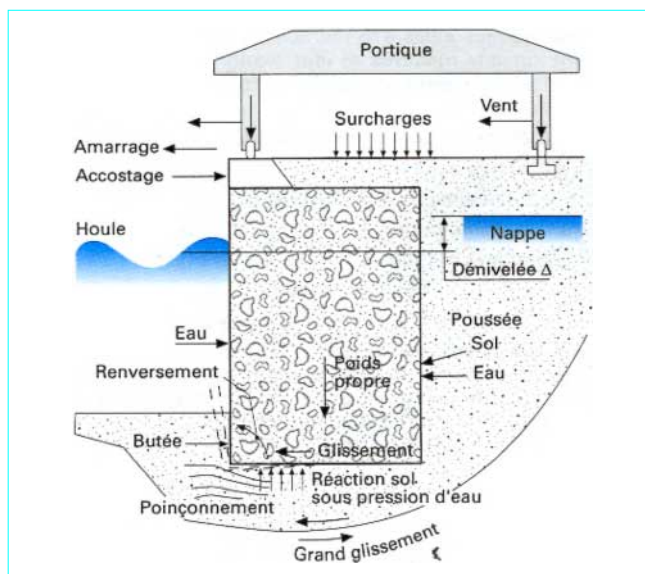


Figure 16 – Stabilité d'un ouvrage massif

2.2.4 Front d'accostage-poutre de couronnement. Équipements

Tous les ouvrages sont munis d'un **front d'accostage**, continu ou non, vertical, et renforcé pour l'appui des navires, au moment de l'accostage, puis lors de leur séjour à poste ; il est disposé en général le long de la **poutre de couronnement** du quai ou de l'appontement, poutre située en tête et en avant des éléments de structure de l'ouvrage pour en assurer la solidarisation dans le sens longitudinal. Le front d'accostage doit être conçu, dans sa géométrie et sa résistance, pour absorber l'énergie d'accostage des navires et éviter tout choc de ceux-ci sur le reste de la structure de l'ouvrage ou sur les superstructures, tout au moins pour un accostage d'inclinaison non accidentelle (§ 2.2.2.1).

Dans les bassins marnants, le front d'accostage doit être continu verticalement, pour permettre aux navires de glisser en montant ou en descendant, sans se coincer.

Pour absorber l'énergie des chocs d'accostage, le front doit être muni de pièces de bois ou, mieux, de **défenses déformables**, solidement fixées pour tenir compte des composantes longitudinales et verticales des chocs. Si l'on rencontre encore parfois des postes équipés de gros pneus usagés, les grands postes modernes sont protégés en général par des défenses en caoutchouc, constituant amortisseurs et dont les courbes reliant effort transmis-déflexion réversible subie-énergie absorbée sont fournies par le constructeur (figure 17). Le nombre des défenses intéressées par un impact et l'écartement entre celles-ci sont à étudier en fonction de l'épaisseur des défenses et des formes avant et arrière des navires, sur la base d'un angle d'accostage normal.

Le **couronnement** du quai est le bord supérieur avant de la poutre de couronnement ; il doit être arrondi et renforcé (béton durci ou tôle d'acier), à cause du frottement des amarres.

Les **équipements d'amarrage, bollards** en général sur les quais, sont scellés par tirants dans la poutre de couronnement par l'intermédiaire d'une embase, le plus près possible du front d'accostage sans cependant présenter de saillie par rapport à un gabarit incliné de 25 à 30° sur la verticale, vers l'intérieur de l'ouvrage, pour éviter tout choc avec les formes de la coque en cas d'accostage oblique. Les postes pour navires à marchandises dangereuses (produits pétroliers par exemple) sont munis d'équipements spéciaux appelés **crocs à largage rapide** pour faciliter l'évacuation rapide du navire en cas d'incident grave.

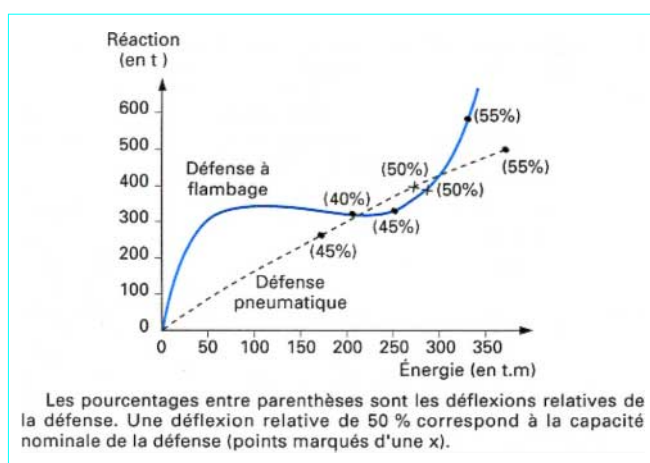


Figure 17 – Relation entre énergie, réaction et déflexion pour deux unités de défense

On rencontre également dans le couronnement un **caniveau** pour les réseaux divers desservant les engins de manutention sur rail et les navires, avec des niches pour les prises (électricité, eau, téléphone, etc.).

Enfin, les quais sont en général équipés d'**échelles** verticales pour l'accès aux petites embarcations.

2.3 Classification des ouvrages selon leur structure

Selon leur structure, les ouvrages d'accostage et d'amarrage peuvent être classés en quatre grandes catégories :

- les **ouvrages massifs** dits aussi **ouvrages-poids**. Ils assurent le soutènement des terres et leur stabilité d'ensemble est assurée par leur poids propre ; leur fondation est continue ;

Cette catégorie se décompose en deux selon le niveau de la fondation des éléments :

- les ouvrages fondés près du fond du bassin,
- les ouvrages fondés en profondeur, encastrés dans le sol ;

- les **ouvrages avec écran**, le plus souvent plan. Ils assurent le soutènement par flexion et leur stabilité d'ensemble est obtenue par butée de la partie en fiche et par ancrages de la partie supérieure. Cette catégorie se décompose en deux :

- rideaux-plan de palplanches métalliques à module ancrés en tête par des tirants ou par une plate-forme sur pieux (il y a plusieurs conceptions avec soutènement partiel, assurant la transition avec les ouvrages sur pieux),

- parois en béton armé moulées dans le sol, ancrées par des tirants forcés précontraints ou classiques, ou par des voiles en retour ;

- les **ouvrages fondés sur pieux ou sur piles**. Ils n'assurent pas la fonction soutènement des terres, lesquelles sont limitées sous l'eau par un talus en équilibre. Pour assurer la fonction de liaison entre navire et terre, une plate-forme sur pieux ou piles, généralement en béton armé, recouvre le talus, sur toute la longueur du front d'accostage (dans le cas d'un quai continu) ou sur la partie centrale seulement (dans le cas d'un appontement isolé) ;

- les **ducs-d'Albe**. Conçus pour absorber les efforts d'accostage et d'amarrage, on distingue :

- les ducs-d'Albe rigides,
- les ducs-d'Albe souples.

Chaque catégorie de structure est illustrée par un ou plusieurs exemples significatifs ; la conception générale en est décrite et la méthode de calcul spécifique explicitée. Les avantages et limites d'emploi de chacune sont indiqués.

2.3.1 Ouvrages massifs

2.3.1.1 Quelques types d'ouvrages massifs

Il existe de nombreuses variantes d'ouvrages d'accostage massifs ; en raison de leur conception assez simple dans leur principe (ouvrage-poids), ils ont été utilisés depuis longtemps, et le sont encore très fréquemment.

2.3.1.1.1 Quais-poids exécutés en place

Ce type d'ouvrage est construit à sec, c'est-à-dire en site terrestre (avant dragage du bassin) et à l'abri des venues d'eau, dans une tranchée de construction, grâce à une technique adaptée à la perméabilité du sol en place : autrefois à l'abri d'un caisson à air comprimé, maintenant par rabattement de nappe ou emploi de batardeau. Autrefois constitués d'une maçonnerie de pierre, ils sont aujourd'hui en béton, généralement non armé (figure 18).

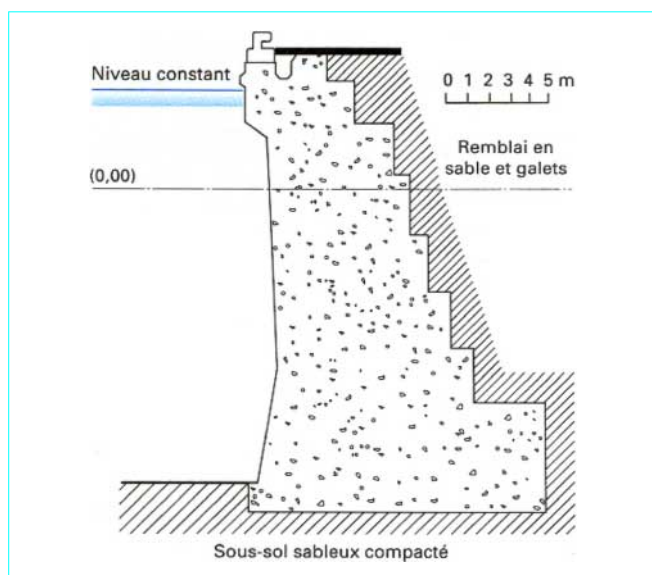


Figure 18 – Quai en maçonnerie de béton.
Kanaaldok, port d'Anvers (1963)

En raison des frais de terrassement et de mise hors d'eau de la tranchée, ce type d'ouvrage n'est valable que s'il peut être fondé au voisinage du fond futur du bassin, ce qui exige à ce niveau un sol de portance suffisante.

Sur sols meubles, il est nécessaire de prévoir une légère sur-profondeur du niveau de fondation par rapport au niveau futur du fond du bassin et de placer sur 5 à 10 m en avant de l'ouvrage une protection de fond en enrochements, contre les risques d'affouillement causés par les courants, l'agitation ou les remous dus aux hélices.

2.3.1.1.2 Quais-poids en blocs de béton armé préfabriqués

Le mur du quai est constitué de blocs de béton préfabriqués, évidés ou non, empilés sous l'eau les uns sur les autres, au-dessus d'une assise bien réglée ; les vides des blocs, s'ils existent, sont remplis de remblai, et l'ensemble est solidarisé par une poutre de couronnement en béton armé coulée *in situ* au-dessus du niveau de l'eau, et de préférence après mise en place des remblais en arrière (figure 19). Il est préférable que les blocs soient disposés en quinconce, ou imbriqués longitudinalement et verticalement pour mieux répartir les efforts locaux et éviter des tassements différentiels.

Ces ouvrages sont toujours réalisés en site nautique ; ils exigent des moyens de levage puissants mais ont l'avantage de réduire au minimum les travaux à exécuter sur place. Il est recommandé de mettre en place un cavalier en tout-venant rocheux en arrière du mur, à fort frottement interne pour réduire la poussée, et à granulométrie grossière pour éviter la fuite de fines au travers des nombreux joints du mur, notamment en bassin marnant.

Les conditions et précautions d'emploi des quais en blocs préfabriqués sont les mêmes que pour les quais-poids exécutés en place, avec cependant une moindre sensibilité des quais en blocs aux tassements différentiels. La hauteur maximale de ces types d'ouvrages est de l'ordre de 15 à 20 m.

2.3.1.1.3 Quais en caissons échoués ou havés

Les caissons sont constitués d'une ou plusieurs cellules verticales en béton armé ou précontraint, en général circulaires ; ils sont préfabriqués partiellement ou totalement dans une forme de radoub ou une cale de travaux, amenés en flottaison sur le site (parfois sur des

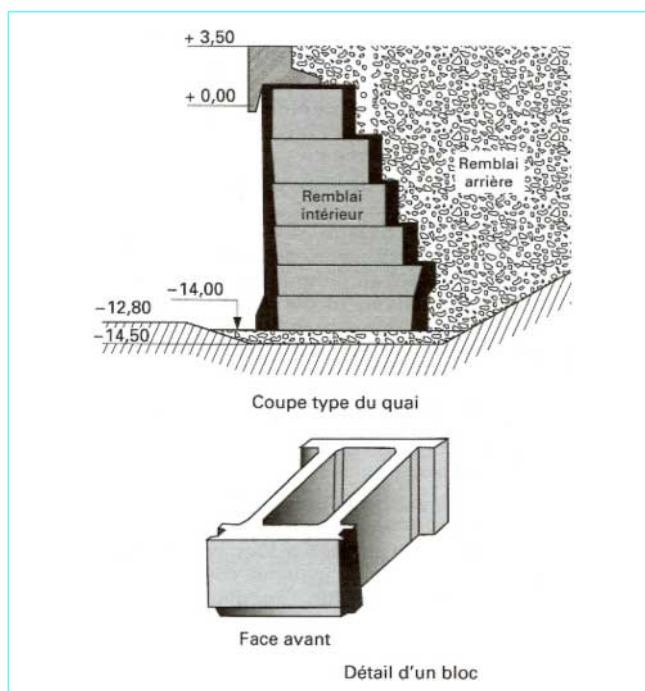


Figure 19 – Quai du port de la Pointe des galets, La Réunion (1985)

distances de plusieurs kilomètres) et disposés en continu sur l'alignement du quai, puis remplis de sable compacté par vibration ou de tout-venant, avant d'être sollicités par la poussée des remblais arrière.

La liaison entre caissons consécutifs ne doit pas laisser passer les éléments fins du remblai : cela peut être obtenu en coulant sous l'eau du mortier de ciment dans une gaine verticale souple (toile par exemple, cf. article Béton hydraulique. *Mise en œuvre* [C 2 230] dans ce traité), disposée entre des butées latérales solidaires des caissons. Les caissons sont enfin, après stabilisation, couronnés par une poutre continue en béton armé, formant poutre d'accostage.

Les caissons peuvent aussi être mis en place écartés les uns des autres, pour constituer un front d'accostage discontinu et servir de support à une plate-forme nervurée en béton pour la circulation des engins de manutention.

Les caissons munis d'un fond sont en général échoués à un niveau voisin du fond du bassin, leur base étant posée sur une assise en bons matériaux, réglée sous l'eau, après clapage dans une souille draguée. C'est le cas du quai des Amériques au Havre (figure 20), pour lequel le rapport du diamètre des caissons (24 m extérieurement avec parois minces de 50 cm d'épaisseur) à la hauteur du quai (24 m), valant 1, est particulièrement important pour ce genre d'ouvrage ; cela résulte de l'écartement de 21,5 m entre les rails de roulement des portiques de manutention des conteneurs et de l'option retenue d'appuyer la poutre support du rail arrière sur les parois cylindriques des caissons, avec des portées continues de l'ordre de 12 m.

Si le sol de bonne capacité portante se trouve assez bas par rapport au fond du bassin, l'échouage du caisson à ce niveau conduit à augmenter sa hauteur et à draguer une souille de volume très important. Il est souvent plus économique de conserver sa hauteur et de l'échouer sur un sol de substitution. Si le bon sol est très profond, on peut préférer augmenter la hauteur du caisson et, sans fond, le descendre par havage au travers des couches de mauvais sol, jusqu'au bon niveau de fondation, mais le havage est délicat et coûteux.

2.3.1.1.4 Quais en voiles de béton armé, raidis, sur semelle

La figure 21 représente un ouvrage de ce type, de hauteur 14 m (quai à Gand). Il s'apparente à un quai continu en caissons cylindriques échoués dont le radier serait conservé, la partie arrière supprimée, la partie avant aplanie et les parties latérales transformées en contreforts.

Ils sont en général construits en place dans une souille asséchée, ce qui implique un site terrestre. Cependant, un quai de ce type de 12 m de hauteur a été construit à Tunis-La Goulette en 1965-66 par éléments préfabriqués, mis en flottaison puis basculés pour l'échouage.

2.3.1.1.5 Quais en gabions de palplanches plates

Ils sont constitués par des palplanches métalliques plates, battues verticalement, et assemblées sous forme de piles circulaires ou d'enceintes gabionnées (figure 22). Ces gabions peuvent être isolés pour former un front d'accostage discontinu, ou être jointifs pour constituer aussi le soutènement d'un remblai arrière.

Dans ce dernier cas, la partie arrière du gabion ne joue qu'un rôle d'ancrage du rideau avant et sa hauteur peut être réduite (profil en seuil à charbon).

Les parois ne supportent pas de flexion, mais seulement des efforts de traction horizontale qui exigent un agrafage de résistance adaptée à la poussée intérieure et au diamètre.

Ce type de quai est plus léger qu'un quai en caisson de béton armé et s'adapte mieux aux tassements ; sa grande déformabilité peut être gênante. Il est plus compétitif en site terrestre, pour des quais de hauteur moyenne.

2.3.1.2 Méthode de calcul des ouvrages massifs

2.3.1.2.1 Stabilité d'une tranche de quai

Considérant une tranche de quai comme monolithique, il s'agit, en choisissant la combinaison d'efforts appliqués à l'ensemble de cette tranche, la plus défavorable pour l'effet à étudier, de déterminer, à l'état limite ultime ou de service, la réaction d'appui R sous la base de la tranche (composante normale N et tangentielle T , inclinaison δ de R sur la normale à la base) et de vérifier :

- la **stabilité au renversement** : elle est à vérifier à l'état limite ultime : au moins 10 % de la base doit rester comprimée ;
- la **stabilité au poinçonnement** : la contrainte de référence est souvent (méthode de Meyerhof, cf article *Murs de soutènement* [C 244] dans ce traité) prise égale à la contrainte moyenne sous une base réduite à la portion de base ayant pour centre de gravité le point de passage de la résultante d'appui ; la contrainte de rupture est définie au CCTG déjà cité (titre V du fascicule 62), avec notamment la minoration due à l'inclinaison de la charge. Le coefficient de sécurité recommandé, sauf disposition différente du marché, est de 2 à l'état limite ultime et 3 à l'état limite de service ;
- la **stabilité au glissement de la base** : à l'état limite ultime, le CCTG prescrit :

$$T \leq \frac{N \tan \varphi'}{F_G} \quad (\text{pour un sol sans cohésion})$$

avec φ' angle de frottement interne du sol (on admet en effet que les plans de glissement éventuels passent sous les rugosités de la base, bèches ou redans, au sein du sol). On peut adopter pour coefficient de sécurité $F_G = 1,2$ en état limite ultime.

Si le sol est cohérent, la cohésion peut être prise en compte sous la surface comprimée, mais avec prudence.

Dans ces calculs, la butée stabilisatrice ne sera prise en compte que pour la part qui est effectivement compatible avec les déplacements acceptables. Pour un caisson havé (sans fond) ou un gabion, les mêmes calculs sont applicables au fond fictif, à condition que le remblai intérieur soit bien compacté.

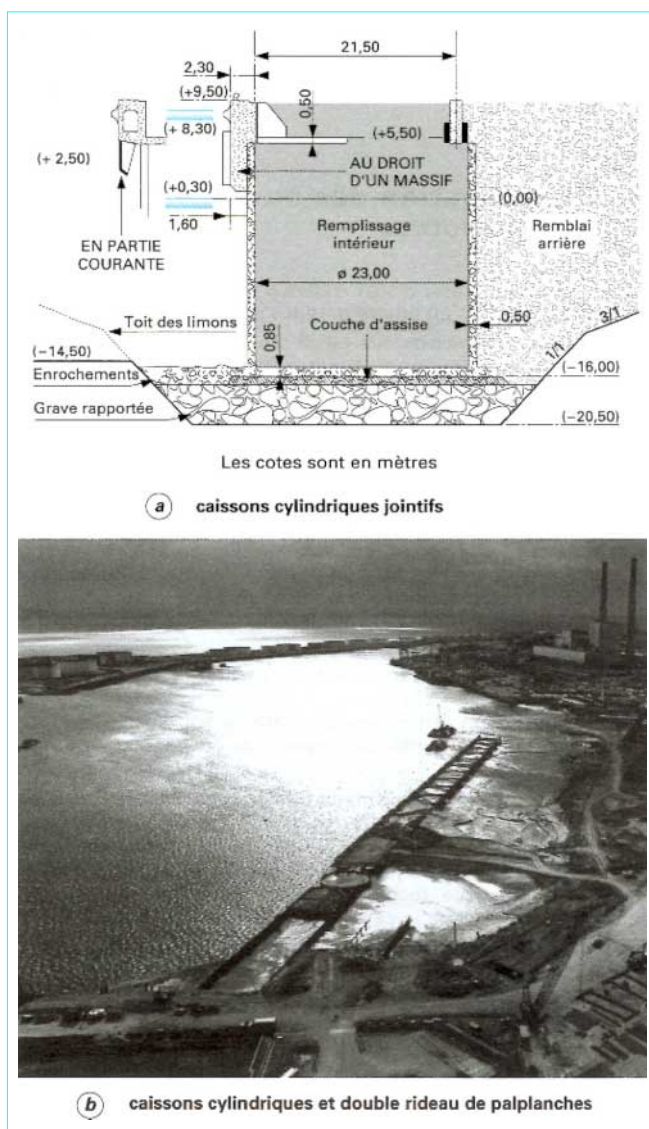


Figure 20 – Quai des Amériques au Havre (1990)

L'utilisation de caissons échoués ou havés est plus intéressante en site nautique qu'en site terrestre du fait de la réduction de hauteur à draguer ou à haver.

