

Principes d'implantation et d'aménagement

par **Daniel CAMINADE**

Ingénieur civil des Ponts et Chaussées. Docteur en Génie civil

Maître de conférences et Responsable de la Maîtrise de Génie civil à l'Université du Havre

1. Définition et rôle des ports maritimes	C 4 630	2
1.1 Définition	—	2
1.2 Rôle des ports maritimes.....	—	2
1.2.1 Ports à fonction unique ou principale.....	—	2
1.2.2 Ports à fonctions diversifiées ou multiples	—	3
1.2.3 Ports de transbordement	—	5
2. Éléments à prendre en compte	—	5
2.1 Environnement socio-économique.....	—	5
2.1.1 Définition des trafics.....	—	5
2.1.2 Contexte économique local	—	5
2.1.3 Données démographiques.....	—	5
2.1.4 Contexte social.....	—	5
2.1.5 Position géographique du port.....	—	5
2.1.6 Moyens de transfert des informations.....	—	5
2.1.7 Évolutions à court et à moyen terme.....	—	5
2.2 Environnement physique.....	—	6
2.2.1 Topographie	—	6
2.2.2 Bathymétrie.....	—	6
2.2.3 Géologie et géotechnique.....	—	6
2.2.4 Océanographie.....	—	6
2.2.5 Sédimentologie.....	—	6
2.2.6 Sismicité	—	6
2.2.7 Évolutions prévisibles	—	6
2.3 Conclusion.....	—	6
3. Solutions possibles	—	7
3.1 Diverses implantations géographiques	—	7
3.1.1 Ports intérieurs.....	—	7
3.1.2 Ports extérieurs.....	—	7
3.1.3 Ports détachés du rivage.....	—	7
3.1.4 Évolution des ports	—	8
3.2 Élaboration du plan de masse	—	8
3.2.1 Accès.....	—	8
3.2.2 Ouvrages de protection contre la houle	—	8
3.2.3 Aménagement intérieur des ports	—	8
4. Aménagements particuliers aux ports intérieurs	—	9
4.1 Aménagement de la partie fluvio-maritime (estuaire)	—	9
4.1.1 Régimes hydrauliques d'un estuaire	—	9
4.1.2 Bouchon vaseux	—	9
4.1.3 Aménagement des estuaires stratifiés	—	10
4.1.4 Aménagement des estuaires bien mélangés	—	10
4.2 Aménagement de la partie fluviale	—	11
4.2.1 Principes généraux	—	11
4.2.2 Aménagement des fleuves sans marée.....	—	11
4.2.3 Aménagement des fleuves avec marées	—	11
Pour en savoir plus	—	11

Doc. C 4 630

La conception et la réalisation d'un port maritime constituent une tâche difficile mais passionnante car elle fait appel à un travail d'équipe pluridisciplinaire.

Pendant qu'une partie de l'équipe recueille et étudie les données sociales et économiques du projet, portant notamment sur :

- les trafics potentiels ;
- l'environnement du transport maritime ;
- les évolutions prévisibles à moyen et à long terme ;
- l'autre partie réalise les études techniques.

Le but de ces études est de proposer des solutions adéquates en vue de :

— sélectionner le site présentant le meilleur compromis entre les divers impératifs et contraintes ;

— retenir un parti d'aménagement général se traduisant par l'élaboration d'un plan de masse initial complété par d'éventuelles variantes et par les phases ultérieures ;

— réaliser non seulement les infrastructures portuaires, mais aussi les autres infrastructures de transport (routes, autoroutes, voies ferrées, voies navigables...) nécessaires au bon fonctionnement du port ;

— doter le port des moyens les plus appropriés pour traiter, le plus efficacement possible, les divers trafics et les informations nécessaires au commerce national et international.

Le présent article ne peut, bien entendu, être dissocié de l'article **Ports de commerce et de pêche. Aménagement et équipements intérieurs** [C 4 640].

En effet, comment imaginer que les dispositions adoptées pour l'aménagement intérieur soient sans conséquences sur le tracé des ouvrages extérieurs et réciproquement ?

Toutes les étapes de la conception devront donc être menées de front, de façon que les décisions prises quant à la politique d'aménagement soient intégrées au mieux dans le projet.

1. Définition et rôle des ports maritimes

1.1 Définition

Un port est un endroit géographique par lequel transitent des marchandises et/ou des passagers. La dénomination du port dépend du mode de transport retenu : aéroport, port fluvial, port maritime et, par extension, téléport pour le transit des données informatisées.