En raison du coût des moyens nécessaires à la mise en œuvre des caissons (charges fixes), cette technique n'est en général compétitive que pour les quais de grande hauteur (environ 20 m et plus, c'est-à-dire surtout en bassin marnant) et pour des quais de grande longueur.

À titre d'exemple récent de caissons havés, on peut citer le quai à conteneurs de 1 600 m construit à sec par le Port d'Anvers sur la rive droite de l'Escaut de 1987 à 1990 et qui utilise des caissons circulaires jointifs de 29 m de diamètre extérieur et 0,95 m d'épaisseur, descendus par havage de la cote (+ 3,00) à la cote (– 21,00), c'est-à-dire sur 24 m ; le profil du quai est tout à fait comparable à celui du Havre, puisque son couronnement est à (+ 9,00) et son pied dragué à (– 14,30).

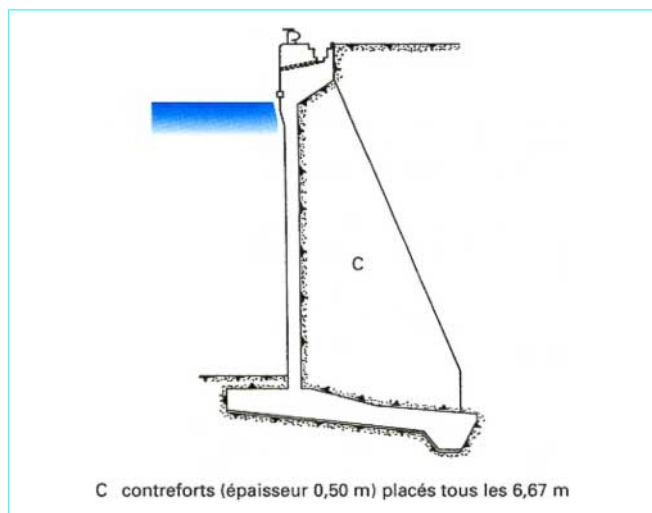


Figure 21 – Quai en béton armé

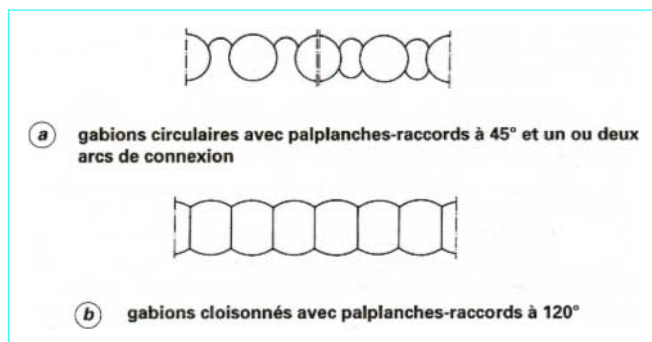


Figure 22 – Gabions de palplanches plates : cellules types

2.3.1.2.2 Stabilité vis-à-vis des grands glissements

Sauf en présence d'un pendage net des couches vers le bassin, le glissement est supposé s'effectuer selon des cercles.

La stabilité doit être assurée à l'état limite ultime pour tous les cercles passant sous l'ouvrage, en utilisant la méthode de Bishop (cf. article *Stabilité des pentes. Glissements en terrain meuble* [C 254] dans ce traité).

2.3.1.2.3 Stabilité interne

Il s'agit de vérifier en appliquant par exemple les règlements de calcul du béton armé ou d'autres matériaux constitutifs (se reporter aux articles correspondants) :

- la résistance des sections en béton armé des caissons et de la poutre de couronnement (en tenant compte en particulier des tassements différentiels éventuels des caissons) ;
- le non-glissement entre blocs préfabriqués superposés (entre parements talochés, des essais cités par M. Grenier ont donné un coefficient de frottement béton sur béton d'au moins 0,55) ;
- pour les quais en gabions, la résistance au cisaillement du massif de sol interne, la résistance des joints de l'enceinte, la stabilité vis-à-vis des phénomènes de renard, etc. (se reporter à l'article *Murs de soutènement* [C 244] dans ce traité).

2.3.1.2.4 Vérification globale

Une modélisation à trois dimensions par éléments finis de l'ensemble de la structure d'un caisson en béton armé, des couches de sol d'assise et des remblais arrière et intérieur (1 568 éléments au total) du quai du Port Rapide au Havre a permis de calculer, en considérant un comportement élastique du béton et du remblai interne, et un comportement élastoplastique pour les sols, les contraintes et déformations en tout point, et de déterminer les zones plastifiées pour diverses phases de construction et d'exploitation et ainsi d'optimiser le dimensionnement et les phases de travaux.

Cette méthode globale qui se développe pour les grands ouvrages est théoriquement la plus satisfaisante, mais a encore des progrès à réaliser. Les découpages en éléments doivent être plus fins dans les zones plus sollicitées (encastrement radier-jupe) ; la représentation graphique des résultats est essentielle pour leur interprétation ; des mesures précises *in situ* doivent être réalisées pendant et après l'exécution pour valider les calculs et améliorer les connaissances.

2.3.2 Ouvrages avec écran plan

La poussée des terres et les autres efforts appliqués sont transmis, par flexion de l'écran, au sol de fondation (fiche encastree ou simplement butée) et à un ou plusieurs ancrages dans la partie supérieure de l'écran.

Les premiers quais avec écran plan étaient toujours constitués par un écran en rideau de palplanches métalliques à module. Cette technique est encore largement utilisée, notamment en site nautique, mais elle est, depuis les années 70, fortement concurrencée par celle des parois moulées pour les quais à construire en site terrestre.

Ces deux types d'ouvrages de soutènement sont présentés (fonctionnement et méthodes de calcul) dans les articles *Murs de soutènement* [C244], *Parois moulées. Ancrages* [C 252] et *Pieux et palplanches* [C 140] du présent traité. Il sera donc donné ici uniquement un ou deux exemples de quais significatifs et récents utilisant ces techniques.

2.3.2.1 Quais en palplanches à module

Les ancrages sont le plus souvent constitués par des tirants passifs en acier disposés en une ou deux nappes, attachés sur un ouvrage d'ancrage constitué par un petit rideau arrière ou une palée de pieux inclinés ; les tirants peuvent parfois être actifs (c'est-à-dire pré-contraints) et forés.

L'ancrage du rideau peut aussi être assuré par une plate-forme horizontale en béton armé, ses pieux inclinés reprenant les efforts horizontaux ; c'est le quai danois (figure 23). Cette plate-forme, supportant une partie du remblai arrière et les surcharges d'exploitation, permet de réduire, par effet de chaise, la poussée sur le rideau de palplanches. On peut même, pour la réduire davantage, constituer un talus sous la plate-forme (quai creux) à condition de prévoir une pente suffisamment faible pour ne pas risquer de fuite de matériaux fins du sol derrière la plate-forme, ce qui induirait un effondrement local du terre-plein. Par économie supplémentaire, et pour réduire la dénivellation hydrostatique, on peut enfin « ouvrir » le rideau dans la hauteur du talus en arrêtant une partie des palplanches un peu au-dessus du niveau du pied du talus, de façon à permettre au quai creux d'être drainé à basse-mer.

Le rideau peut enfin être disposé en arrière de la plate-forme, et non devant ; ce type de quai danois assure la transition avec celui des quais sur pieux.

Les quais en palplanches conviennent aussi bien en site nautique qu'en site terrestre mais, dans ce dernier cas notamment, il faut s'assurer des possibilités et moyens de battage au niveau de fiche déterminé par le calcul.

En utilisant la gamme très étendue des profils de palplanches et de caissons (ou tubes) permettant d'obtenir des modules de résistance très élevés, on peut concevoir des quais en rideau mixte de

palplanches de grande hauteur (dépassant 20 m), mais, comme pour les quais en parois moulées, la présence d'une couche de sol butant mal au voisinage du niveau de dragage augmente beaucoup les moments de flexion et la hauteur totale du rideau. Les quais danois creux et ouverts sont particulièrement adaptés pour les bassins à fort marnage. Les quais à tirants exigent une emprise arrière plus importante que les quais danois.

Sensibles à la corrosion (en moyenne, on estime la réduction d'épaisseur d'acier à 0,1 mm par an), les rideaux de palplanches sont parfois protégés, avant battage, par des peintures bitumineuses, ou après, par un système de protection cathodique.

Les paires de palplanches doivent être pincées avant battage si le joint se trouve sur la fibre moyenne pour garantir l'absence de glissement qui réduirait l'inertie réelle de la paire. Pour les pièces d'ancrage (tirants, liernes, plaques d'appui, etc.), on se reportera aux catalogues des constructeurs.

Un autre exemple d'utilisation de palplanches est donné par la figure 24 : il s'agit d'un double rideau mixte (caissons et palplanches intercalaires) réalisé en prolongement d'un quai en caissons de béton armé échoués, sur une longueur d'environ 90 m où il n'était pas possible de draguer la souille d'échouage des caissons en raison de la présence d'ouvrages existants à proximité (cf. figure 20b).

2.3.2.2 Quais en parois moulées

Les quais en parois moulées planes sont constitués par un écran frontal plan en paroi moulée, buté ou encastré en pied, et ancré sur un ou deux niveaux par des tirants passifs ou actifs.

On a aussi construit, mais beaucoup plus rarement, des quais en parois moulées non planes utilisant partiellement l'effet de voûte.

L'utilisation de la paroi moulée exige un site de construction terrestre, qui peut être obtenu par remblaiement préalable, sous réserve qu'il soit suffisamment compact. Les couches dures ne gênent pas la perforation ; par contre, la présence d'une couche de galets très perméable exige des précautions (perte de boue, risque d'éboulements).

En bassin marnant, l'étanchéité entre les joints doit être particulièrement soignée pour éviter la fuite d'éléments fins sous l'effet des gradients d'écoulement.

La figure 25 concerne le quai de 450 m construit en 1992-93 dans le bassin du Pacifique au Havre pour la réception des grands navires porte-conteneurs ; sa réalisation a exigé un rabattement de nappe profond pour la pose des tirants.

Un quai de profil similaire mais de 28,50 m de hauteur libre a été construit en bassin marnant à Dunkerque (dragage à -20,00 et couronnement à +8,50) ; les moments de flexion dans la paroi sont très réduits grâce à un rabattement permanent de la nappe arrière à la cote -14,00, à l'abri d'une paroi étanche disposée parallèlement au front d'accostage à 134 m de celui-ci : l'épaisseur de la paroi frontale a pu être réduite à 1,22 m.

2.3.3 Ouvrages fondés sur pieux ou piles

2.3.3.1 Dispositions générales

Ces ouvrages constituent le stade ultime de l'évolution des quais creux du paragraphe précédent : ils ne remplissent plus la fonction de soutènement des terres, puisque le terre-plein en arrière de l'ouvrage est limité par un talus autostable et protégé de la houle par un revêtement d'enrochements, le raccordant avec le fond du bassin (figure 26).

La liaison entre navire et terre-plein est assurée par une plate-forme nervurée en béton armé supportée par des pieux en acier, verticaux ou inclinés (de 1/3 à 1/5). Lorsque cette plate-forme recouvre la largeur totale du talus de raccordement, l'ouvrage est appelé **quai** : il assure la fonction d'accostage grâce à la butée mobilisable par la tranche arrière de la plate-forme sur la crête du terre-plein (la butée

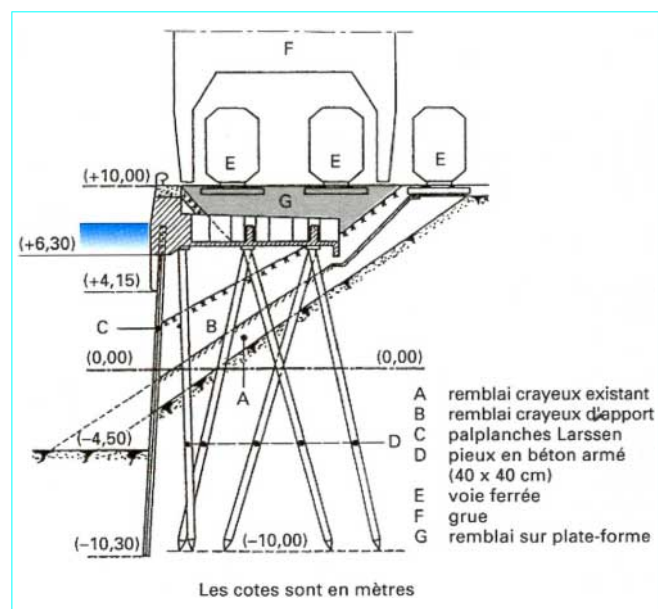


Figure 23 – Quai danois

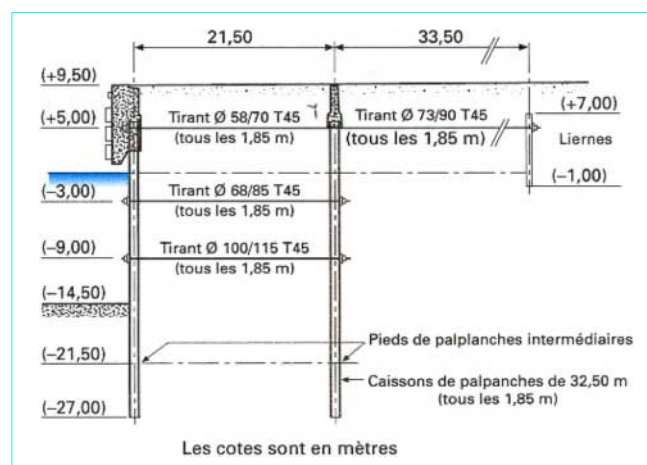


Figure 24 – Quai des Amériques au Havre. Double rideau de palplanches (1990)

peut être augmentée par un petit écran vertical en béton ou en palplanches qui est par ailleurs souhaitable pour empêcher le glissement de matériaux fins du sol en tête de talus) ; il assure aussi la fonction amarrage, les efforts étant alors transmis par la dalle soit à un ensemble de tirants reliés à un écran plan arrière, soit à des pieux inclinés.

Lorsque la plate-forme est isolée de la rive, c'est-à-dire ne recouvre pas toute la largeur du talus, et a une longueur limitée aux cales ou aux prises des navires, il s'agit alors d'un **appontement** : la plate-forme supporte les engins de manutention et éventuellement du stockage. Par contre, elle est rarement dimensionnée pour reprendre les efforts d'accostage (le front d'accostage est alors constitué par deux ducs-d'Albe au moins, séparés de la plate-forme et situés en avant de celle-ci) et les efforts d'amarrage (bollards disposés alors sur les ducs-d'Albe d'accostage et en crête du talus de part et d'autre de la plate-forme).

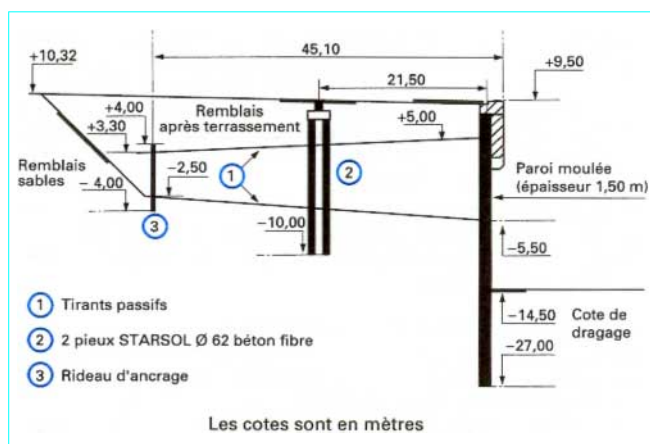


Figure 25 – Quai du bassin du Pacifique au Havre (1993)

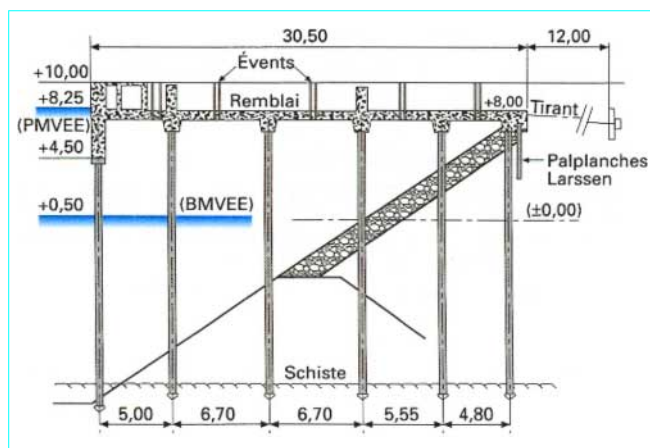


Figure 26 – Quai sur pieux au port de Brest

Pour améliorer l'efficacité des pieux inclinés vis-à-vis des efforts horizontaux, en les comprimant, et également pour réduire sur la dalle en béton armé de la plate-forme l'effet des fortes surcharges concentrées en les épanouissant, la plate-forme peut être recouverte par du remblai ; cette disposition permet en outre d'accroître l'inertie de la plate-forme vis-à-vis des chocs horizontaux et de faciliter la réalisation des caniveaux pour câbles et canalisations diverses.

Le front d'accostage qui protège les pieux contre les chocs doit avoir un niveau inférieur compatible avec les plus basses mers : cela est parfois difficile à réaliser si la dalle de la plate-forme est placée à un niveau élevé.

2.3.3.2 Choix des quais sur pieux ou piles

Ce type d'ouvrage est adapté quand il est à construire dans un site nautique et que les couches portantes se situent à plus de 10 m au-dessous du fond du bassin ; il convient également, à condition de prévoir des pieux en acier, faciles à recéper et à entourer, si le sol dur (rocher) est peu profond sous le fond du bassin mais présente une topographie mouvementée ou une pente importante vers le bassin.

La nature des couches supérieures (au-dessus du fond du bassin) a bien entendu une grande importance sur la pente du talus et, par suite, sur la largeur de la plate-forme. Un quai sur pieux ou piles est bien adapté à la proximité d'ouvrages existants en exploitation

et peut être aisément allongé par phases ; en effet, il ne nécessite pas d'ouvrages de soutènement en retour comme pour tous les autres types.

2.3.3.3 Dimensionnement et calculs

Pour une conception retenue *a priori* (trame des pieux, conditionnant l'ossature de la plate-forme : on retiendra de préférence une trame à larges mailles si le niveau de fondation est très bas), les étapes des calculs justificatifs sont les suivantes :

- modélisation d'ensemble (plate-forme, pieu, sol) soumis aux divers cas de charges verticales et horizontales ; en général un modèle bidimensionnel est suffisant ;
- calcul de fondations : justification du diamètre, longueur et épaisseur des pieux tubes ou piles, en fonction des sols (données pénétrométriques ou pressiométriques), par application du titre V du fascicule 62 de CCTG ;
- calcul de béton armé de la plate-forme, selon les règles BAEL (cf. articles spécialisés dans ce traité), avec condition de fissuration la plus contraignante ;
- stabilité au grand glissement.

2.3.4 Ducs-d'Albe

2.3.4.1 Description générale

Ce sont des ouvrages isolés servant à l'accostage et à l'appui des navires, ou à leur amarrage, ou remplissant ces trois fonctions. Ils sont en général disposés devant et de part et d'autre des appontements non accostables ou constituent un simple front d'accostage et d'amarrage. Ils sont soumis soit à une énergie de choc (de direction horizontale), soit à un effort d'appui ou de traction (de direction toujours assez voisine de l'horizontale), dont les intensités ont été calculées au paragraphe 2.2.

On distingue les ouvrages rigides et les ouvrages souples.

2.3.4.1.1 Ouvrages rigides

Un duc-d'Albe rigide est :

- soit un ouvrage-poids (caisson en béton armé rempli de sable ou gabion de palplanches plates) ;
- soit un ensemble d'au moins trois pieux métalliques inclinés, d'axes concourants et ancrés en tête dans un massif en béton ; ce dernier type d'ouvrage est en effet indéformable, car les pieux travaillent peu en flexion, mais surtout sous efforts normaux.

Si les ouvrages sont destinés à l'amarrage, ils sont équipés en tête de bollards ou crocs d'amarrage (figure 27). S'ils sont destinés à l'accostage, il faut les munir latéralement de défenses déformables capables d'absorber l'énergie maximale prévue, et celles-ci transmettent leur réaction à l'ouvrage ; en outre, le massif doit être assez large pour que le navire ne touche pas aux pieux inclinés par son bouchain.

Dans les deux cas, leur calcul ne pose pas de difficulté particulière (voir quai massif ou quai sur pieux).

2.3.4.1.2 Ducs-d'Albe souples (ou élastiques)

Ils sont le plus souvent constitués par un ou plusieurs pieux métalliques verticaux (caissons de palplanches ou tubes) encastrés en pied dans le sol de fondation, liaisonnés sans être encastrés en tête et supportant, selon leur rôle, à la partie supérieure des crocs ou bollards d'amarrage ou, latéralement en tête, un bouclier vertical recevant du bordé du navire le choc d'accostage (figure 28).

C'est la flèche élastique des pieux, travaillant en flexion comme une console verticale sous l'effet de la force croissante d'accostage appliquée au niveau du choc, qui absorbe l'énergie du choc, c'est-à-dire arrête le navire.

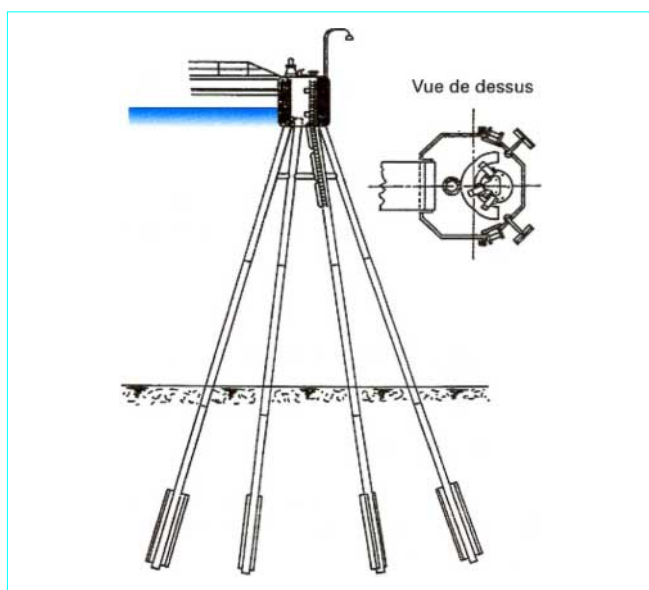


Figure 27 – Duc-d'Albe d'amarrage rigide
(port pétrolier de Wilhelmshafen, Allemagne)

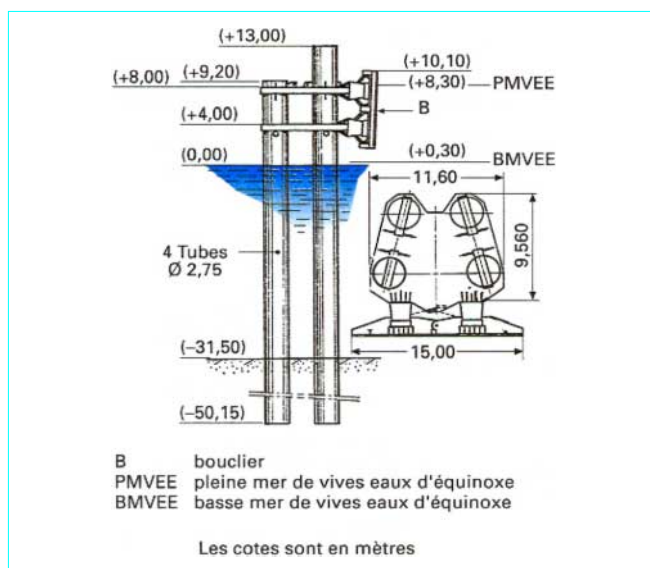


Figure 28 – Duc-d'Albe d'accostage multitubulaire souple

Souvent, des défenses en caoutchouc sont interposées entre le bouclier et les pieux pour transmettre l'effort d'accostage ; leur déformation sous cette force croissante absorbe une partie de l'énergie d'accostage ; en outre, ces défenses constituent une articulation pour le bouclier qui peut rester ainsi toujours parallèle au bordé du navire, et ce quelle que soit la déflexion des pieux.

À titre d'exemple, les ducs-d'Albe du poste n° 2 du terminal pétrolier d'Antifer, conçus pour l'accostage d'un navire de 540 000 t, ont une énergie admissible de 2 000 t · m. Cette énergie de projet a été déterminée à la suite d'essais d'accostage sur un modèle physique, en retenant une vitesse d'accostage de l'ordre de

0,22 m/s compte tenu du site semi-abrité (houle et courants réduits). Par application de la formule (1), cette énergie correspond à des coefficients $C_e = 0,78$ (avec $a = 52$ m et $k = 100$ m), $C_m = 1,7$ et $C_c = 1$.

Cette énergie est absorbée par la flexion de trois tubes de 2,75 m de diamètre et d'épaisseur variable (27 à 73 mm) en acier de 60 kg/mm² de limite élastique et par la compression de quatre amortisseurs tronconiques TC 200 de Kléber-Colombes.

2.3.4.2 Calcul des ducs-d'Albe souples

Il permet de justifier la section des pieux et leur fiche dans le sol, sachant que sous l'énergie d'accostage de projet, considérée comme une sollicitation ultime, donc très rare, il est possible de soumettre l'acier à une contrainte maximale σ de l'ordre de 80 à 90 % de sa limite élastique σ_e ; on utilise le plus souvent des pieux en acier à haute limite élastique, c'est-à-dire très flexibles, et donc capables d'absorber, à section donnée, une plus grande quantité d'énergie (l'énergie de flexion absorbable par une console est proportionnelle au carré de la contrainte maximale admise).

En ce qui concerne les efforts d'amarrage, plus aléatoires et fréquents, il importe d'être plus prudent dans le choix de la contrainte maximale de calcul ($\sigma = 2/3 \sigma_e$ en général).

2.3.4.2.1 Réaction du sol à l'accostage ou à l'amarrage

La méthode de calcul classique, présentée ci-après pour un sol pulvérulent homogène, est celle de Blum (on peut aussi utiliser la méthode de Brinch Hansen ou d'autres plus élaborées, basées sur la théorie élastoplastique des sols).

Dans l'hypothèse d'un monotube de diamètre b et de fiche $f = 1,2 f_0$ (figure 29), on considère que l'encastrement du pieu sollicité par un effort F appliqué à une hauteur ℓ au-dessus du fond A (l'effort F étant soit l'effort final correspondant au choc d'accostage, soit l'effort d'amarrage), est assuré par une butée B sur la hauteur f_0 (entre A et C) et une contrebutée s'exerçant sur la hauteur 0,2 f_0 au-dessous de C, mais supposée, par simplification de calcul, appliquée en C.

L'expérience a montré que le prisme de butée, incliné à $\pi/4 + \varphi/2$ selon la théorie de Coulomb, s'épanouit latéralement comme indiqué sur la figure, sur une largeur égale à $b + f_0$ au niveau de A ; cela conduit à une butée totale (cf. article *Ouvrages de soutènement. Poussée et butée* [C 242] dans ce traité) :

$$F_p = F_{p1} + F_{p2} = K_p \gamma \left(\frac{b f_0^2}{2} + \frac{f_0^3}{6} \right)$$

F_{p1} , correspondant à la largeur b , est appliqué à $f_0/3$ au-dessus du point C ;

F_{p2} , correspondant à l'épanouissement, est appliqué à $f_0/4$ au-dessus du point C.

On adopte selon Coulomb : $K_p = \tan^2 (\pi/4 + \varphi/2)$ en sol pulvérulent d'angle φ et l'on prend habituellement (mais tous les experts ne s'accordent pas sur ce point) pour valeur de γ le poids volumique total (eau + sol) pour un accostage (effort rapide) et le poids volumique déjaugé pour un effort d'amarrage (plus lent et permanent, c'est-à-dire avec dissipation de la pression interstitielle).

2.3.4.2.2 Relation d'équilibre

L'équilibre des moments en C, dus à la butée et à l'effort en tête F , conduit à l'équation :

$$\frac{24F}{K_p \gamma} = f_0^3 \left(\frac{f_0 + 4b}{f_0 + \ell} \right) \quad (2)$$

2.3.4.2.3 Calcul dans le cas de l'accostage

Avec les moyens manuels de calcul, plusieurs simplifications sont nécessaires pour aboutir, mais elles conduisent à un dimensionnement approché satisfaisant.

L'effort maximal F en fin de choc conduit à une déflexion maximale y au niveau du choc (arrêt du navire avant son renvoi) qui peut être calculée en assimilant le tube à une console parfaitement encastree de portée :

$$\ell' = \ell + 0,78 f_0 \text{ (point d'encastrement fictif pour la flèche)}$$

$$d'où : \quad y = \frac{F \ell'^3}{3EI} \quad (3)$$

avec I inertie du tube, supposée constante,
 E module d'élasticité de l'acier.

Au cours de cette déformation élastique, représentée par le diagramme de la figure 30, l'énergie T absorbée par le tube correspond à l'aire du diagramme effort-déformation et doit être égale à l'énergie d'accostage de projet W [formule (1)], soit :

$$T = \frac{1}{2} Fy = W \quad (4)$$

En outre, la section du tube doit être telle qu'au droit du moment maximal M_{\max} la contrainte ne dépasse pas la valeur admissible σ ; la valeur de M_{\max} peut être approchée en considérant une longueur de console fictive pour le moment maximal donnée par :

$$\ell_1 = \ell + 0,45 f_0$$

$$d'où : \quad M_{\max} = F \ell_1 \quad (5)$$

En pratique, partant des données sur le sol et des valeurs retenues pour ℓ , W et σ , on choisit la flexibilité désirée pour le duc-d'Albe en se fixant y , en fonction des conditions d'exploitation. L'équation (4) permet d'en déduire F .

En se fixant une valeur de b vraisemblable, on calcule f_0 à l'aide de l'équation (2), puis I par l'équation (3), donc l'épaisseur e du tube (puisque $I = \pi b^3 e/8$) ; on modifie b , si l'épaisseur obtenue n'est pas satisfaisante. On calcule enfin la contrainte maximale dans la section la plus sollicitée dont le moment M_{\max} est donné par (5). Si cette contrainte est éloignée de σ , on ajuste en une ou deux itérations la valeur de b pour approcher σ .

Notes importantes

■ Le duc-d'Albe doit être calculé pour la valeur de ℓ minimale (choc à basse mer) car la théorie montre que c'est dans ce cas que, pour un tube et un sol donnés, l'énergie absorbable par l'acier est la plus faible.

■ Quand l'angle de frottement φ du sol est connu avec une fourchette d'incertitude φ_{\min} et φ_{\max} , la fiche f_0 doit être déterminée en retenant $\varphi = \varphi_{\min}$, mais les caractéristiques des tubes doivent résulter du calcul fait en retenant $\varphi = \varphi_{\max}$, car c'est dans cette hypothèse que le tube est le moins flexible, car encastré plus haut.

■ Si une défense en caoutchouc est interposée devant le bouclier ou entre le bouclier et le tube, l'effort F fléchissant le tube et déformant la défense est le même, mais les énergies et déflexions de chacun, résultant de l'effort F , s'ajoutent :

$$T_{\text{totale}} = T_{\text{tube}} + T_{\text{défense}}$$

$$Y_{\text{totale}} = Y_{\text{tube}} + Y_{\text{défense}}$$

2.3.4.2.4 Calcul dans le cas de l'amarrage

Ce calcul s'applique également au cas du navire accosté et plaqué par le vent ou le courant sur les ducs-d'Albe.

L'effort d'amarrage F doit être pris au niveau maximal où il peut physiquement agir (ℓ maximal). On dispose des équations (2) et (5) où les caractéristiques du sol, ℓ , F et σ sont données *a priori* : les inconnues sont f_0 et la section du tube (b et e). On peut déduire des équations (2) et (5) deux des inconnues après s'être fixé la troisième.

2.4 Entretien et réparations. Transformations des ouvrages

2.4.1 Entretien et réparations courantes

Comme pour tous les ouvrages d'infrastructure ou de superstructure, les ouvrages d'accostage doivent faire l'objet d'un suivi et d'un entretien préventif d'un niveau optimal pour que la somme de leur coût annuel et du coût annuel de l'entretien curatif qui lui correspond soit minimale. Ce total minimal serait de l'ordre de 2 % du coût de construction pour un quai, d'après une étude suédoise récente.

Des considérations autres qu'économiques peuvent également intervenir : sécurité des personnes, des navires, conséquences commerciales des indisponibilités, etc.

L'entretien doit toujours être pensé dès le stade de la conception.

Du point de vue de l'organisation, le bon entretien d'un ouvrage d'accostage exige l'existence d'un dossier d'ouvrage en trois parties :

- conception, construction ;
- état de référence (plans conformes, levés topographiques...) ;
- procès-verbal de visites régulières ; entretien, réparations.

Les moyens d'inspection sont très variés, selon les parties d'ouvrage : aspect visuel des parements (fissures, érosion, corrosion) et des accessoires (bollards, défenses et leur fixation, échelles, etc) ; mesures d'épaisseur de pieux-tubes, de palplanches ; contrôle géométrique et topographique (déformations, mouvements d'ensemble) ; suivi des écoulements d'eau, forages, contrôle d'affouillements devant le quai, etc. L'intervention de plongeurs avec caméra submersible est souvent nécessaire.

L'entretien courant porte le plus souvent sur :

- le rejointement des parements en maçonnerie ;
- le rescelllement des pierres de couronnement ;
- les organes d'amarrage et d'accostage ;
- la peinture ;
- la protection cathodique (anodes sacrificielles à remplacer...).

Des réparations peuvent être beaucoup plus importantes quand, par exemple, sont apparus des affaissements de terre-plein en arrière du quai résultant de pertes d'éléments fins du sol vers le bassin au travers de joints détériorés (entre blocs préfabriqués, entre caissons, entre panneaux de paroi moulée par exemple), notamment en bassin marnant sous l'effet du gradient hydraulique ; de même, si des mouvements du quai apparaissent, par exemple à cause du dysfonctionnement d'un drain ou filtre, qu'il faudra refaire, à moins de renforcer la stabilité du quai en ajoutant des ancrages en arrière (pieux de traction, tirants forés actifs ou tirants passifs...).

2.4.2 Transformations d'ouvrages

Les transformations les plus fréquentes ont pour objet d'accroître la profondeur en avant d'un ouvrage, cela s'appelle un **rempiètement du quai**. Il y a de nombreuses méthodes, plus ou moins adaptées selon les cas rencontrés. On peut par exemple :

- construire un appontement sur pieux en avant du quai sur la largeur du talus permettant de gagner le supplément de profondeur (cas d'un quai massif à fondation superficielle, figure 31a) ;
- construire un écran plan en palplanches devant le front d'accostage, sur la hauteur de l'approfondissement, pour retenir le talus existant sous la plate-forme d'un quai sur pieux (figure 31b). La crête de cet écran sous-marin ne doit pas constituer un risque de choc pour le bouchain des navires : quelques caissons de palplanches de ce rideau doivent être prolongés jusqu'au couronnement pour constituer le nouveau front d'accostage. Un ancrage arrière complémentaire du quai est souvent nécessaire ;
- réduire la poussée sur l'ouvrage existant (notamment quand il s'agit d'un écran plan doté d'une fiche suffisante) en construisant en arrière une dalle de décharge fondée sur pieux, de façon à compenser la réduction de butée en avant (figure 31c).

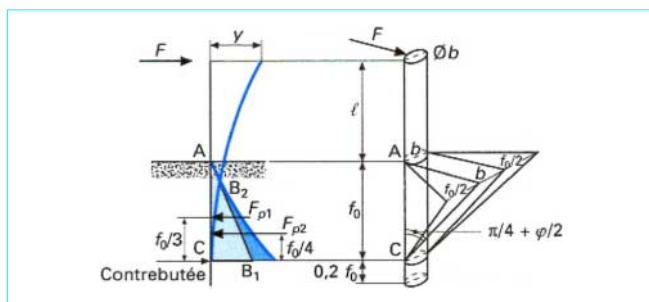


Figure 29 – Calcul d'un duc-d'Albe souple.
Déformation élastique et prisme de butée

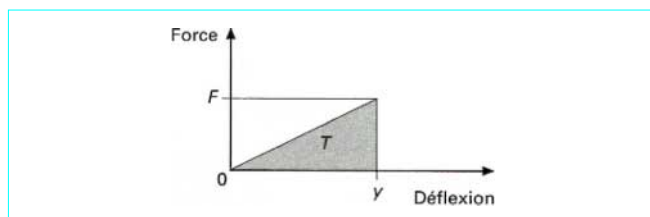


Figure 30 – Énergie T de déformation élastique

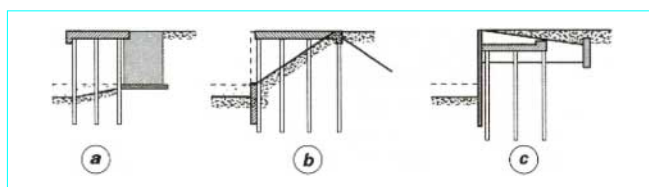


Figure 31 – Rempiètement de quais

Dans tous les cas, il convient de vérifier soigneusement la nouvelle sécurité aux grands glissements, après remplètement.

3. Outillage

3.1 Considérations générales

Lors de la visite d'un port, l'évolution en matière d'outillage est celle qui frappe le plus, avec la course au gigantisme. Cette dernière, si elle a été stoppée pour les pétroliers, est toujours présente en matière de navires porte-conteneurs dont la dernière génération ne peut plus franchir le canal de Panama et, dans une moindre mesure, pour les transporteurs de vrac secs, avec pour corollaire un accroissement de la taille et des cadences des matériels de manutention.

Pour répondre à la demande des armateurs, l'architecture navale a dû également évoluer vers la conception de navires de plus en plus spécialisés permettant, pour un trafic donné, la meilleure rentabilité de l'investissement, le meilleur service.

Ce sont les nouveaux navires à passagers, navires de croisières ou car-ferries, au luxe et à la taille croissants, les porte-conteneurs dits *Over Panamax* dont les derniers ne disposent même plus de

panneaux de cale de façon à accélérer les opérations de chargement/déchargement, les navires rouliers (fret et véhicules neufs), les vraquiers autodéchargeants ou maintenant les navires BiBo (*Bulk in, Bag out*), véritables usines flottantes qui chargent du sucre en vrac et délivrent à l'arrivée du sucre conditionné en sacs.

Ce sont toutes ces évolutions qu'un port doit suivre pour offrir les outils adaptés à ces différentes demandes et rester présent dans la compétition internationale. En effet, si un port donné est toujours le point de jonction entre deux types de transport : le maritime et le terrestre, il est de moins en moins, avec l'amélioration des communications intérieures, le passage unique entre le point d'expédition et le point d'arrivée.

3.2 Trafic des passagers

Le trafic des passagers a subi un lent déclin après la Seconde Guerre mondiale lié à la concurrence de l'aviation. Aujourd'hui, les grandes lignes transocéaniques ont disparu et seuls ont subsisté les car-ferries sur liaisons courtes (Baltique, Manche, Méditerranée...). Depuis quelque temps, on assiste à la réapparition des grands paquebots, non plus en tant que moyens de transport, mais comme lieu de loisirs le temps d'une croisière, et des moyens considérables pour l'accueil de ces nouveaux usagers ont dû être mis en place (Miami). Les compagnies de car-ferries elles-mêmes ont senti l'attrait de la croisière sur le public et en ont fait un argument de vente : la mini-croisière face à des moyens de transport concurrents (tunnel sous la Manche) et des efforts ont été faits quant à l'accueil et au confort des passagers.

Face à cette nouvelle clientèle, les ports ont dû, là également, évoluer.

3.2.1 Passerelles de transbordement

3.2.1.1 Passerelles pour piétons

Ce type d'ouvrage n'a pas subi d'évolution pendant de nombreuses années par suite de la disparition des grands paquebots de ligne.

Recevant du public, il bénéficiait seulement, par rapport à la passerelle classique, de quelques aménagements facilitant l'accès à bord (protection contre les intempéries, marches articulées conservant leur horizontalité quel que soit l'angle pris par la passerelle). Les passerelles étaient le plus souvent mises en place à l'aide d'un moyen annexe (grue de quai).

L'évolution de la clientèle, les comparaisons qui pouvaient être faites avec les moyens d'embarquement dans les aéroports, l'apparition de nouvelles législations, ont conduit les autorités portuaires à chercher à améliorer le service offert.

Les nouveaux ouvrages s'inspirent des réalisations pour l'aéroportuaire avec des liaisons directes par galerie avec la gare maritime et des rampes accessibles pour les handicapés.

Les principales différences concernent la mise en œuvre de dispositifs de sécurité permettant un passage quai-navire sans risque pour le public.

En effet, à la différence d'un avion, le navire ne conserve pas une position fixe pendant la durée de l'escale. Il est soumis au phénomène de la marée, mais également des courants, de la houle, du vent, qui peuvent l'entraîner au-delà de la zone desservie par la passerelle d'embarquement.