Un port maritime est un port qui accueille des navires de mer : ainsi des ports situés à l'intérieur des terres tels que Anvers sur l'Escaut, Rouen sur la Seine, Nantes sur la Loire, sont des ports maritimes.

1.2 Rôle des ports maritimes

Le port est un maillon de la chaîne de transport et permet d'assurer le passage d'un mode de transport maritime à un mode de transport terrestre.

Avant d'envisager l'implantation et l'aménagement d'un port, il est nécessaire de bien identifier les fonctions que l'on désire voir assurer par ce port. Il faut donc se poser la question essentielle : un port, pour quoi faire ?

De la réponse à cette question découlera tout le reste, y compris le parti d'aménagement.

1.2.1 Ports à fonction unique ou principale

Un certain nombre de ports maritimes assurent exclusivement, ou presque, une seule fonction, soit parce qu'ils n'assurent qu'un seul type de service, soit parce qu'ils ne permettent de recevoir qu'un seul type de navire.

La localisation du port et le choix des aménagements s'en trouvent grandement facilités.

Parmi les nombreux ports à fonction unique, quelques-uns méritent un examen particulier.

1.2.1.1 Ports minéraliers

Les ports minéraliers ou charbonniers ont pour rôle essentiel, soit de charger les marchandises extraites des mines, en vrac à bord des navires, soit de les décharger.

Bien des ports de chargement ont pour seule activité ce type de trafic. Ils sont, en général, implantés dans des zones qui permettent à la fois un accès maritime aisément et un acheminement terrestre facile.

Le port de Nouadhibou, situé à l'extrémité d'une ligne de chemin de fer longue de plusieurs centaines de kilomètres, qui permet à la Mauritanie d'exporter son minerai de fer, ne vit que grâce à cette activité.

À l'inverse, la réception de minerai se fait dans des terminaux spécialisés, intégrés dans des ports à vocation diversifiée dans la mesure où ces ports exportent des produits finis ou semi-finis, souvent fabriqués sur le site même, en faisant appel aux techniques traditionnelles des ports de commerce (Marseille-Fos, Dunkerque).

1.2.1.2 Ports pétroliers

Ces ports nécessitent de très larges espaces pour permettre l'évolution de grands navires pouvant atteindre 500 000 tpi (tonnes de port en lourd), tout en leur offrant des profondeurs importantes qui peuvent parfois dépasser 30 m. Le respect de ces contraintes limite considérablement le choix des sites possibles.

Les ports pétroliers peuvent être classés en plusieurs catégories suivant la position qu'ils occupent au sein de la chaîne de production des produits raffinés.

■ Ports d'expédition

Leur rôle est de charger à bord des navires le pétrole brut extrait des champs pétroliers. Leur implantation est située au plus près des lieux de production. Les installations peuvent être constituées :

- de simples bouées de chargement ;
- d'appontements spécialisés tels que ceux de Ra's Tannur (Arabie Saoudite) ;
- de structures offshore sophistiquées comprenant des installations de stockage en mer comme à Ekofisk (cf. article *Développement d'un champ pétrolier en mer* [C 4 670] dans ce traité).

■ Ports de raffinerie

Ils ont pour but de recevoir le pétrole brut destiné aux raffineries mais, surtout, de pouvoir réexpédier les produits raffinés.

Ils sont, presque toujours, implantés à proximité immédiate des raffineries qu'ils desservent.

À titre d'exemple, on peut citer le terminal pétrolier de la Pointe Limbou à proximité de la raffinerie de Victoria (Cameroun) ou les nombreux terminaux liés aux raffineries destinées à l'approvisionnement des États-Unis, qui sont situés sur la route des navires entre les zones de production et les zones de consommation.

■ Ports de réception

Leur rôle est de recevoir le pétrole brut, parfois les produits raffinés, et de les réexpédier vers les lieux de transformation ou de consommation.

Le port du Havre-Antifer, bien qu'il fasse partie d'un ensemble portuaire à vocation diversifiée, est un exemple de ce type de port.

1.2.1.3 Ports militaires

L'implantation des ports militaires répond à des critères essentiellement stratégiques, tout en respectant des impératifs techniques tels que la dimension des plans d'eau nécessaire à la bonne évolution des navires.

Citer le nom des plus célèbres d'entre eux suffit pour illustrer leur fonction stratégique : Cherbourg, Brest, Toulon pour la France, mais aussi Gibraltar, La Valette, Vladivostock, Djibouti, Pearl Harbor, Scapa Flow...