Un dispositif de suivi automatique est donc nécessaire et, pour éviter l'entraînement de l'ouvrage par le navire, le dispositif d'accrochage doit pouvoir échapper, avec en préalable le déclenchement d'une alarme sonore et visuelle et la fermeture automatique de barrières.

Les règles de calcul employées pour la réalisation de ce type d'ouvrage sont, en France :

- pour les **passerelles fixes**, le fascicule 61 du Cahier des Clauses Techniques Générales applicables aux marchés de travaux publics, titre II, chapitre II pour la définition des charges et titre V pour mener les calculs, complété des recommandations de la CECM (Convention Européenne de la Construction Métallique), en attendant la mise en application de l'Eurocode 3, pour la vérification à la fatigue ;
- pour les **passerelles mobiles**, les règles de la Fédération Européenne de la Manutention (FEM – section 1, 3^e édition) pour les classes de charpentes et de mécanismes aussi bien pour mener les calculs de résistance que pour la vérification à la fatigue.

3.2.1.2 Passerelles pour le transbordement direct des véhicules

Pour le transbordement des voyageurs se déplaçant à bord de véhicules routiers ou ferroviaires, les passerelles de liaison sont d'importants ouvrages, analogues à des ponts mobiles reliant le quai au navire. Leur longueur doit être suffisante, afin d'éviter de fortes pentes incompatibles avec le roulage du matériel ; une pente de 13 à 14 % est un maximum pour des véhicules routiers, et de 3 à 4 % pour le matériel ferroviaire.

Ces passerelles ont une articulation située sur le terre-plein. L'extrémité située du côté du plan d'eau doit pouvoir être maintenue en coïncidence avec le pont du navire. Le niveau de celui-ci est variable non seulement selon le type de navire, mais, pour une même unité, selon la marée.

Le déplacement vertical de l'extrémité de la passerelle peut être assuré par :

- un **ponton flottant** reprenant à la fois les charges engendrées par la passerelle elle-même, la charge roulante et la porte du navire. Ce ponton peut être ballastable ou non en fonction de l'adaptabilité exigée pour le poste à différents types de navires ;
- un **ponton flottant** ne reprenant que le poids propre de la passerelle. Après l'accostage, des tirants verticaux sont connectés entre le navire et le ponton. Les efforts dus aux charges roulantes sont alors repris par le navire (système très économique mais obligatoirement adapté à un type de navire, pas de polyvalence du poste) ;
- un **ensemble de levage mécanique** : treuils, vérins, crémaillère avec ou sans compensation du poids mort de la passerelle par des contrepoids.

L'appareillage du déplacement de la passerelle est porté soit par des pylônes latéraux, soit par un portique enjambant la voie ou les voies de circulation. Le tracé de ces portiques doit être étudié avec soin pour autoriser la réception de navires à étrave ouvrante ou levante, dont il convient de dégager le gabarit, quel que soit le niveau de la marée.

La liaison avec le navire pour un ouvrage non dédié à un trafic donné doit être assurée par la porte du navire qui remplit également la fonction de rampe d'accès en position abaissée. Le profil de l'extrémité de la passerelle doit être étudié pour permettre, dans la majorité des cas rencontrés, une bonne transition rampe-passerelle (la norme ISO 68.12 est dépassée en ce qui concerne la définition des courbures).

Pour les car-ferries, des dispositions particulières peuvent être adoptées par les compagnies pour accélérer les rotations des navires et permettre un accès aisé des véhicules (suppression de la rampe côté navire). La fonction est alors assurée par un avant-bec constitué de touches juxtaposées en extrémité de passerelle et manœuvrées hydrauliquement).

Ces dispositions retirent bien entendu de la polyvalence à l'outil et peuvent conduire à des transformations onéreuses en cas de modification de la flotte.

C'est ainsi que la mise en service du tunnel sous la Manche a conduit les compagnies maritimes à reconsidérer leur flotte en mettant en ligne des navires plus gros (2 000 passagers, 600 voitures)

à double pont desservis simultanément pour raccourcir la durée de l'escale (certains plus petits existaient déjà depuis plusieurs années).

Les ouvrages nouveaux à concevoir doivent donc permettre une desserte de navires disposant de deux rampes, soit situées dans un même plan horizontal, soit dans deux plans superposés avec une distance interpont ajustable pour avoir une certaine flexibilité. Cet ajustement est généralement réalisé à l'aide de vérins hydrauliques quel que soit le système retenu pour le mouvement principal.

Les règles de calcul sont les mêmes que pour les passerelles pour piétons. Les cas de charges à retenir sont fonction du type de trafic envisagé. Ne pas oublier cependant que l'embarquement des véhicules est ralenti au passage passerelle/navire et que, de ce fait, une file d'attente se crée inévitablement sur l'ouvrage.

3.2.2 Ouvrages à terre

L'accueil des passagers nécessite la présence à terre de gares maritimes. Ces structures ont évolué avec le changement de clientèle, les croisiéristes et les transports de masse par car-ferries (à la veille de l'ouverture du tunnel, le port de Calais a vu transiter près de 14 millions de passagers dans l'année).

Les gares maritimes sont maintenant constituées de bâtiments fonctionnels s'inspirant des aéroports. Pour les car-ferries, elles sont implantées au milieu de vastes parkings pour véhicules légers et poids lourds (§ 3.3.2.4 sur les terre-pleins).

Une gare maritime comprend :

- un **hall d'entrée ou d'arrivée** comportant toutes les installations nécessaires avant l'embarquement ou après le débarquement (bureaux des compagnies de navigation, bureaux de change, agences, bars, restaurants, etc.) ;
- un **hall de douane** pour la visite des bagages, équipé d'un banc de visite, et un hall plus petit pour les diverses formalités de police, contrôle des changes, etc. ;
- des **salles d'embarquement** ;
- des **galeries** reliant la gare maritime aux passerelles d'embarquement, généralement surélevées pour ne pas entraver la circulation des véhicules automobiles. Rampes accessibles aux personnes à mobilité réduite ou ascenseurs sont devenus la règle (à noter que, dans le cas de terminaux très importants comportant de nombreux postes d'accostage, le rapprochement des passagers piétons aux lieux d'embarquement peut être effectué par bus, comme à Calais) ;
- des **installations de distribution de bagages** ;
- des **installations annexes**, dans le cas des car-ferries, pour les formalités de police, de douane et d'enregistrement des véhicules et de leurs passagers (aubettes avec barrières et bureaux déportés).

3.3 Trafic des marchandises diverses

Comme indiqué au paragraphe 3.1, les moyens de manutention sur les ports ont dû énormément se diversifier pour suivre l'évolution et la spécialisation des navires en fonction du trafic considéré.

Dans leur description, on distinguera les engins de transbordement utilisés pour les opérations de chargement et de déchargement des navires, les engins utilisés à terre pour approcher ou évacuer la marchandise de la zone bord à quai et les ouvrages à terre destinés au stockage temporaire de la marchandise.

3.3.1 Moyens de transbordement

Le transbordement de la marchandise peut être assuré par le navire lui-même à l'aide de moyens embarqués ou par des installations à terre, voire des engins flottants.

Ces trois cas seront décrits dans les paragraphes suivants en distinguant pour les moyens à terre la manutention horizontale et la manutention verticale. Cependant, la tendance à l'accroissement de la masse des charges unitaires a pour conséquence directe une remise en cause des moyens de manutention embarqués sur navire. Ceux-ci disparaissent (cas des gros porte-conteneurs ou vraquiers) ou au contraire changent de nature et offrent des capacités de levage beaucoup plus importantes.

3.3.1.1 Engins de bord

Tous les cargos classiques, avant l'avènement du conteneur, étaient équipés de moyens de transbordement embarqués.

Si les ports européens disposaient généralement de grues à terre permettant des cadences plus élevées, les mâts de charge étaient utilisés sur les autres continents, y compris aux États-Unis.

En effet, la politique d'équipement portuaire de certains pays (sur la côte occidentale d'Afrique, seuls deux ports, Lagos et Abidjan, sont équipés de moyens lourds de déchargement de conteneurs) ainsi que des trafics faibles en volume annuel, qui ne justifient pas un investissement permanent important, peuvent conduire encore aujourd'hui à des moyens de manutention embarqués sur les navires.

Les mâts de charge classiques ne sont plus guère présents sur les navires conventionnels sauf sur certains grumiers avec des forces de levage de 15 à 20 t ou sur des navires spécialisés dans le transport de colis lourds avec des mâtures qui s'apparentent plus à des bigues, l'une située à l'avant et l'autre à l'arrière, dégageant entre elles un vaste espace pour recevoir les charges.

L'utilisation combinée des deux bigues permet des mises à bord de colis pouvant atteindre 500 à 600 t. Dans certains cas, en plus de systèmes de ballastage puissants, des stabilisateurs prenant appui sur le quai sont mis en place pour éviter la gîte du navire lors de l'embarquement de la charge.

Pour une plus grande productivité de la manutention, les mâts de charge ont laissé la place à des grues de bord réparties entre les cales.

L'apparition du conteneur a entraîné un accroissement de la puissance des grues embarquées qui atteignent maintenant 600 à 800 t · m avec possibilité de doubler cette capacité par la pratique du jumelage de deux engins en mode automatique selon le principe du « maître-esclave » ou en manuel.

Sur certains navires de taille moyenne, pour limiter l'investissement mais également pour optimiser l'espace disponible (4 à 5 m peuvent être perdus entre les cales dans la configuration précédente), une seule grue est embarquée. Celle-ci est montée sur un portique se déplaçant le long du bordé du navire et dessert ainsi l'ensemble des cales. Inconvénient : un seul moyen de déchargement sur le navire, d'où des cadences de manutention limitées.

Il convient de noter également, dans la même catégorie de matériel, des portiques avec avant-bec déployable au-dessus du quai et chariot pour la manutention de lots homogènes (bois sciés, bobines ou pâte à papier).

Il faut enfin citer, dans ce paragraphe, les navires de la société Dock Express et les navires porte-barges.

Les premiers nommés sont spécialisés dans le transport de charges lourdes ou volumineuses, chaque unité regroupant plusieurs types de moyens de manutention. Véritables docks flottants pourvus d'une étrave et d'une porte arrière, ils s'immergent pour prendre dans leur cale des matériels flottants (drague, remorqueur, péniche, etc.) et sont équipés de deux portiques de 600 t unitaires se déplaçant sur les murailles du navire qui se prolongent à l'arrière par une partie en encorbellement. La porte arrière elle-même peut être utilisée comme rampe pour l'embarquement de fret roulant.

Enfin, la partie en encorbellement (25 m environ) sert également au chargement direct de colis volumineux, dont en particulier les gros portiques de manutention portuaire à la manière d'un chariot élévateur : après ballastage, le navire se présente arrière au quai et soulève la charge par déballastage. Celle-ci est ensuite ripée à l'intérieur du navire et la porte refermée. La manœuvre inverse a lieu au déchargement.

Les navires porte-barges, apparus au milieu des années 70, connaissent actuellement une certaine désaffection. Ils répondaient en partie à une préoccupation militaire d'assurer des transports de matériels dans des zones aux infrastructures inexistantes ou détruites.

L'idée de départ, née aux États-Unis, est de remplacer les conteneurs par des barges standardisées de 600 à 800 t. Celles-ci sont stockées dans des navires spécialement conçus à cet effet. Le transfert navire/mer est assuré par un portique parcourant l'ensemble du pont du navire et déposant la barge à l'arrière de celui-ci, ou par une plate-forme élévatrice venant soulever la barge jusqu'à un des ponts de stockage sur lequel elle est ripée horizontalement.

La barge, une fois débarquée, pouvait alors être déchargée à l'aide des moyens mobiles relativement légers ou mise en convoi et acheminée en amont sur les fleuves.

Du point de vue économique cependant, le système s'est heurté à la nécessité de disposer de cargaisons en lots homogènes importants. Aussi, la plupart des navires ont-ils maintenant été retirés du service et certains mis sous cocon aux États-Unis à des fins stratégiques.

3.3.1.2 Manutention horizontale

Il s'agit des passerelles décrites précédemment (§ 3.2.1.2) qui permettent à la fois le transbordement des voyageurs se déplaçant à bord de véhicules routiers ou ferroviaires, le transbordement des marchandises placées à bord de camions, remorques etc., mais aussi des moyens propres aux navires à rampes arrière, latérale ou 3/4 arrière qui permettent de s'affranchir d'installations portuaires complexes, un retour de quai dans le premier cas, un simple linéaire de quai dans les deux autres étant suffisants pour assurer la manutention pour peu que les phénomènes de marées soient peu importants.

Si ce système fut très largement utilisé au départ sur les liaisons courtes (transmanche, transbaltique, transméditerranéenne) avec des navires de moyen tonnage, il s'est étendu maintenant aux lignes desservant les pays en voie de développement avec des unités transocéaniques de 15 000 t et plus, dotées de rampes généralement 3/4 arrière, disposant d'une force portante de plusieurs centaines de tonnes et desservies par des chariots élévateurs de 30 t de force de levage et plus, propres au navire et permettant indifféremment l'embarquement de fret conventionnel (caisses, conteneurs) et de fret roulant, le coût d'investissement initial supérieur étant compensé par une plus grande polyvalence et par une exploitation plus régulière en s'affranchissant des problèmes de matériel pouvant être rencontrés dans ces pays.

La manutention horizontale est bien sûr largement utilisée pour l'embarquement et le débarquement de véhicules neufs sur des navires, véritables parkings flottants, pouvant accueillir plus de 6 000 véhicules.

3.3.1.3 Manutention verticale

La révolution en matière de transport au milieu des années 60 est venue de la généralisation du conteneur, héritier direct du cadre de déménagement, mais sous une forme normalisée, permettant ainsi un intermodalisme intégral.

En matière de transit portuaire, cela s'est traduit par une profonde mutation de l'outil dont les chiffres figurant au tableau 5 en sont les témoins.

Tableau 5 – Évolution de la manutention verticale au port du Havre

	1969	1991
Nombre de grues classiques	180	40
Nombre d'heures/grue/an	1 600 h	130 h
Nombre de portiques à conteneurs	2	20
Nombre d'heures/portique/an	1 000 h	1 800 h
Tonnage total en marchandises diverses	3,45 Mt	12,14 Mt
— dont conteneurs	0,4 Mt	8,77 Mt

Pour les ports, et indépendamment de l'intermodalisme déjà évoqué, les avantages propres à ce type de conditionnement sont très importants :

- possibilité d'une mécanisation poussée de la manutention, entraînant une réduction des effectifs et une facilité du travail de la main-d'œuvre portuaire ;
- accélération des cadences de manutention ;
- augmentation de la masse volumique des colis, d'où une meilleure utilisation des surfaces de hangars et terre-pleins, et du volume des cales des navires ;
- diminution des sujétions de placement et d'arrimage de la cargaison dans les cales ;
- meilleure sécurité et protection pour la marchandise (vols, dégradations dues aux manipulations multiples).

Certains trafics très spécialisés, par l'adoption de techniques permettant d'accroître la productivité, ont su présenter une alternative économique à la conteneurisation, ce sont :

■ les trafics de fruits :

- en conditionnement carton grâce à la mise en œuvre de moyens de manutention continue : portiques équipés de balancelles, bande à poches ou tapis hélicoïdaux avec une protection tous temps au-dessus du panneau de cale et entre le navire et le quai, réseau de bandes transporteuses, palettiseuses automatiques sous hangar pour l'acheminement terrestre ;
- en conditionnement palette dès la production avec une manutention à la grue par 4 palettes à la fois et, maintenant, à l'aide d'engins spécialisés pourvus également d'une protection tous temps déchargeant entre 150 et 200 palettes à l'heure de façon automatique selon le principe du carrousel, du double chariot de 3 à 4 palettes (l'un à bord en cours de chargement de façon manuelle, l'autre à terre avec transfert manuel ou automatique des palettes) ou de la balancelle ;

■ le trafic de sacs :

- ce type de trafic subsiste car il y a toujours une demande de la part des pays en voie de développement qui ne disposent pas de moyens lourds de déchargement dans leurs ports et préfèrent recevoir des charges unitaires faciles à répartir. Les moyens d'embarquement ont dû cependant être adaptés pour rechercher le coût de main-d'œuvre minimal avec comme solution ultime les navires BiBo évoqués au paragraphe 3.1 pour lesquels le chargement s'effectue en vrac avec un conditionnement en sacs à l'arrivée avant débarquement.

Les autres méthodes qui assurent des rendements performants sont :

- la technique du préélingué qui permet, à l'aide d'un palonnier, de transférer en un seul cycle un demi-wagon de sacs à bord (20 t environ) tant en sacs de 50 kg que pour des « big bags » de 2 t unitaires ;
- l'utilisation, pour des sacs de 50 à 60 kg, de portiques spécialisés reliés par des bandes transporteuses à la salle d'ensachage située sur le site même et distribuant en continu, à l'intérieur de la

cale du navire, les sacs qui n'ont plus qu'à être guidés manuellement au moment de la chute pour assurer un bon arrimage de la cargaison.

Ces engins comportent une flèche orientable ou télescopique avec bande transporteuse, une colonne verticale supportant une goulotte hélicoïdale et pourvue, à la base, d'une sole distributrice orientable et extensible pour répartir les sacs dans la cale.

Les cadences obtenues dans ce cas sont de 3 000 sacs à l'heure.

La rentabilité de ce type de manutention n'a pu être obtenue que par une automatisation poussée de l'opération ou par un accroissement important de la charge manutentionnée par cycle, et il n'est donc plus concevable en matière d'investissement dans des grues classiques de commander des engins ayant des caractéristiques inférieures à 600 t · m (§ 3.3.1.3.1).

3.3.1.3.1 Grues de quai

Ce sont des engins mobiles à flèche inclinable et orientable et, en général, relevable en charge. Elles sont équipées pour réaliser la translation horizontale du colis pendant le relevage de la flèche. La partie tournante est montée sur un portique mobile sur un chemin de roulement parallèle au front d'accostage.

Comme indiqué précédemment, leur nombre a tendance à diminuer dans les ports, les engins de faible puissance étant les premiers concernés par cette disposition.

Les commandes actuelles ne portent plus que sur des engins de 600 t · m minimum (30 t à 20 m, 20 t à 30 m) jusqu'à, pour certaines grues automotrices portuaires, 1 200 t · m.

À titre d'exemple, les caractéristiques de grues sur rails et sur pneus récemment acquises par le port de Rouen sont indiquées dans le tableau 6.

Tableau 6 – Caractéristiques de grues du port de Rouen

	Grue sur rails		Grue sur pneus	
Force de levage	12 t	35 t	21 t	44 t
Portée	47 m	23 m	47 m	33 m
Course de levage au-dessus du quai	30 m		30 m	
Vitesse de levage à vide	2 m/s		1,5 m/s	
Vitesse en charge maximale	0,5 m/s		0,45 m/s	
Vitesse d'orientation (fonction de la portée)	1,2 à 2 tr/min		1,35 tr/min	
Vitesse de relevage de flèche	1,2 m/s		1 m/s	
Vitesse de translation	0,5 m/s		2,2 m/s	
Masse à vide	460 t		360 t	

On assiste depuis quelques années à un certain engouement pour les grues sur pneus qui ont tendance à supplanter les grues sur rails (figure 32).

Au départ, il s'agissait, sur des quais équipés de grues sur rails de faible capacité, mais permettant des cadences élevées sur des trafics de marchandises diverses, d'assurer la manutention des quelques conteneurs qui pouvaient être chargés en pontée sur des navires classiques.

Il était hors de question, pour des raisons économiques, d'équiper chaque quai d'un moyen lourd sur rails, compte tenu du faible taux potentiel d'utilisation de ces engins prisonniers de postes déterminés. La solution naturelle consistait donc à mettre en place un engin mobile qui puisse s'intercaler entre les moyens classiques pendant un temps donné pour être ensuite transféré sur un autre site.



Figure 32 – Grue Gottwald 1 500 t · m

Les premières grues mobiles portuaires ont été directement inspirées des grues routières.

Depuis, les contraintes spécifiques rencontrées sur les ports (vitesse, tenue à la fatigue, charge/portée, flèche à articulation haute, transfert horizontal de la charge), comme certaines tolérances dans d'autres domaines (gabarit, charge par essieu), ont conduit aux outils actuels nettement différenciés de ceux d'origine.

Ces engins offrent maintenant des conditions d'exploitation identiques aux grues sur rails et entrent en compétition directe avec ces dernières avec les avantages suivants :

- mobilité ;
- non-nécessité d'infrastructures particulières (voies de grue, alimentation électrique) ;
- taux potentiel d'utilisation accru.

Au chapitre des inconvénients :

- des descentes de charge importantes au niveau des stabilisateurs ;
- un temps de déplacement d'une cale de navire à une autre assez long (à cause de la manœuvre des stabilisateurs) ;
- une emprise en bord à quai qui condamne l'utilisation des voies ferrées (il existe cependant des grues sur pneus et portique par analogie aux grues sur rails) ;
- des coûts d'entretien supérieurs (groupe électrogène, système hydraulique de calage) ;
- des coûts en énergie (gas oil) supérieurs, mais en option il est possible de demander un enrouleur pour se brancher sur le réseau électrique lorsqu'il existe et qu'il est suffisamment dimensionné.

Le choix, essentiellement économique, entre les deux options est fonction de la quantification de ces différents critères.

Enfin, pour la manutention verticale de charges très lourdes (biens d'équipement), il peut être fait usage de bigues terrestres fixes. Là également, pour des engins qui peuvent dépasser 650 t de force de levage, la question d'un engin fixe moins coûteux, pour lequel le navire doit se déplacer, ou d'un ponton bigue beaucoup plus onéreux d'acquisition et d'exploitation, mais qui va servir le navire, doit se poser pour déterminer la solution qui présente le plus d'intérêt en fonction des flux de trafic à prendre en compte.

3.3.1.3.2 Portiques à conteneurs

Il s'agit d'engins relativement récents (1966) qui ont fait leur apparition dans les ports au moment où la conteneurisation des marchandises n'a plus permis l'utilisation des engins de levage portuaires traditionnels, devenus inadaptés au nouveau mode de conditionnement. L'ampleur du phénomène qu'est la conteneurisation est apparue lorsque, au concept du conteneur mode d'emballage, s'est substitué celui du conteneur engin intermodal permettant un transport de bout en bout sans manipulation intermédiaire des marchandises transportées (cf. article *Transport par voie navigable* [AG 8 130] dans le traité *L'entreprise industrielle*).

Au fur et à mesure du développement de la conteneurisation, les moyens de manutention entre le navire et le quai ont évolué, se sont diversifiés.

Au début, les premiers navires dédiés aux transports de conteneurs étaient équipés de leurs propres moyens de manutention embarqués sous forme de portiques roulant sur les bordés et desservant l'ensemble du pont.

Les premiers portiques de quai sont apparus rapidement aux États-Unis (PACECO) avec une force de levage limitée à 35 t.

Les treuils de levage et de direction étaient mus par des moteurs à courant continu alimentés par un groupe Ward-Léonard (génératrice entraînée par un moteur asynchrone).

La translation était assurée par des moteurs à courant alternatif avec démarrage par élimination de résistances rotoriques.

Depuis, l'évolution de ces engins de manutention, dans leur géométrie, a suivi celle des navires eux-mêmes. Les puissances installées ont augmenté avec l'accroissement des performances (800 kVA installés sur la première génération, plus de 2 000 kVA sur les derniers engins).

Les portiques sont directement alimentés en haute tension (5 voire 20 kV). Les groupes Ward-Léonard ont été remplacés, dès le début des années 70, par des ponts à thyristors partout où la qualité du réseau d'alimentation (puissance, stabilité, absence de coupures) était suffisante (à noter la génération de courants harmoniques par les thyristors qui nécessitent au préalable une étude sur les conséquences de la pollution du réseau et la mise en œuvre éventuelle de systèmes antiharmoniques).

Les convertisseurs à régulation analogique ont laissé la place à des commandes numériques, les automates programmables ont remplacé les armoires de relais auxiliaires et permettent, en plus de leur fonction de pilotage des différents mouvements, une supervision des machines, une aide à la maintenance, une aide au dépannage.

Les convertisseurs de fréquence sur le mouvement de levage commencent à faire leur apparition, le surcoût des équipements électroniques de commande devenant comparable au gain obtenu par l'emploi de moteurs asynchrones plus économiques à l'achat mais surtout en termes de maintenance (absence de balais et de collecteur).

Des liaisons informatisées entre le portique et le poste de contrôle à terre sont devenues la règle pour permettre tout à la fois la surveillance à distance de l'engin et une aide à l'exploitation du terminal, en assurant un lien entre les différentes machines impliquées dans l'opération et la transmission en temps réel des informations sur les flux des marchandises.

Physiquement, cette liaison est le plus souvent réalisée par fibres optiques maintenant que la technologie permet de disposer de joints tournants, au niveau des enrouleurs (les fibres sont alors intégrées dans le câble puissance du portique). Cette solution assure une immunité totale aux parasites contrairement aux autres systèmes connus (courants porteurs, boucle d'induction, radio). La radio reste cependant une nécessité pour les engins autonomes de manutention sur parc non dotés d'enrouleurs.

Sur le plan de l'architecture générale, le portique n'a guère évolué mis à part l'accroissement de ses dimensions (figure 33). Deux types coexistent toujours :

- le **portique à treuils embarqués sur le chariot**, plus lourd mais de conception plus simple quant au mouflage des câbles et permettant, si les treuils sont montés sur une plate-forme tournante, une rotation des conteneurs ;
- le **portique à treuils installés dans une cabine fixe** et poulies de renvoi jusqu'au chariot.

En fonction des caractéristiques de portance du quai ou du type de trafic à traiter (on trouve, sur certaines lignes desservant l'Afrique, les conteneurs disposés perpendiculairement à l'axe longitudinal du navire), il sera nécessaire d'opter pour un type ou pour l'autre.

À noter cependant que, pour des pourcentages faibles de conteneurs disposés en travers, des dispositifs annexes interposés entre le spreader (dénomination retenue au niveau mondial pour l'outil qui saisit le conteneur) et le porte-poulie peuvent permettre la rotation du conteneur au prix d'un accroissement du poids mort. À noter également pour le deuxième type, avec l'augmentation de la course du chariot, la nécessité de prévoir des dispositifs auxiliaires supports de câbles pour éviter la création d'une chaînette à la pose d'un conteneur et le coup de fouet au redémarrage, avec le risque d'une perte de précision dans la manœuvre.

Sur le plan des performances, il a été recherché un accroissement des cadences. Celles-ci, de 18 à 20 conteneurs par heure à l'origine, atteignent couramment 35 maintenant, avec des pointes à 55.

Pour obtenir une telle évolution, des améliorations ont été réalisées au niveau des vitesses :

	Vitesse de levage		Vitesse de direction
	à vide	en charge	
1968	1,4 m/s	0,7 m/s	2 m/s
1993	2 à 2,2 m/s	1 m/s à charge nominale avec vitesse inversement proportionnelle à la charge (travail à puissance constante)	3 à 3,5 m/s

Les différentes phases du cycle déchargement/chargement d'un conteneur ont également été analysées et les pertes de temps lors des opérations de prise/dépose du conteneur, engendrées par le manque de précision dans la position de la « cible », mises en évidence.

À partir de ce constat, les solutions mises en œuvre ont été multiples :

- guidage des moyens terrestres d'acheminement des conteneurs pour être assuré de leur bon positionnement sous les portiques (systèmes mécaniques, systèmes optiques) ;
- décomposition du cycle en deux, avec double manutention sur le portique : un premier équipement transfère le conteneur du sol sur une plate-forme mobile située entre les jambes du portique, la dépose étant faite en mode automatique. Le chariot principal saisit alors ce conteneur en mode automatique pour être mis ensuite à bord en mode manuel. Le processus est inverse lors d'une opération de déchargement ;
- mise en œuvre de systèmes d'aide à la conduite manuelle (contrairement aux manutentions sur parc au référentiel connu et fixe, qui permet une automatisation intégrale de la manutention sans présence humaine, le déchargement en mode automatique d'un navire, dont la position peut évoluer en fonction du courant, des marées et du vent et dont l'architecture est variable d'un type à l'autre, n'est pas encore techniquement accessible bien que de nombreuses études aient lieu dans ce sens actuellement).

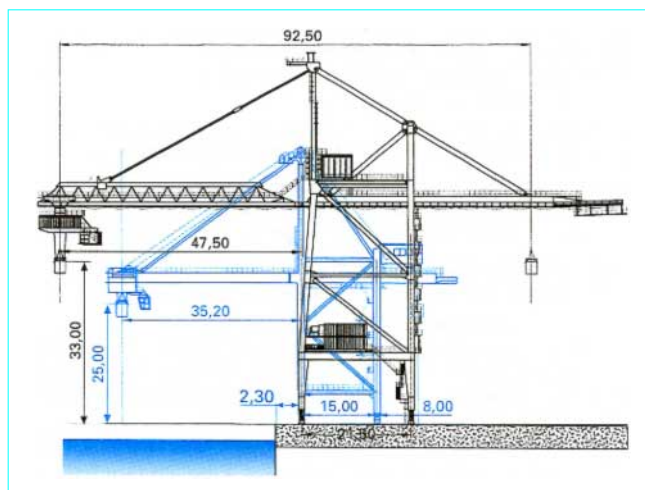


Figure 33 – Évolution de la géométrie des portiques à conteneurs entre 1968 et 1993. Port du Havre

Les systèmes d'aide qui sont mis progressivement en œuvre sont :

- l'anti-ballant, qui permet une stabilisation automatique de la charge au point d'arrivée (systèmes mécaniques, les premiers réalisés, et électroniques en boucle ouverte ou fermée qui ont tendance à supplanter les premiers) ;
- la commande de ralentissement automatique à la descente des treuils côté terre, mais également côté navire, ce qui nécessite une connaissance du profil de la cale et de son chargement ;
- la prédétermination de cibles côté mer et côté terre à partir de la cabine de conduite.

Le spreader a également évolué. De fixe (il fallait changer de spreader à chaque fois que l'on changeait de dimension de conteneur), il est devenu maintenant télescopique pour assurer la préhension de conteneurs de 20 à 40 pieds de longueur, voire 45 pieds (les dimensions standards sont 20', 30', 40' ISO ; 35' Sealand ; 45' et 48').

Tous les ordres de manœuvre (télescopage, commande du système d'accrochage, mise en œuvre ou effacement des centreurs) sont transmis depuis la cabine de conduite au spreader par un ombilic venant se lover dans un panier fixé sur l'outil ou, sur les engins récents, emmagasiné sur un enrouleur pour permettre une utilisation par vent fort.

Le même câble multiconducteur est utilisé pour renvoyer en cabine des informations sur l'état du spreader et de ses sécurités.

De plus en plus, et malgré les accélérations très fortes subies lors des chocs par ces outils (> 25 g), des automates embarqués sont utilisés pour gérer les différentes fonctions du spreader.

Alors que les portiques à conteneurs étaient calculés en fatigue pour 600 000 cycles il y a une vingtaine d'années, des valeurs de 2 000 000 voire 3 000 000 cycles sont maintenant fréquemment rencontrées. Les spreaders sont généralement calculés pour 1 000 000 cycles.

3.3.1.3.3 Engins flottants

La catégorie des engins flottants groupe les pontons-grues et les bigues flottantes, qui sont utilisés soit pour effectuer le transbord direct sur bateau de navigation intérieure et allèges, soit pour la manutention des colis lourds. La puissance de levage de ces engins atteint couramment 50 à 100 t, et même 300 t pour les pontons-bigues, les plus puissants dépassant 1 000 t.

Ces engins sont généralement remorqués et placés le long du navire à opérer ; le remorquage constitue cependant une lourde sujétion en matière de frais d'exploitation. Aussi, dans le cas d'une forte utilisation, peut-il être intéressant de prévoir une autopropulsion de ce type d'engin.

À l'autre extrême, comme signalé pour les bigues terrestres (§ 3.3.1.3.1), il peut être préférable de renoncer au ponton au terme d'une étude économique.

3.3.2 Manutention à terre

L'approche ou l'évacuation des marchandises, avant ou après les opérations de transbordement décrites précédemment, qui nécessitent une manutention horizontale, est réalisée à l'aide d'engins spécialisés choisis en fonction de la forme et du poids des colis.

Les anciens appareils étaient des engins à main : diables, crocs, etc.

Il est bien difficile de retrouver un tel type d'activité sur les quais car, comme pour la liaison navire-terre, les moyens mis en œuvre pour ces manutentions ont évolué de manière spectaculaire et se sont spécialisés en fonction de la marchandise à transporter.

La mise en œuvre d'engins d'acheminement et de levage lourds a également conduit à une évolution de la constitution des terre-pleins (§ 3.3.2.4).

3.3.2.1 Tracteurs

Les besoins spécifiques dans les ports ont conduit à de nouvelles générations d'engins qui se sont substitués aux tracteurs agricoles qui furent employés au début. Ces engins ont des conditions de confort équivalentes à celles des tracteurs routiers. Ils se différencient par un aspect plus rustique, l'utilisation, pour le châssis et la cabine, de tôles plus épaisses pour tenir compte des conditions de service plus sévères et assurer la protection du conducteur ; la sellette pour accrocher la semi-remorque s'élève hydrauliquement pour éviter la manœuvre fastidieuse de relevage des béquilles, le verrouillage/déverrouillage est commandé du poste de conduite. La puissance du moteur peut atteindre 270 ch avec 2 ponts moteurs pour gravir les rampes à l'intérieur des navires rouliers.

3.3.2.2 Chariots élévateurs

Les engins les plus couramment utilisés dans les ports sont les chariots élévateurs (cf. article *Chariots de manutention. Chariots élévateurs* [A 9 202] dans le traité L'entreprise industrielle).

Ils sont maintenant équipés d'accessoires permettant d'accroître leur productivité :

- spreader pour la manutention des conteneurs ;
- pince verticale (rotative dans certains cas) pour le transport des bobines de papier, des balles de coton, des fûts ;
- pince horizontale pour le transport des grumes ;
- système de pinces permettant le transfert de semi-remorques de terre à wagon.

De même, sur les terminaux à conteneurs, une gamme de grands chariots est utilisée pour la manutention sur parc des grands conteneurs normalisés. Leur puissance de levage atteint 42 t. Ils permettent le gerbage des conteneurs sur deux ou trois hauteurs (voire 6 dans le cas de conteneurs vides) et le placement de ceux-ci sur wagons ou châssis routiers.

À noter, pouvant être apparenté à la même famille, un nouveau type de matériel, à l'appellation communément admise de **reachstacker**, hybride entre le chariot élévateur pour le châssis et la grue mobile à flèche télescopique pour le système de levage (figure 34) sur les terminaux à conteneurs avec les avantages suivants sur le premier nommé :

- meilleure visibilité ;
- plus grande maniabilité ;

- possibilité de prendre un conteneur en 2^e ou 3^e file (un chariot élévateur ne peut prendre qu'en première file) et sur 5 hauteurs avec une force de levage en portée minimale pouvant atteindre 45 t ;
- possibilité d'orienter le conteneur à 90° pour la translation, limitant ainsi la largeur des allées de circulation.

3.3.2.3 Systèmes de manutention sur parc à conteneurs

Le développement du transport par conteneur a eu pour conséquence la mise au point de nouveaux types de matériels pour les acheminements terrestres et le stockage sur les terminaux.

La gamme est vaste entre le terminal non spécialisé situé dans un pays en voie de développement (remorque + tracteur agricole pour les transferts, gros chariot élévateur pour le stockage) et le Delta Terminal à Rotterdam entièrement automatisé avec portiques sur terre-plein et véhicules navettes, l'un et l'autre sans conducteur, qui assurent le transfert des conteneurs entre le parc et les portiques desservant les navires, en se référant à un quadrillage noté dans le sol pour exécuter les ordres communiqués par le système informatique central.

Entre ces deux situations extrêmes, les responsables des gros terminaux à conteneurs ont à trancher entre les deux types de manutention et de stockage les plus utilisés actuellement, à savoir le chariot cavalier (enjambant un seul conteneur) ou le portique de parc sur rails ou sur pneus pouvant couvrir jusqu'à 10 files de conteneurs plus une allée de circulation

■ **Le chariot cavalier** (figure 35) offre l'avantage d'une plus grande flexibilité ; il se déplace à grande vitesse (de l'ordre de 25 km/h) et peut assurer seul toutes les fonctions : il permet le déchargement ou le chargement des camions venant livrer au terminal, il stocke, déstocke, assure l'alimentation des portiques desservant le navire. Le nombre de manœuvres pour récupérer un conteneur est limité, même dans le plus mauvais des cas.

Il offre par contre le désavantage, dans la mesure où il ne peut stocker que sur une file, de mal utiliser les surfaces de terre-plein, une bande de roulement de 1,5 m environ devant être prévue entre chaque file. Il se prête également mal à une automatisation complète.

■ **Le portique de parc** (figure 36) densifie l'occupation du sol (des pavés de 10 files × 4 hauteurs peuvent être constitués). Par contre, le nombre de mouvements stériles est important lorsqu'il faut récupérer un conteneur en pied de tas. Cela exige des moyens intermédiaires d'acheminement vers le portique desservant le navire : tracteur + remorques simples, multiples (*multitrailer* à Rotterdam) ou à double étage (Singapour).

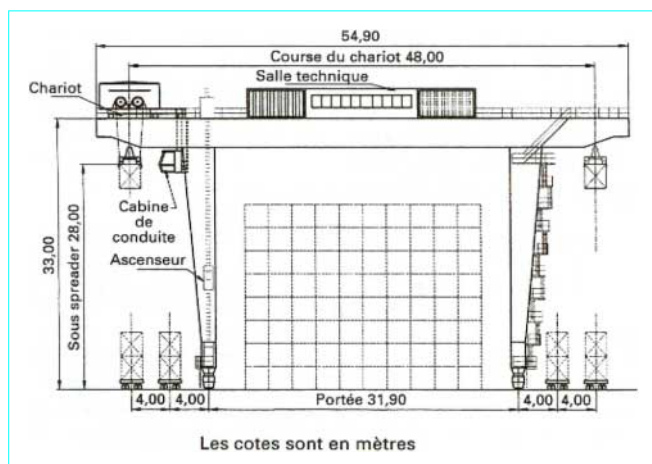
Ces engins se prêtent très bien à une automatisation, les portiques sur rails pouvant bénéficier, via leur enrouleur, d'une liaison à haute immunité grâce à la fibre optique ; les portiques sur pneus peuvent, eux, n'être connectés que par radio et exigent un système de repérage de position le long des files de conteneurs.



Figure 34 – Reachstacker



Figure 35 – Chariot cavalier

Figure 36 – Portique de parc sur rails (10 rangées de 8 conteneurs).
Port de Singapour

Le portique sur pneus présente par contre l'avantage, en extrémité de tas, par un pivotement de ses roues à 90°, de se translater d'une zone à l'autre et d'apporter ainsi une flexibilité plus grande que les engins sur rails.

Les choix comme toujours sont économiques : là où le sol est cher (Hong Kong, Singapour, Japon, etc.), on aura recours en majorité aux portiques de parc, là où son prix de revient est moindre, le chariot cavalier sera préféré (Anvers, Le Havre...).

Le choix fait au Delta Terminal de Rotterdam, déjà cité, pour des portiques de parc ne dépend pas de ces critères, mais de la volonté de réaliser un terminal entièrement automatisé sans présence humaine afin d'obtenir une fiabilité et une rapidité des opérations tout en baissant les coûts de main-d'œuvre. Le portique de parc sur rails associé à des véhicules de transfert automatiques est alors la meilleure réponse au problème posé.

3.3.2.4 Terre-pleins

Les terre-pleins sont destinés à permettre l'évolution des engins de manutention et de transport qui gravitent autour du navire ainsi que le stockage des marchandises.

Le bon état des terre-pleins contribue à faciliter l'exploitation, tant sur le plan de l'efficacité que de la sécurité. Le dimensionnement de la structure des terre-pleins est donc primordial. Il nécessite préalablement l'établissement d'un plan de marquage où sont figurées les zones de circulation et les zones de stockage.

3.3.2.4.1 Dimensionnement

Deux approches sont envisageables :

- l'approche théorique ;
- l'approche pragmatique.

L'approche théorique nécessite la connaissance des caractéristiques mécaniques des engins de parc (pression au sol, impact des roues, distance entre essieux...) ainsi que l'intensité du trafic.

Si les premiers éléments sont faciles à recueillir, le deuxième point relatif à l'intensité du trafic est beaucoup moins évident. Il est en effet très délicat d'apprécier d'une part le nombre de mouvements et d'autre part les effets secondaires des freinages et rotations des engins.

Ces éléments, associés aux caractéristiques mécaniques de l'assise et de la couche de forme, permettent l'utilisation de logiciels de dimensionnement reposant sur la théorie de l'élasticité. Cette méthode est encore peu utilisée pour le dimensionnement des terre-pleins.

L'approche pragmatique repose sur l'expérience. C'est le résultat d'une amélioration progressive des méthodes utilisées antérieurement. Elle se base surtout sur la comparaison de la tenue des structures en place et des conditions d'exploitation.

3.3.2.4.2 Principaux types de revêtements utilisés sur les terre-pleins

On distingue deux grandes familles :

- les revêtements surfaciques du type bitumineux ;
- les dalles ou pavages.