1.2.1.4 Ports à passagers

Aujourd'hui, leur rôle est réduit au trafic sur courtes distances ou au trafic des voyageurs désirant emmener leur véhicule. Ce trafic est, essentiellement, assuré par des car-ferrries ou des aéroglisseurs.

L'implantation de ces ports est bien évidemment dictée par de considérations géographiques : Calais, Douvres, Tanger...

L'aménagement de ces ports, dont le trafic peut représenter comme à Calais quelque 10 millions de passagers par an, fait appel à des solutions particulières décrites dans l'article *Ports de commerce et de pêche. Aménagement et équipements intérieurs* [C 4 640] du présent traité.

1.2.1.5 Ports de pêche

Le rôle de ces ports est de gérer l'ensemble des activités liées à la pêche et à la commercialisation du poisson. Les différentes phases concernent la réception du poisson, son traitement, son condition-

nement sous les formes les plus variées, sa commercialisation et, enfin, son expédition vers les lieux de consommation.

Suivant que l'une ou l'autre des fonctions est prédominante, le port est implanté près des lieux de pêche (Saint-Pierre à Terre-Neuve) ou plutôt près des lieux de consommation (Boulogne mais aussi Concarneau ou Port-Vendres). Dans ce dernier cas, une attention toute particulière doit être accordée au réseau des liaisons terrestres et commerciales.

1.2.1.6 Ports de plaisance

Les installations des ports de plaisance ont pour but de procurer aux plaisanciers des prestations leur permettant de profiter au mieux de leur séjour ou de leurs loisirs. Il s'agit donc de ports à forte valeur ajoutée tertiaire.

Ils sont, de ce fait, implantés dans des zones dont la vocation touristique a été clairement annoncée : La Rochelle, Deauville, Monaco, Miami...

Ces ports sont très souvent incorporés dans des complexes immobiliers qui viennent compléter les services offerts à la clientèle et participer à la rentabilité financière de ce type de port.

Pour plus de détails, on pourra se reporter à l'article spécialisé du présent traité.

1.2.1.7 Leur évolution

La pérennité de tels ports à fonction unique ou principale est liée au maintien de l'activité de base et est, de ce fait, relativement fragile. C'est pourquoi de nombreux ports cherchent à se diversifier de façon à répartir les risques tout en accroissant leur surface commerciale.

1.2.2 Ports à fonctions diversifiées ou multiples

Ces ports sont les plus nombreux et ils assurent des fonctions très variées, notamment commerciales.

Ils tiennent alors un rôle de marché :

- cafés à Londres et au Havre ;
- produits pétroliers à Rotterdam...

Ces ports, généralement très anciens, sont implantés au carrefour des grandes routes commerciales traditionnelles.

Les principes d'implantation et d'aménagement de ces ports sont exposés ci-après mais on peut, d'ores et déjà, constater que leur réussite s'appuie, de fait, sur un certain nombre de facteurs essentiels favorables parmi lesquels on peut citer :

- leur implantation à l'entrée d'une zone d'intense activité économique ;
- leur excellent réseau de moyens de communications terrestres et, depuis peu, leur système de communication d'informations informatisées.

Rotterdam, sur la Leyde, dans le delta commun à la Meuse et au Rhin, Anvers sur l'Escaut, alimentent, grâce au réseau de communications très dense de l'Europe du Nord, la région la plus peuplée et la plus industrielle de l'Europe occidentale (figure 1).