■ Revêtements bitumineux

Les structures retenues sont variables et dépendent de la nature du fond de forme. Néanmoins, les matériaux les plus fréquemment employés sont les graves non traitées, les graves-ciments ou graves-bitumes et les bétons bitumineux.

Les épaisseurs moyennes généralement adoptées sur un terminal pour conteneurs dont le fond de forme est en remblais sableux sont les suivantes :

- graves non traitées : 40 cm en couche de fondation ;
- graves-bitumes : 15 cm en couche de base ;
- béton bitumineux : 6 cm en couche de roulement.

Dans les zones particulièrement sollicitées, l'épaisseur de la couche de fondation est alors augmentée.

■ Dalles ou pavages

Dans de nombreux ports du nord de l'Europe, les pavés en béton sont largement utilisés. Les dimensions classiques sont 22 × 11 × 12 cm.

Ces pavés sont disposés sur 30 à 40 cm de sable-ciment (mixiné en place) ou 30 cm de matériaux concassés.

Un mortier de 5 cm est incorporé entre les pavés et la couche de base.

3.3.2.5 Magasins et hangars

Les magasins à marchandises diverses comprennent les hangars de transit qui sont situés à proximité des plans d'eau (10 à 15 m) et des magasins de stockage où la marchandise peut séjourner pendant une longue durée et qui sont en général implantés en deuxième zone, à une distance d'au moins 100 m des plans d'eau. Les magasins de stockage ne diffèrent pas de ceux qu'on peut rencontrer en dehors des ports maritimes (cf. article *Matériels de stockage* [A 950] dans le traité *L'Entreprise industrielle*) et sont souvent équipés d'installations de conditionnement ou de conservation (frigorifiques) ou même de petite transformation (emballage, etc.).

Sur les terminaux à conteneurs, les hangars utilisés pour l'empilage et le dépotage des conteneurs ont de grandes surfaces (5 000 à 15 000 m²) et sont situés à 300 m au moins du bord à quai, pour ne pas empiéter sur les terre-pleins de stockage des conteneurs.

Les hangars de transit sont des bâtiments rectangulaires, à simple rez-de-chaussée ou avec des étages pour les plus anciens, s'ouvrant sur le quai et les terre-pleins par de larges portes (roulantes, levantes ou basculantes). Ces bâtiments ont des appuis intérieurs en nombre aussi restreint que possible pour faciliter la circulation des engins de manutention ; les portes ont une largeur d'au moins 3 m et une hauteur atteignant 5 m (et parfois 7 à 8 m si la manutention nécessite des grues automobiles).

La largeur des hangars à marchandises diverses est voisine de 50 m et leur longueur de 80 m. La distance entre deux hangars doit permettre le tracé des bretelles de raccordement entre les voies ferrées de quai et celles d'arrière-quai ; pratiquement, la distance entre deux hangars est d'une soixantaine de mètres.

Le sol des hangars est établi au niveau de la zone bord à quai pour permettre la circulation des engins de manutention horizontale ; il peut cependant se relever pour constituer un quai de chargement de wagons et de camions, du côté opposé au bassin.

L'équipement des hangars comprend : l'éclairage, la ventilation, le chauffage, les réseaux divers, les bureaux du personnel d'exploitation, les installations sanitaires, etc.

Les hangars à fruits et primeurs comportent une climatisation en chauffage et en refroidissement ainsi qu'un contrôle de l'hygrométrie pour assurer la conservation des denrées stockées.

Le calcul des hangars portuaires ne pose aucun problème particulier et se traite par les méthodes classiques du calcul des bâtiments.

D'une façon générale, sauf pour les hangars spécialisés (hangars à fruits qui doivent être climatisés), il est recommandé de rechercher des structures simples et légères, permettant de modifier économiquement les dimensions ou la forme du hangar, si une évolution du trafic l'exige.

3.3.2.6 Équipements divers

Les équipements divers notables concernent principalement ceux des terminaux à conteneurs ; ce sont :

- les **installations de contrôle d'entrée** abritées sous des auvents, pour contrôle de l'état du conteneur (passerelles surélevées ou caméras à prévoir) avec postes de saisie informatique pour gestion des interchanges et affectation de l'emplacement de stockage ;
- les **installations de prises de courant** pour conteneurs réfrigérés : il est indispensable que les conteneurs chargés de denrées périssables soient réfrigérés durant leur séjour sur le terminal comme ils le sont à bord des navires ;
- les **ponts-basculés** : il existe, sur les terminaux à conteneurs, des ponts-basculés routiers pour le pesage des conteneurs ; ces ponts-basculés ont une force de l'ordre de 60 t, compte tenu du fait que l'on y pèse les conteneurs sans rupture de charge, c'est-à-dire sans les décharger des ensembles routiers qui les transportent ;
- les **bureaux d'exploitation** : ils abritent les bureaux des compagnies, les services d'exploitation du port, les manutentionnaires, la douane, etc.

3.4 Postes pour marchandises pondéreuses en vrac

On classe dans les produits pondéreux solides en vrac les minerais, les charbons, les produits chimiques en poudre (soufre, phosphates, etc.), les agrégats ainsi que les produits agroalimentaires (céréales, tourteaux).

En fonction des caractéristiques de ces produits (granulométrie, masse volumique, pouvoir d'abrasion, pouvoir colmatant, teneur en poussière), des familles d'engins spécialisés ont été conçues dont la description est faite dans les paragraphes suivants.

À noter qu'une technique apparue au début des années 70 consistant à assurer le déchargement puis l'acheminement de certains minerais ou charbons finement broyés sous forme de boue (*slurry*), par des canalisations, n'a pas connu le développement promis, essentiellement pour des raisons de protection de l'environnement (forte consommation d'eau douce, nécessité de bassins de décantation importants au point d'arrivée avec imperméabilisation des fonds pour éviter la pollution des nappes, etc.).

Ce sont ces mêmes contraintes qui ont conduit depuis à la mise au point de nouveaux dispositifs évitant essentiellement l'envol des poussières lors de leur transfert.

3.4.1 Engins de transbordement

3.4.1.1 Engins de chargement

Le chargement des vrac s'effectue le plus souvent de manière continue par gravité.

Un ensemble de bandes transporteuses convoie le produit du lieu de stockage au navire, l'engin terminal étant doté d'une flèche éclipable lors de l'accostage du navire.

Cet engin peut être fixe, une simple tour, le navire disposant d'un seul point de chargement avec répartition entre les cales par ses propres installations ou devant se déplacer le long du poste pour équilibrer son chargement. Il peut être mobile en translation lorsque le poste de chargement est constitué d'un quai, ou à déplacement polaire lorsque le poste est offshore, limitant ainsi les coûts d'infrastructure. Il peut être doté d'un tube télescopique permettant de limiter la hauteur de chute libre du produit et équipé d'un système de captation de poussières (alumine, phosphate, manioc, etc.) ou d'un tapis projeteur pour la répartition de la cargaison dans la cale (céréales).

Pour le minerai de fer et le charbon, la capacité de chargement atteint couramment 5 000 t/h voire 8 000 t/h et, pour les céréales et les produits agroalimentaires, 2 400 t/h.

3.4.1.2 Engins de déchargement

Les engins de déchargement peuvent être classés en deux grandes familles :

- les engins à bennes qui assurent une manutention discontinue des produits ;
- les déchargeurs continus généralement plus spécialisés et plus efficaces en matière de lutte contre la pollution.

■ Engins à benne

Ils représentent la famille la plus ancienne. Elle va de la grue classique monocâble équipée d'une benne à dé clic (la pose de la benne sur le tas déclenche son ouverture) au portique de 85 t de force de levage équipé d'une benne quadricâble avec des durées de cycle inférieures à la minute, en passant par les grues quadricâbles et les grues kangourous (figure 37) (une trémie est installée sur le portique de la grue en avant de sa partie tournante ; une fois la grue positionnée en face de la cale du navire, le déplacement de la benne est simplement obtenu par une combinaison des mouvements de levage et de variation de portée sans avoir recours à l'orientation et permet ainsi de diminuer le temps de cycle).

L'engin à benne est le plus polyvalent : un simple changement de benne en fonction du produit à manutentionner permet de disposer d'un équipement adapté. Il est par contre particulièrement polluant :

- fuite de produit au niveau de la benne lors du transfert navire-trémie ;
- envol de poussières lors de l'ouverture au-dessus de la trémie.



Figure 37 – Grue kangourou Caillard 900 t · m, grue quadricable Caillard 300 t · m et trémie associée, déchargeur à chaîne Buhler Caillard 1 000 t/h. Port de Lorient

Aussi, des aménagements permettant de diminuer de manière sensible cet inconvénient ont-ils été adaptés :

- adjonction d'un panneau relevable abaissé entre le navire et la trémie après l'accostage pour récupérer la matière s'échappant de la benne ;
- mise en place sur les deux faces latérales d'ensembles d'aspiration/filtration avec recyclage des poussières pour capter le nuage émis lors de la chute du produit dans la trémie ;
- trémie à double paroi et chambre de décompression permettant de diminuer la puissance installée des systèmes de captation ;
- génération d'un brouillard d'eau au droit de la chute lorsque le produit manutentionné le permet, avec adjonction éventuelle d'additifs pour piéger les particules.

Le type de matériel à retenir et sa capacité dépendent des volumes de trafic annuel, du type de navire pouvant fréquenter l'installation (les plus gros vraquiers existant au monde ont une capacité de 380 000 t), du taux d'occupation prévisible du poste, etc. pour déterminer la meilleure solution du point de vue économique.

Du point de vue technologique, les portiques à vrac (figure 38) ont suivi une évolution similaire à celle des portiques à conteneurs : alimentation en HT, emploi généralisé de convertisseurs à thyristors, d'automates, aide à la conduite (cycle semi-automatique), à la maintenance.

Compte tenu de la non-nécessité d'une grande précision dans le positionnement de la benne et des fortes accélérations subies par le chariot, la cabine de conduite est généralement installée sur un chariot auxiliaire se déplaçant sur une voie de roulement indépendante. Le conducteur peut manœuvrer cette cabine et la positionner pour avoir la meilleure vision de sa zone de travail.

De même, pour diminuer les poids morts et les sollicitations sur la structure, les treuils sont généralement installés en cabine fixe, le chariot mû par câbles étant équipé de poulies de renvoi pour la manœuvre de la benne.

L'entre-axes de la voie de roulement peut varier de 15 m dans le cas d'un appontement, à 35 m, voire plus, en fonction des contraintes de génie civil ou d'exploitation (mise au stock entre les voies du portique notamment).

Ces engins sont classés dans le groupe le plus sévère de règles FEM et sont calculés en fatigue pour une durée de vie dépassant les 2 000 000 cycles.



Figure 38 – Portiques à benne

■ Déchargeurs continus

Ils permettent de maintenir le produit à l'intérieur d'enceintes, évitant ainsi leur dispersion lors du déchargement. De technologie plus sophistiquée, ils entrent en concurrence directe avec les engins à benne, compte tenu des contraintes d'environnement de plus en plus présentes, malgré quelques inconvénients. On peut citer :

- les **aspirateurs**, essentiellement pour les céréales, avec des débits pouvant atteindre 400 t/h sur une seule manche :

- **inconvénient** : forte consommation d'énergie, abrasion des conduits (mise en place de plaques de céramique au niveau des coudes) ;

- le **transport en masse par chaîne** (une chaîne avec barreaux circule dans un double conduit vertical et, par son déplacement, met en mouvement le produit), débit 600 t/h :

- **inconvénient** : consommation d'énergie assez élevée, abrasion des conduits, risque de rupture de chaîne par entraînement de corps étrangers,

- **utilisation** : céréales et, avec gratteur en extrémité, tourteaux ;

- la **chaîne à godets**, prolongée par une partie horizontale faisant office de gratteur pour les produits pulvérulents, débit 1 000 t/h ;

- la **roue à godets** (préférer un entraînement hydraulique de celle-ci compte tenu des conditions sévères d'utilisation), au bout d'un bras vertical supportant lui-même le système élévateur de produit (chaîne à godets, bande à bords et poches) pour les produits de plus forte granulométrie (minerai, charbon), avec des débits pouvant atteindre 4 000 t/h mais plus couramment 2 400 t/h (figure 39) ;

- la **vis sans fin** (système Siwertell) équipée à son extrémité d'un désagréateur/alimentateur tournant en sens inverse de la vis, débit : jusqu'à 3 000 t/h :

- **utilisation** : céréales, ciment, tourteaux ; le constructeur indique également charbon, mais il faut être prudent et être sûr que la granulométrie du produit à décharger conviendra,

- **inconvénients** : consommation d'énergie assez élevée (frottement du produit sur les parois du tube), risque de blocage de la vis par corps étrangers ;

- la **double bande transporteuse** (système Simon Carves) : les deux bandes sont maintenues en pression l'une contre l'autre, le produit est entraîné entre les deux bandes et extrait de la cale du navire :

- **utilisation** : céréales, charbon.

Ce type d'engin ne semble pas connaître cependant un grand développement.

À noter enfin, comme signalé au paragraphe 3.1, que, dans certains cas, les navires spécialisés pour le transport des pondéreux solides (minerais, charbon, etc.) sont équipés pour assurer leur

déchargement sans l'aide d'engins portuaires. Ils sont munis d'un tunnel longitudinal abritant une bande sur laquelle se vident les cales ; cette bande aboutit à un élévateur qui déverse son chargement sur une bande transporteuse portée par un bras d'une quarantaine de mètres, mobile autour d'un axe vertical, ce bras étant rabattu sur le navire en position de route, et déployé vers la terre au point de déchargement. Les cadences de déchargement peuvent atteindre, pour ce type de navire, 5 000 t/h.

L'emploi de ces navires, qui ne nécessitent que peu d'installations à terre, est intéressant sur des distances courtes (l'investissement que représente cette installation embarquée doit être justifié par un taux d'utilisation annuel important) ou pour des trafics annuels faibles pour lesquels la création d'un terminal terrestre ne trouverait pas sa justification économique. L'utilisation sur les grands lacs américains relève du premier calcul, les réexpéditions sur des destinations secondaires en Europe à partir de Rotterdam comme port d'éclatement relèvent du second.

À signaler enfin l'emploi d'engins flottants pour le déchargement de produits en vrac.

La manutention peut être de type discontinu avec des grues à bennes de 30 à 40 t de force de levage (figure 40) ou de type continu (aspirateurs pour les céréales). Ces engins sont très utilisés sur la zone Anvers-Rotterdam, car ils permettent un transfert du produit du navire aux barges, ou *vice versa*, sans passer par un stockage intermédiaire et avec acheminement direct *via* le réseau rhénan. Ce système peut présenter un intérêt économique :

- moindre coût d'infrastructure ;
- moindre coût des superstructures lorsque le matériel peut être utilisé alternativement sur des sites distincts, avec le cas extrême de Terneuzen et Flessingue sur la frontière entre la Belgique et la Hollande où les pontons-grues traversent l'estuaire de l'Escaut pour desservir les deux ports.

Il faut cependant intégrer les coûts d'exploitation (source d'énergie autonome) ainsi que les coûts de maintenance (entretien de la coque) plus importants pour déterminer le gain réel.

3.4.2 Constitution et équipement des stockages

La capacité des stockages dépend de l'importance des cargaisons reçues (ou expédiées) et de la cadence d'enlèvement (ou d'approvisionnement du stock). On admet généralement, pour des fonctions de transit, que la capacité doit correspondre à celle d'au moins deux navires reçus au poste. En stockage export et selon le type de trafic, il peut être admis de descendre au-dessous de cette valeur.

On distingue les **stockages couverts** pour les produits craignant la pluie (céréales, tourteaux, phosphate, alumine, etc.) et les **stockages extérieurs** (minerai, charbon, agrégats).

Pour les premiers, on trouve les stockages verticaux, silo en béton ou en acier avec vidange par gravité (fond de silo conique) ou par vis d'extraction ramenant le produit au centre et tournant autour de l'axe vertical du silo. L'alimentation se fait par le sommet, le produit étant amené à ce niveau à l'aide d'un élévateur à godets ou d'un convoyeur incliné.

Pour les stockages à plat sous hangar, le convoyeur de mise au stock est situé sous le faitage du hangar. Un chariot verseur permet de distribuer le produit dans les différentes nefs.

La reprise peut être réalisée :

- à l'aide de chargeurs à godet sur pneus et déversant les produits sur une bande transporteuse le long du hangar ;
- par gratteur (chaîne à palettes suspendue à un portique parcourant toute la longueur, pour des hangars sans appuis intermédiaires, ou à des rails longitudinaux fixés en toiture, dans le cas contraire) qui attaque la couche superficielle du tas et achemine le produit vers un convoyeur latéral ;
- par gravité par l'intermédiaire de trémies équipées de trappes alimentant un convoyeur en sous-sol.



Figure 39 – Déchargeur continu Kone



Figure 40 – Ponton-grue à benne FIGEE 1 500 t · m (36 t à 43 m). Port de Rotterdam

À noter la réalisation de planchers légèrement inclinés et mis en vibration qui permettent de supprimer l'utilisation de buteurs pour le nettoyage complet des nefs.

À noter également une nouvelle technique de construction de stockages couverts intermédiaires entre le silo vertical et le hangar : le stockage hémisphérique dont l'ossature initiale est constituée d'une toile plastique maintenue en surpression qui servira ensuite de support pour la réalisation de la voûte réalisée par projection de ciment.

La technique de réalisation des stockages à l'air libre est devenue plus complexe avec la prise de conscience du risque de pollution des nappes phréatiques par les eaux de percolation et de ruissellement.

La zone de stockage simplement compactée et stabilisée avec ou sans revêtement de surface n'est maintenant plus autorisée par les DRIRE (Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement).

Une imperméabilisation du sous-sol est maintenant exigée avec réseau de drainage, récupération périphérique des eaux de percolation et de ruissellement, bassin de décantation et traitement éventuel avant rejet.

De plus, pour limiter l'envol des poussières, des systèmes d'arrosage fixes ou mobiles doivent être prévus. La manutention sur ces parcs est assurée au moyen de bandes transporteuses.

Le stockage est réalisé par l'intermédiaire de tapis inclinés fixes (cas général des carrières), mobiles en rotation autour d'un point pour constituer un parc polaire ou, lorsque le stock à constituer est important, en translation le long du parc avec flèche mobile en rotation.

À noter que pour le charbon, dans le cas de stockages de longue durée, il est nécessaire d'avoir recours à des engins de compactage pour diminuer le foisonnement et éviter les phénomènes d'auto-combustion ainsi qu'à une surveillance de l'évolution de la température à l'intérieur du tas par l'insertion de sondes en profondeur.

La reprise peut s'effectuer à l'aide de chargeurs à godet sur pneus pour les petits stocks ou ceux ayant un faible taux de rotation, par gratteur sur portique, par portique à benne enjambant le parc ou, le plus généralement maintenant par roue pelle, cet engin pouvant avoir une fonction double de mise au stock et de reprise en inversant le sens de marche du tapis de flèche dans le but de diminuer l'investissement global (figure 41).

La contrainte cependant, dans le cas où un seul engin équipe le parc, réside dans le fait qu'une seule opération n'est réalisable à la fois et qu'il n'est donc pas possible de réexpédier une qualité de produit si un navire porteur d'une autre qualité est en opération.

Le recul du portique à benne sur les parcs est lié au fait qu'il se prête moins bien à l'automatisation des opérations que les engins fonctionnant sur le principe de la manutention continue.

3.5 Manutention des liquides en vrac

Les marchandises liquides en vrac sont manutentionnées par refoulement dans des canalisations (pipe-lines) ; les produits liquides actuellement transportés en vrac sont les hydrocarbures ou produits chimiques sous forme de liquides ou de gaz liquéfiés et, depuis quelques années, le soufre à l'état liquide, mais également des produits agroalimentaires, le vin et l'huile comestible.



Figure 41 – Roue pelle et stockeur combiné SOM DEL
(1 500 t/h reprise, 3 000 t/h stockage)

Pour les navires de moyen tonnage et sur les installations anciennes, la liaison entre les citernes (*tanks*) du navire et les pipe-lines qui les raccordent aux installations de stockage terrestres s'effectue par des flexibles. Les armatures sont reliées électriquement aux citernes et aux pipe-lines pour éviter les risques d'étincelles par accumulation d'électricité statique.

La mise en service de pétroliers géants a conduit au remplacement des flexibles traditionnels par des bras métalliques articulés équipés de tubes avec genouillères qui sont utilisés au-delà d'un diamètre de 10" (25 cm) et peuvent atteindre un diamètre de 16" (40 cm), voir 24" (60 cm) comme au terminal pétrolier du Havre-Antifer. La pression d'utilisation est d'environ 1,5 MPa et leur débit peut atteindre 4 000 t/h d'hydrocarbures. Les bras sont constitués d'éléments de 8 à 9 m de longueur assemblés bout à bout.

Un pétrolier de 250 000 t est normalement desservi par quatre bras métalliques qui permettent une cadence d'opération d'environ 16 000 t/h. Le temps de déchargement d'un pétrolier se situe entre 15 et 20 h.

Ces appareils sont plus robustes que les flexibles et demandent moins d'entretien. L'effort de levage des bras est réduit par l'utilisation de contrepoids.

La manutention des gaz liquéfiés sous pression (butane, propane) s'effectue de la même façon que pour les liquides ; celle des gaz liquéfiés à basse température (méthane) pose des problèmes d'isolation et de tenue des matériaux (soudures) en raison de la très basse température (– 160 °C pour le méthane).

Celle du soufre liquide pose également un problème d'isolation thermique, le produit étant refoulé et stocké à une température voisine de 120 °C.

4. Autres équipements intérieurs des ports

4.1 Accueil et guidage des navires

L'accueil et le guidage aux approches d'un port doivent être assurés par un centre de contrôle portuaire qui apporte aux navires les services nécessaires selon des procédures clairement définies et diffusées largement, avec un personnel spécialisé compétent et avec le support d'équipements adéquats fiables.

4.1.1 Services apportés par le centre de contrôle portuaire

■ Collecte, analyse et transmission d'informations

Le centre recueille à tout instant les renseignements relatifs aux données météorologiques, océanographiques, au trafic maritime dans la zone dont il a la charge. Le centre assure la coordination du flux d'informations qu'il transmet aux navires.

■ Organisation du trafic

Elle comprend la prévision des mouvements de navires sur la base d'une procédure (voir ci-après) afin de prévoir des situations difficiles ou dangereuses en réalisant la coordination des mouvements des différents navires en fonction des informations dont le centre dispose.

■ Support aux partenaires du centre

Le centre est également en contact permanent avec les organismes (pilotage, remorquage, lamanage, services de sécurité, douanes, police, armements, consignataires...) concourant aux manœuvres des navires ou intervenant dans les formalités d'accueil des navires.

4.1.2 Procédures

L'efficacité d'un centre de contrôle réside également dans la mise au point et le respect de procédures précises applicables dans le secteur couvert par le centre et diffusées à tous les intervenants.

Ces procédures portent notamment sur :

- les conditions de communication entre le centre et les navires, entre navires (procédures d'identification, forme des messages d'information) ;
- les conditions de transmission par les navires au centre, et d'agrément par le centre de la feuille de route du navire ;
- l'identification des marchandises dangereuses.

4.1.3 Personnel

Un centre de contrôle est placé sous l'autorité du Commandant ou Capitaine de port et comprend des officiers de port qui assurent une veille permanente.

4.1.4 Équipements

Les équipements nécessaires pour le contrôle de la manœuvre des navires sont principalement :

- des équipements radio, principal et essentiel lien entre les navires et la terre (station radio VHF dotée des différentes fréquences dans la bande marine) ;
- des équipements radar avec plusieurs stations assurant une couverture de la zone d'intervention du centre ; les informations données par ces stations radar sont centralisées au centre de contrôle et traitées pour être transformées en images télévisées visibles en plein jour ;
- des équipements d'aide à la navigation sous forme de systèmes de guidage donnant en temps réel au pilote embarqué, en même temps qu'au centre, les informations sur la position, la route et la vitesse du navire ;
- des équipements utilisables pour le placement et la gestion des navires à quai (équipements radio et réseaux télégraphiques spécifiques).

4.2 Écluses maritimes

On se reportera à l'article *Voies navigables* [C 5 008] dans ce traité.

4.2.1 Généralités

Ce sont des ouvrages permettant aux navires de passer, comme en navigation fluviale, d'un plan d'eau à un autre de niveau différent ; il s'agit le plus souvent, dans les ports maritimes soumis à la marée, de connecter un bassin de marée (ou avant-port) avec un bassin à flot ou à niveau constant, c'est-à-dire que la dénivellée y est variable dans le temps et peut même changer de sens. Les quais en bassin de marée sont d'accès plus rapide, mais sont plus hauts donc plus chers ; la construction d'une écluse, permettant de disposer de bassins à niveau constant, conduit à des économies de dragage et d'infrastructure des quais de ces bassins.

Les **écluses simples** ne comportent qu'un seul système de portes séparant les deux plans d'eau : elles ne permettent donc le passage des navires que lorsque les deux niveaux sont très proches, c'est-à-dire en général pendant l'étape de pleine mer ; elles ne sont utilisées que dans les ports à faible trafic.

Les **écluses à sas** (figure 42) comportent un sas muni à chacune de ses extrémités d'un système de portes permettant le sasement à toute heure (si le niveau du radier le permet à basse mer).

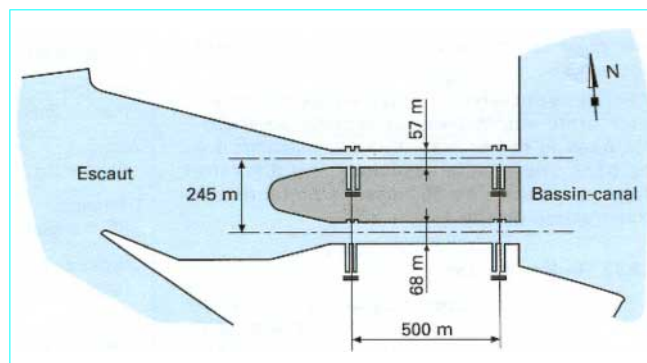


Figure 42 – Écluses maritimes de Zandvliet et de Berendrecht à Anvers : vue générale

4.2.2 Dimensions

Le choix des dimensions d'une écluse est très délicat car il s'agit d'un investissement à très long terme et d'un montant élevé.

■ Longueur du sas

Elle doit excéder d'au moins 20 % (et d'au moins 50 m) la longueur du plus grand navire à recevoir (navire de projet) pour l'admission des remorqueurs avant et arrière et la sécurité des manœuvres.

La longueur retenue peut également résulter de la décision de prévoir de sasser deux navires moyens, l'un derrière l'autre, pour augmenter le débit de l'écluse. À la longueur du sas il faut ajouter la longueur des têtes où sont disposés les portes et les aqueducs.

Une écluse peut être allongée en échouant une tête nouvelle, préfabriquée, à l'une des extrémités, mais c'est une opération difficile à réaliser en service (cas de l'écluse d'Incheon en Corée).

■ Largeur des pertuis aux têtes

Elle est en général, maintenant, la même que la largeur du sas, afin d'avoir de meilleures conditions de sécurité et de rapidité pour les mouvements de sasement des navires. La largeur aux têtes n'est pas modifiable dans l'avenir.

La largeur des grands sas doit excéder d'environ 10 m celle du navire de projet ; elle peut aussi résulter de considérations de débit de l'écluse (deux navires moyens à couple).

■ Profondeur du sas et de la tête aval

Elle résulte du choix fait sur la durée d'accessibilité à l'écluse, dans le cycle de marnage, du navire de projet ; c'est une question d'ouverture du port, mais aussi de débit en nombre de navires sassables. La profondeur est une caractéristique définitive.

Le tableau 7 récapitule les dimensions principales de quelques grandes écluses maritimes modernes.

4.2.3 Description des éléments principaux d'une écluse

4.2.3.1 Bajoyers du sas

Ils sont toujours verticaux et assimilables à des quais en bassin de marée où le marnage se fait en quelques minutes, donc soumis à une très forte dénivellée hydrostatique (figure 43).

Ils peuvent être constitués de murs en béton armé autostables sur semelle ou encastrés dans le radier (cas d'une construction à sec dans une souille asséchée), ou d'écrans plans, de gabions ou de caissons préfabriqués (construction en site nautique).

4.2.3.2 Radier du sas

Sa constitution dépend de la piézométrie et de la perméabilité des sols sous-jacents. S'il n'y a pas de risque de soulèvement du sol par sous-pression lors de la vidange rapide du sas à BMVE (basse mer de vive-eau) et si les venues d'eau sont réduites, un dallage mince en béton avec joints perméables assurant l'équilibre des pressions entre le sas et le drain sous dalles du radier suffit pour éviter l'érosion du fond par les remous des hélices. Cette conception peut exiger un rideau parafouille sous les bajoyers.

Dans le cas contraire, il faut un radier lourd relié aux bajoyers, c'est-à-dire sollicité en flexion transversale, pour constituer un U monolithique en béton armé (cas de l'écluse François 1^{er} au Havre).

4.2.3.3 Têtes

Chaque tête a trois fonctions essentielles :

- constituer la fondation des portes et de leurs dispositifs de manœuvre et d'appui ;
- résister aux efforts horizontaux et aux sous-pressions résultant de la dénivellation des plans d'eau de part et d'autre des portes ;
- inclure les aqueducs de vidange et de remplissage du sas, ainsi que les vannes et batardeaux.

En outre, la tête comporte éventuellement les infrastructures d'un pont mobile qui l'enjambe. Il en résulte qu'une tête doit avoir une structure rigide et massive en béton armé, avec des bajoyers encastrés dans un radier, éventuellement ancré dans le sol pour résister aux sous-pressions. Un rideau de palplanches est battu en travers du radier de la tête pour se garantir du risque de renard.

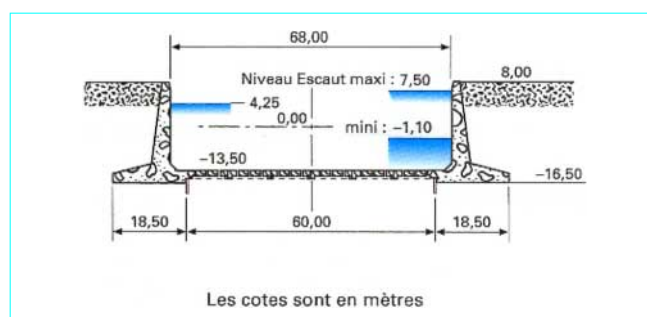


Figure 43 – Écluse maritime de Berendrecht : coupe transversale

Tableau 7 – Caractéristiques des grandes écluses maritimes modernes

Nom de l'écluse	Chute maximale (m)	Dimensions du sas (m)	Mouillage minimal sur seuil (m)	Système de remplissage et de vidange	Remarques
Baudoin (Anvers)	5,00	360 × 45	10,50	Contournement des têtes	En service 1955
Zandvliet (Anvers)	5,35	500 × 57	12,40	Contournement des têtes	En service 1967
Kallo (Anvers)	5,50	360 × 50	11,50	Contournement des têtes	En service 1981
Berendrecht (Anvers)	5,35	500 × 68	12,40	Contournement des têtes	En service 1986
P. Vandamme (Zeebrugge)	5,00	500 × 57	14,00	Vannes dans les portes	En service 1983
Terneuzen (Kanaal Gent-Terneuzen)	6,00	290 × 40	6,85	Aqueducs longitudinaux	En service 1968
Watier (Dunkerque)	6,70	280 × 40	8,00	Contournement des têtes	En service 1947
Trystram (Dunkerque)	6,70	170 × 25	5,00	Contournement des têtes	En service 1955
Charles de Gaulle (Dunkerque)	6,70	364 × 50	13,50	Contournement des têtes	En service 1970
François 1 ^{er} (Le Havre)	8,00	401 × 67	14,50	Contournement des têtes	En service 1971
Bassin Loubet (Boulogne)	8,80	126 × 25	5,50	Contournement des têtes	En service 1972
Fourth Entrance (Wilhelmshaven)	4,10	390 × 57 (60)	11,70	Vannes dans les portes	Sas construit en 1940/42 ; têtes et portes construites en 1961/62
Fishery-Harbour-Lock (Cuxhaven)	4,00	192 × 25	9,50	Vannes dans les portes	En service 1964
Royal Portbury Dock (Bristol)	14,60	366 × 42,70	5,50/17,70	Contournement des têtes	En service 1976
Industrial Harbour Lock (Bremen)	5,90	249 × 48,80	8,25	Vannes dans les portes	Reconstruite 1980/82
Incheon (Corée)	9,50	300 × 36	7,50	Contournement des têtes	En service 1974

4.2.3.4 Portes

Ce sont des structures métalliques appartenant presque toujours à l'un des types suivants.

■ Porte busquée à un ou deux vantaux

Tournant autour d'axes verticaux, elles sont économiques car elles n'exigent que des enclaves très réduites dans l'épaisseur du bajoyer des têtes. Pour des questions de structure et de poids (manutention lors des déposes pour entretien), elles ne sont que rarement utilisées au-delà d'une largeur de 30 m et très exceptionnellement pour 40 m.

Une paire de portes travaillant en voûte comprimée (phénomène de busc) ne peut convenir que pour un seul sens de dénivelée ; si celle-ci peut s'inverser, il faut une autre paire de portes (portes de flot et portes d'êbe).

■ Porte à translation horizontale

Elle est constituée par un caisson métallique d'une longueur légèrement supérieure à la largeur intérieure de la tête, roulant sur le radier et appuyée en position fermée sur des redans, l'un horizontal inférieur dans le radier et deux autres verticaux dans les deux bajoyers opposés. En position d'ouverture, la porte s'efface complètement dans une chambre ou enclave dotée en général d'un batardeau d'enclave afin de pouvoir l'assécher pour l'entretien de la porte ; en effet, la porte est trop lourde pour être sortie de l'eau. Il faut alors une seconde enclave, à chaque tête, avec une porte de secours pour continuer à sasser. La porte est munie de ballasts vides pour en soulager le poids à déplacer.

Les portes de ce type s'accommodent parfaitement d'une inversion de la dénivelée (chaque redan comporte deux battées opposées) mais elles sont plus sensibles à la houle, en manœuvre, que les portes busquées.

4.2.3.5 Dispositif de remplissage et de vidange

Le remplissage et la vidange s'effectuent toujours par simple gravité, au moyen d'aqueducs fermés par des vannes, et contournant les enclaves ou traversant les portes. Le nombre et la section des aqueducs ainsi que la vitesse d'ouverture des vannes doivent permettre la mise à niveau en 15 à 20 min au maximum, mais les débouchés des aqueducs doivent faire l'objet d'une étude sérieuse pour que les efforts d'amarrage des navires dans le sas, dus au courant de remplissage ou de vidange, soient acceptables.

4.2.3.6 Accessoires des écluses

Pour assurer la sécurité des bajoyers et des navires au cours des manœuvres d'entrée et de sortie, et lors de petites oscillations des navires sous l'effet des courants, les bajoyers doivent avoir une arête supérieure arrondie et protégée ainsi que des défenses de protection sur les parties verticales du sas et des défenses d'embarquement à l'entrée.

Il faut prévoir également des bollards et des échelles. Éclairage, balisage, caméras de télévision et haut-parleurs sont aussi des accessoires indispensables pour l'exploitation.

4.2.4 Mode d'exécution

En raison de la complexité d'une écluse et notamment des têtes, ces dernières seulement, avec éventuellement le sas, sont toujours construites à sec :

- soit en place, à l'abri de batardeaux ou merlons, avec des pompages et rabattements d'entretien ;
- soit préfabriquées dans une forme de radoub à partir de laquelle elles sont transportées en flottaison puis échouées à leur emplacement définitif (cas de l'écluse de Boulogne en 1972 et de Honfleur en 1993).

4.2.5 Calcul

4.2.5.1 Sas

Dans un souci d'économie importante, la structure du sas et celle des portes ne sont en général pas dimensionnées pour résister à une mise à sec du sas.

Si les bajoyers du sas sont indépendants du radier, ils sont à calculer comme un quai en bassin marnant ; la composante horizontale de la réaction en pied peut être équilibrée par des butons.

Le radier doit alors être conçu pour résister aux sous-pressions ainsi qu'aux remous.

Quand le sas est constitué par un U monolithique en béton armé, un calcul d'ensemble par éléments finis en deux dimensions est nécessaire, prenant en compte, outre les pressions hydrauliques sur toutes les faces, les réactions élastoplastiques ou élastiques du sol derrière les bajoyers et sous le radier, quand la structure se déforme.

4.2.5.2 Têtes

La forme et les sollicitations d'une tête sont tridimensionnelles, de sorte que la modélisation de calcul par éléments finis doit l'être également.

4.2.5.3 Portes

Une étude de stabilité en flottaison de la porte coulissante doit être réalisée ; elle conditionne le lestage et l'épaisseur minimale du caisson.

Le dimensionnement résulte des efforts dus à la dénivelée maximale et à la houle sur la porte (charge trapézoïdale), dont l'ossature est composée d'un réseau de poutres croisées reliant les deux bordés :

- poutres horizontales appuyées sur les redans verticaux ;
- raidisseurs verticaux répartissant la charge sur les poutres.

Seul un calcul par éléments finis de l'ensemble tridimensionnel, associant ce réseau et les deux bordés, est acceptable aujourd'hui pour les très grandes portes.

4.3 Formes de radoub et docks flottants

Les grands ports modernes comportent en général un centre de réparation navale consistant au minimum en :

- une forme de radoub ou un dock flottant permettant la mise à sec d'un navire pour réparation ou entretien de la coque ;
- un poste de réparation à flot.

Les postes de réparation à flot sont des postes d'accostage assez classiques, sauf pour leur outillage, et ne justifient donc pas de présentation particulière. Les formes de radoub et les docks flottants sont présentés séparément car, malgré un rôle commun, leur conception et leur mode d'exploitation sont très différents.

4.3.1 Formes de radoub

4.3.1.1 Dimensions générales et conception d'ensemble

Une forme de radoub (figure 44), appelée aussi cale sèche, consiste en un bassin rectangulaire étanche, formé d'un radier et de bajoyers, construits en béton armé ou en palplanches métalliques, et ouvert à l'une de ses extrémités pour l'entrée du navire ; une porte, en général flottante, ferme hermétiquement cette entrée, on peut alors vider la forme par pompage. Le navire s'échoue lors du vidage sur les lignes de tins disposées sur le radier. Un navire est en général

sur ballast, c'est-à-dire avec un faible tirant d'eau, quand on l'entre en forme pour son entretien ; c'est donc en général la largeur et la longueur de la cale sèche qui définissent la taille maximale du navire pouvant être reçu, étant entendu que :

- la **largeur** intérieure entre bajoyers est toujours supérieure, de 5 à 10 m, à la largeur à l'entrée, pour faciliter le travail dans la forme ;
- la **longueur** de la forme doit également dégager une marge d'une dizaine de mètres pour travailler aisément sur le bulbe ou sur le gouvernail ou l'hélice.

Cependant, si le navire est chargé mais doit entrer en forme rapidement, pour être réparé après un accident par exemple, c'est son tirant d'eau qui peut conditionner l'accès en forme : entrée à pleine mer de préférence ;

- la **profondeur** d'une forme est définie par la hauteur d'eau au-dessus de la face supérieure des tins, au moment de l'entrée.

Pour travailler aisément sous la coque, la hauteur minimale recommandée pour les tins est de 1,80 m. Outre les tins et les installations de vidange et remplissage (caniveaux, pompes et aqueducs), une forme de radoub doit comporter de nombreux équipements, en général disposés le long des bajoyers :

- grues de manutention sur rails ;
- dispositifs de halage des navires, cabestans ;
- bollards ;
- défenses ;
- alimentation en eau, électricité, air comprimé, etc. ;
- échelles et escaliers d'accès, parfois rampe (pente 10 %) pour l'accès de véhicules jusqu'au radier.

4.3.1.2 Structure d'une forme de radoub

Une forme de radoub est un ouvrage dont l'infrastructure est comparable à celle d'une écluse :

- les **bajoyers** et le **radier** sont soumis, lorsque la forme est vide d'eau, à des poussées hydrostatiques et des sous-pressions encore plus importantes que pour une écluse, en général non asséchable ;

- la **tête**, sur laquelle s'appuie la porte en position fermée (forme vide) est particulièrement sollicitée ;

- les **lignes de tins** doivent être fondées sur le radier lui-même ou sur pieux, pour supporter, avec tassements compatibles avec la coque, les charges importantes et très variables apportées par le navire (ballasts pleins ou vides et compartiments chargés ou non).