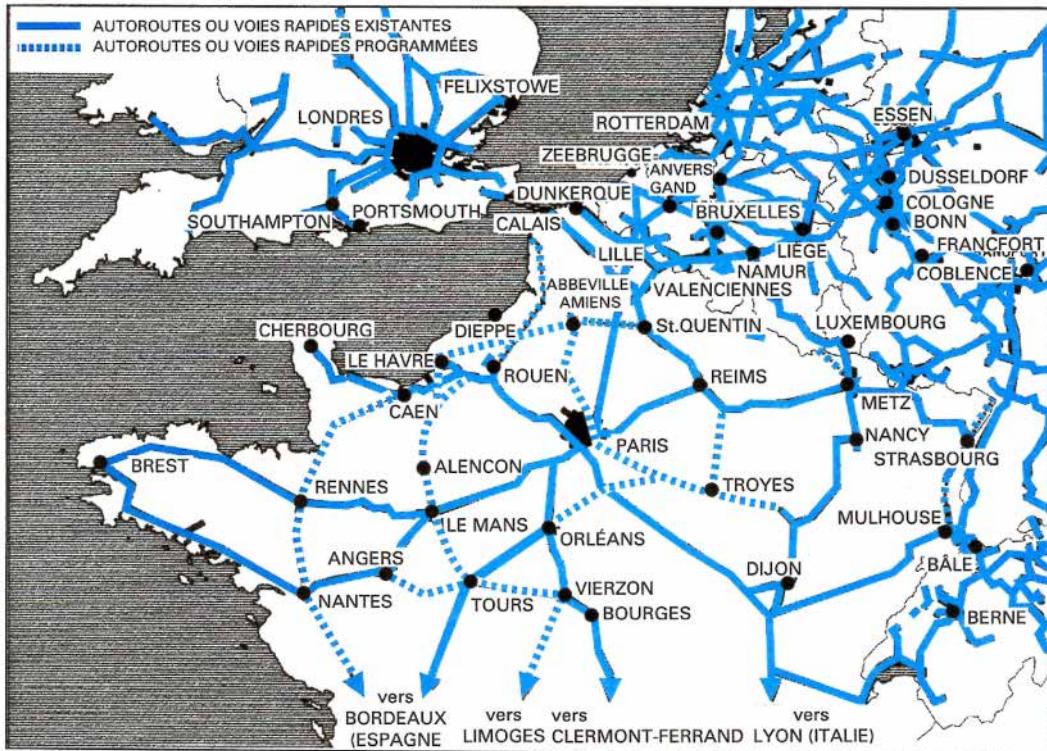
Le Havre, à l'embouchure de la Seine, dessert la région parisienne ainsi que les zones industrielles de la Basse-Seine.

New York, sur l'Hudson River est la porte d'entrée du Nord-Est des États-Unis et d'une partie du Canada.

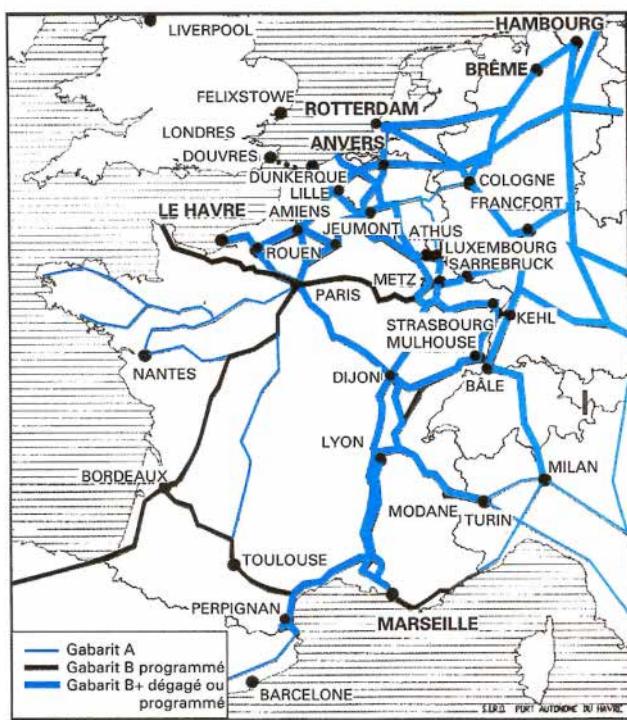
Singapour s'appuie sur son marché intérieur et sert de plaque tournante pour toute cette région de l'Asie du Sud-Est.

La caractéristique commune à tous ces ports est de s'appuyer sur un hinterland susceptible de contribuer fortement à leur développement.