La construction d'une forme exige des reconnaissances géotechnique et hydrogéologique préalables approfondies du site retenu, dont les résultats ont une influence majeure sur le choix de la structure, ainsi que sur le mode et le coût de construction :

- un **sol rocheux** conduit à une structure économique, sous réserve du coût de l'excavation et de l'obturation des fissures éventuelles avec venues d'eau ;

- en présence de couches de **sols imperméables** au-dessous du radier, la solution économique consiste en un radier en béton armé de faible épaisseur (de l'ordre du mètre) ou simplement constitué de dalles en béton, dit **radier drainé** (figure 45), au-dessous duquel un réseau de drains collecte par pompage permanent ou intermittent les venues d'eau, pour empêcher le développement de sous-pressions tout au long de la vie de l'ouvrage ; de plus, des clapets de sécurité, débouchant dans la cale au travers du radier doivent être prévus pour évacuer des sous-pressions accidentelles. Un rideau para fouille au périmètre du radier réduit encore le débit à pomper ;

- si les **sols sous-jacents** sont **perméables**, le débit à pomper sous le radier durant toute la vie de l'ouvrage ne serait pas acceptable du point de vue économique ; de plus, il pourrait conduire, par rabattement permanent de la nappe, à des tassements dangereux pour l'environnement. On est alors conduit à la conception par **radier-poids** (de plusieurs mètres d'épaisseur, et associant le poids des bajoyers) ou **ancré** dans le sol sous-jacent, pour résister aux sous-pressions. Dans l'hypothèse de sols perméables, la forme peut, ou bien être fabriquée et amenée par flottaison et échouée dans une souille draguée, ou bien être construite à sec dans une souille asséchée par de puissants pompages ou abritée plus ou moins partiellement des venues d'eau par des écrans para fouilles.

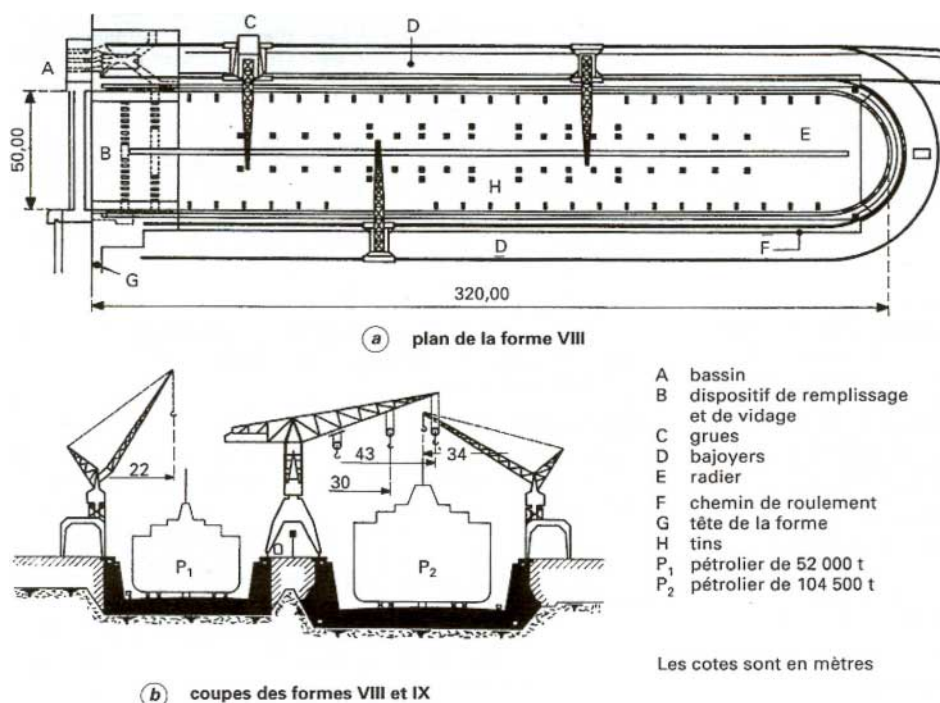


Figure 44 - Formes de radoub. Port de Marseille

Le rapport de l'AIPCN (cf. Pour en savoir plus [Doc. C 4 640]) présente de nombreuses conceptions et modes d'exécution selon les conditions locales rencontrées.

4.3.1.3 Dispositifs de vidage et de remplissage

Pour les cales sèches de réparation navale, la vidange doit pouvoir être réalisée en 1 heure et demie à 4 heures au maximum ; cela détermine la fourchette de puissance de la station de pompage principale qui comporte toujours au moins deux groupes motopompes, le plus souvent d'axe vertical à hélice noyée et avec refoulement par siphon (pour éviter les clapets de retenue). Cette station est en général implantée près de l'entrée de la cale sèche afin de réduire la longueur du système d'aqueducs d'évacuation.

En plus des pompes principales, il est nécessaire de disposer de pompes de drainage capables d'évacuer le débit des venues d'eau par le radier, des fuites de la porte et des eaux de pluie.

Le remplissage utilise la gravité ; il s'opère parfois au travers de la porte, avec des vannes papillon.

4.3.1.4 Porte

Sa manœuvre doit se faire normalement en une dizaine de minutes, à partir du moment où le niveau d'eau dans la forme a atteint le niveau extérieur ; il est intéressant de pouvoir commencer la manœuvre avant cet équilibre (avec dénivellée de 5 à 10 cm), pour gagner du temps.

Il existe plusieurs conceptions pour la porte et son mécanisme de fonctionnement ; on distingue :

- les **portes flottantes** dites aussi **bateaux-portes**, de forme rectangulaire ou trapézoïdale en élévation ; la quille est échouée dans une rainure en position de fermeture ; le bateau-porte est mis en flottaison (par déballastage) pour la manœuvre, qui se fait par halage ou remorquage ;
- les **portes-caissons coulissantes ou roulantes** : le caisson n'est pas mis en flottaison, mais seulement soulagé, pour faciliter son déplacement (grâce à un treuil), par déballastage d'eau ; la manœuvre est plus simple et plus rapide que dans le cas précédent ;

— les **portes busquées**, en général à deux vantaux, manœuvrables par vérins hydrauliques (§ 4.2.3.4) ;

— les **portes abattantes** articulées autour d'un axe horizontal situé sur le seuil de la cale. En position ouverte, la porte est horizontale et entièrement au-dessous du niveau de l'axe d'articulation pour permettre le passage des navires au-dessus d'elle, ce qui nécessite une surprofondeur, qu'il faut entretenir contre l'envasement. La manœuvre se fait par treuil et câble, après avoir rendu la porte semi-flottante pour réduire les efforts.

4.3.2 Docks flottants

4.3.2.1 Dispositions générales

Un dock flottant (figure 46) comporte un flotteur horizontal (radier), sur lequel le navire repose par des lignes de tins, et deux bajoyers latéraux qui assurent la rigidité longitudinale et la stabilité de flottaison en manœuvre et qui supportent les outillages. Il est ouvert à ses deux extrémités pour permettre l'entrée et la sortie du navire.

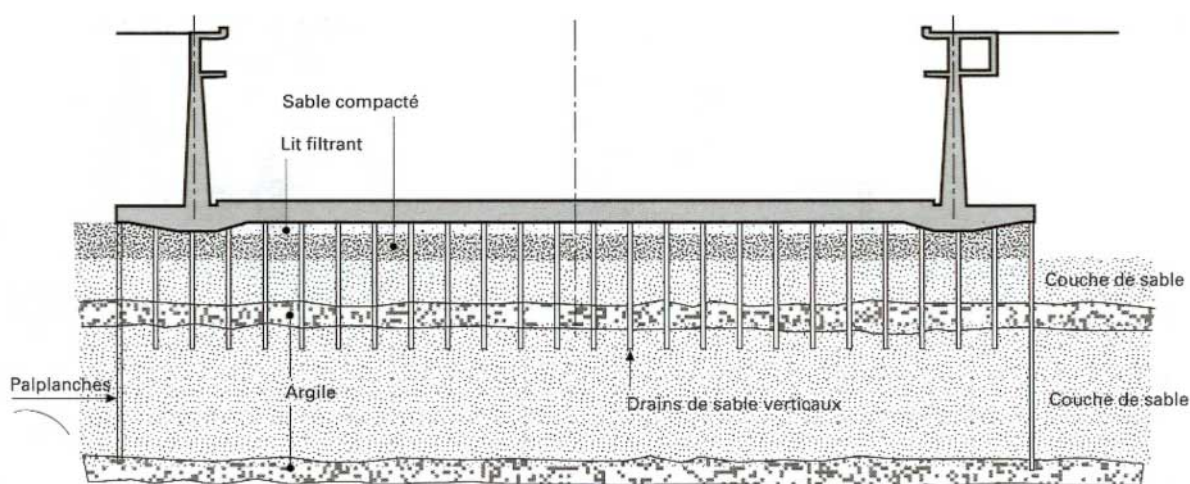
Pour l'entrée du navire (ou pour sa remise en eau pour sortie du dock), le dock est immergé par remplissage de caissons étanches, de façon à obtenir une hauteur d'eau au-dessus des tins supérieure au tirant d'eau du navire à entrer (ou à sortir).

Le tirant d'eau du dock est alors maximal (17 m pour le dock flottant de la figure 46, qui offre alors un tirant d'eau disponible au-dessus des tins de 9,75 m), ce qui nécessite éventuellement le dragage d'une souille au droit de son emplacement.

En vidangeant les caissons étanches, le dock émerge lentement (durée 3 h pour le dock flottant du Havre à charge maximale) en soulevant le navire jusqu'à le mettre complètement à sec (le franc-bord minimal du radier du dock du Havre est de 0,50 m ; l'épaisseur du radier étant de 5,50 m, le tirant d'eau du dock émergé chargé est donc d'au plus 5 m).

Les **caractéristiques essentielles** d'un dock flottant sont :

- sa force de levage maximale, qui correspond au déplacement du navire qui peut être soulevé, ce navire étant en général léger ;
- sa largeur intérieure entre bajoyers.



Les deux couches de sable sont liées par des drains de sable verticaux, car le fond de la couche d'argile supérieure est trop élevé, pour équilibrer les sous-pressions émanant de la pression exercée par l'eau sous cette couche.

Figure 45 – Forme de radoub à radier drainé

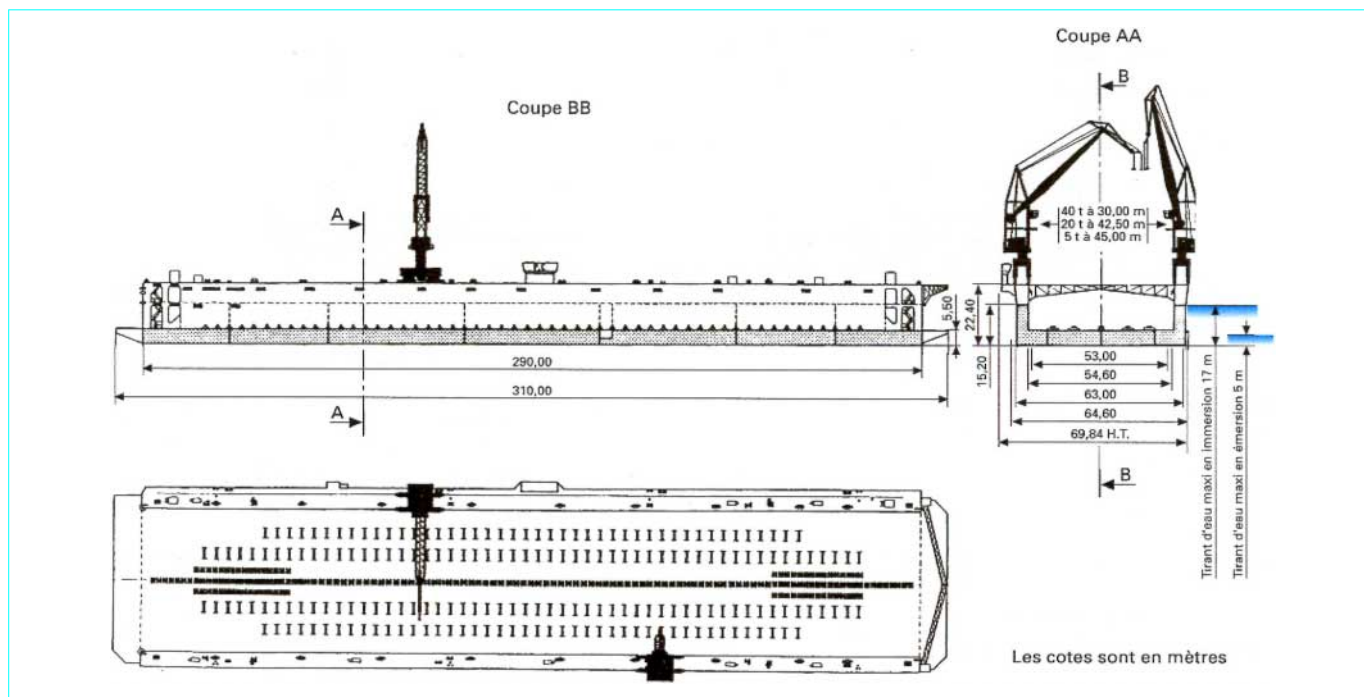


Figure 46 – Dock flottant de 50 000 t de force de levage. Port autonome du Havre

Le dock flottant du Havre, avec ses 50 000 t de force de levage (dans des conditions normales d'exploitation) et ses 53 m de largeur intérieure peut normalement recevoir des navires légers de 170 000 tpl et exceptionnellement jusqu'à 200 000 tpl.

Les formes avant et arrière des navires peuvent dépasser le radier, mais la quille doit reposer intégralement sur la ligne de tins.

Un dock flottant peut être déplacé à l'intérieur d'un port, et même d'un port à un autre, selon l'évolution du marché de la réparation navale ; il ne faut cependant pas perdre de vue qu'avec le dock proprement dit, muni de ses propres équipements, il faut des **équipements complémentaires**, qui eux ne sont pas mobiles :

- la souille d'immersion, déjà citée ;
- les appuis de guidage et de tenue du dock, autrefois constitués de chaînes et de corps morts, doivent être conçus pour résister aux efforts transmis par le dock soumis au vent dans les conditions les plus défavorables (avec navire à sec ou vide et tirant d'eau minimal). Ces appuis sont maintenant souvent constitués par des ducs-d'Albe en acier ou des caissons en béton armé ou en palplanches plates. Les liaisons avec le dock, constituées par exemple de colliers coulissant sur des tubes, doivent permettre les mouvements verticaux du dock en manœuvre d'immersion ou d'émersion et ceux dus au marnage du bassin ;
- une voie d'accès, pour le personnel, les camions et autres engins, permettant de relier la berge au radier ; il s'agit en général d'un pont métallique articulé côté terre et posé sur le radier, avec un dispositif de maintien hors d'eau quand le radier est immergé. Des passerelles articulées sont également nécessaires pour l'accès des piétons entre la berge et la crête des bajoyers ;
- un duc-d'Albe pour le guidage de l'embarquement du navire à son entrée dans le dock.

4.3.2.2 Conception des docks flottants

Les docks flottants modernes sont construits en acier soudé, comme un navire, dans un chantier de construction navale, et achevés à flot. Le radier et les bajoyers sont caissonnés. La rigidité

longitudinale et transversale est très importante afin d'absorber, sans déformation excessive pour les navires, les irrégularités importantes des charges des tins. La répartition des charges dépend d'ailleurs des rigidités respectives du navire et du dock ; en certaines sections, notamment aux extrémités du navire, une ligne de tins peut transmettre une charge atteignant 300 t/m sur le radier du dock flottant du Havre.

La structure de ce dock a une masse de 17 000 t ; le dock entièrement équipé pèse 25 000 t. La structure doit être protégée contre la corrosion ; on utilise la protection cathodique pour les parties constamment immergées.

4.3.2.3 Équipements des docks flottants

Le **ballastage** et le **déballastage** (le volume total des 28 caissons du dock du Havre est de 119 000 m³, vidables par 10 pompes) sont contrôlés depuis un poste de commande centralisé.

Un ordinateur permet les simulations de manœuvre ; des capteurs fournissent en temps réel toutes les informations utiles (tirants d'eau avant et arrière, moment de flexion et contraintes, stabilité, etc.) permettant d'optimiser les opérations de ballastage et de déballastage.

C'est au cours des manœuvres d'émersion et d'immersion que la stabilité de flottaison est la plus difficile à assurer.

Les **tins** peuvent être déplacés le long des lignes, pour en adapter le nombre en fonction du poids des tranches de navire ; les cales supérieures, en bois dur, doivent également pouvoir être réglées facilement en hauteur.

Des **réseaux d'eau douce**, d'eau de mer, d'**air comprimé** et d'**énergie électrique** distribuent ces produits sur le dock.

Des **défenses de bajoyers** et des **dispositifs d'amarrage** assurent la sécurité des manœuvres du navire.

Un **dispositif par ultrasons**, disposé dans plusieurs profils du dock, facilite le positionnement transversal du navire, juste avant l'échouage.

Des **outillages pour les manutentions** sont disposés en crête des bajoyers.

Des **bureaux, ateliers, locaux sanitaires, infirmeries**, etc. sont prévus dans les bajoyers.

4.4 Divers

Il n'est pas possible de traiter d'une façon exhaustive tous les ouvrages qui peuvent s'intégrer dans un aménagement portuaire.

Il faut cependant mentionner la catégorie importante des **ouvrages de rétablissement des communications terrestres** que les coupures

constituées par les plans d'eau portuaires nécessitent de réaliser. On peut distinguer les liaisons continues et les liaisons discontinues.

Les liaisons continues sont constituées soit de tunnels, soit de ponts fixes. Dans les deux cas, des profondeurs ou des tirants d'air importants sont nécessaires pour ménager les intérêts de la navigation. Ces ouvrages, qui ne gênent pas la circulation terrestre, sont cependant onéreux.

Les liaisons discontinues, moins onéreuses, occasionnent cependant des interruptions pour la circulation terrestre. Il s'agit de bacs, principalement sur les coupures importantes. Pour les coupures moins importantes, des ponts mobiles sont utilisés : ponts tournants, ponts basculants, ponts roulants ou ponts levants.

Ports de commerce et de pêche

Aménagement et équipements intérieurs

par **Pierre BONAFIOUS**

Ingénieur Civil des Ponts et Chaussées

Ancien Chef du Service des Études techniques du Port Autonome du Havre

Xavier LE BARS

Ingénieur des Travaux Publics de l'État

Chef du Service des Études techniques du Port Autonome du Havre

et **Francis LEGRAS**

Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Chef du Service technique de l'Outillage du Port Autonome du Havre

Bibliographie

Rapports des Congrès Internationaux de Navigation (AIPCN) et en particulier :

- congrès d'Édimbourg en 1981 ;
- congrès de Bruxelles en 1985 ;
- congrès d'Osaka en 1990 ;
- congrès de Séville en 1994.

Rapports des Commissions Internationales de l'AIPCN :

- rapport de la Commission Internationale pour l'amélioration de la conception des systèmes de défenses (AIPCN, supplément de 145 pages au bulletin n° 45-1984) ;
- rapport de la Commission Internationale pour l'étude des écluses (AIPCN, supplément de 449 pages au bulletin n° 55-1986) ;

— rapport de la Commission d'Étude sur les cales sèches (AIPCN, supplément de 100 pages au bulletin n° 63-1988).

ARISTAGHES (P.), LEBRETON (P.) et VANSTEEN-KISTE (F.). — *Calcul des portes d'écluses maritimes*. Pages 83 à 107 du bulletin n° 52 de l'AIPCN (1986).

HOUY (A.). — *Calcul des ouvrages en palplanches métalliques*. Wendel-Sidelor. Metz (1970).

GRENIER (G.). — Conférences sur les ouvrages maritimes, à l'IPER du Havre et au CHEC.

Lignes directrices et recommandations sur la sécurité de l'amarrage des grands navires aux appontements et dans les îles artificielles. Manuel en anglais, réalisé et publié par l'OCIMF. Londres (1978).

GRAILLOT (A.). — *Travaux maritimes*, tomes 1, 2 et 3. Cours de l'ENTPE.

GRAILLOT (A.). — *Cours de travaux maritimes*, tome 4, édité par l'IPER.

Code of practice for maritime structures (BS 6349). British Standard Institute.

BRUUN (Per) et al. — *Port engineering*. Gulf Publishing Co. Houston (1981).

Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil. Fascicule 62, titre V du CCTG (1992).

Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways. EAU 1990. Éditeur Ernst and Sohn. Verlag für Architektur und technische Wissenschaften. Berlin

Réglementation

Il n'existe pas de norme ou règlement français ou international, spécifique à la conception des ouvrages d'infrastructure portuaire. Il n'y a que les DTU, les CCTG applicables aux ouvrages de génie civil en général et les Eurocodes.

Par contre, de nombreux organismes nationaux ou internationaux, cités à la rubrique *Organismes* ont établi des recommandations pour ces ouvrages.

Organismes

AIPCN/PIANC Association Internationale Permanente des Congrès de Navigation/Permanent International Association of Navigation Congresses.

AIPH/IAPH Association Internationale des Port et Havres. International Association of Ports and Harbours.

OCIMF Oil Companies Internationales Marine Forum.

IMO/OMI International Maritime Organization/Organisation Maritime Internationale.

FEM Fédération Européenne de la Manutention.

AIVP Association Internationale des Villes et Ports.

STCPMVN Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables. Ministère de l'Équipement.

IPER Institut Portuaire d'Enseignement et de Recherche du Havre.