LIAISONS AUTOROUTIÈRES



GABARITS FERROVIAIRES EUROPÉENS



GRANDES VOIES D'EAU EUROPÉENNES

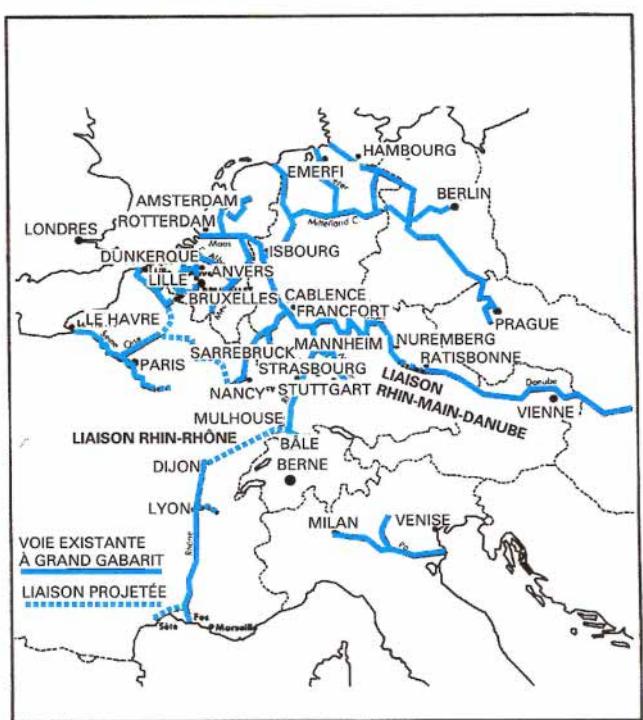


Figure 1 – Réseaux de communications de l'Europe du Nord-Ouest

1.2.3 Ports de transbordement

Ces ports sont aussi appelés **ports d'éclatement**.

Pendant longtemps, on a pensé que la position géographique favorable d'un site portuaire pouvait permettre d'envisager de créer des ports dont la seule activité était constituée par le transbordement des marchandises.

Cette activité de type purement commercial est très vulnérable et ces ports n'ont qu'une existence très éphémère s'ils ne s'appuient pas sur des activités propres et diversifiées.

Actuellement, les ports qui ont une réelle activité de transbord sont ceux qui jouissent d'une intense activité commerciale tels que ceux cités ci-dessous.

2. Éléments à prendre en compte

2.1 Environnement socio-économique

Ces études ont pour objectif l'examen de la faisabilité économique et industrielle du projet.

2.1.1 Définition des trafics

Ces études vont permettre de préciser la ou les fonctions principales du port. Elles ont pour but de définir les trafics à prendre en compte pour l'élaboration du projet. Pour cela on déterminera avec le plus de précision possible pour chacun des trafics envisagés :

- la nature précise du trafic ;
- le volume engendré dans chaque sens (import ou export) ;
- la taille des navires ;
- l'importance de chaque escale...

En effet, il est très différent, même pour un trafic global équivalent, de recevoir chaque semaine un navire porte-conteneurs transocéanique pour une escale de 1 500 conteneurs, ou un ensemble de 25 petits navires (tels que des feeders) assurant chacun une escale de 60 conteneurs.

De plus, on estimera, avec autant de précision que possible, les évolutions probables et prévisibles de ce trafic : volume de trafic, taille des navires, fréquence et sens des escales.

2.1.2 Contexte économique local

On s'attachera à définir au mieux le contexte économique local, essentiellement dans le but de quantifier correctement les interactions entre le port et son environnement immédiat.

Une zone en plein essor économique sera un facteur très positif pour le développement du port, alors qu'à l'inverse un port dynamique sera un facteur favorable pour la région avoisinante, notamment si celle-ci se trouve confrontée à des difficultés économiques.

2.1.3 Données démographiques

Un port ne peut fonctionner correctement que s'il s'appuie sur une main-d'œuvre qualifiée et suffisamment abondante qui, en retour, participera à l'essor du port par son activité et grâce aux consommations induites.

Planter un port dans une zone à forte démographie constitue un atout essentiel pour celui-ci, car il bénéficiera de toutes les infrastructures existantes.

Par contre, créer un port dans un désert humain demande de résoudre de très nombreux problèmes liés aux déplacements inévitables de la population nécessaire à la vie du port. Il faut alors créer non seulement toutes les installations portuaires, mais aussi toutes les infrastructures d'accompagnement : dessertes terrestres, réseaux divers (eau, énergie, télécommunications), logements, commerces locaux, équipements sociaux, etc.

Cette analyse va permettre de fournir des indications précieuses pour le choix du site portuaire.

2.1.4 Contexte social

Comme toute activité humaine, l'activité portuaire a besoin, pour se développer, d'une certaine tranquillité qui se traduit, en général, par une certaine paix sociale. Mais celle-ci n'est pas toujours suffisante, en particulier dans les zones sujettes à des tensions internationales ou même à des conflits : c'est ainsi que l'expansion du port de Beyrouth a été considérablement ralenti ces dernières années.

Par ailleurs, l'activité portuaire requiert une main-d'œuvre hautement spécialisée. La profession de docker a beaucoup évolué ces dernières années et les ouvriers du port sont devenus de véritables spécialistes de la manutention portuaire. Les nombreuses professions dont l'activité est liée au port (pilotes, marins du remorquage, lamaneurs, assureurs maritimes, transitaires, consignataires de navires, officiers de port, douaniers, etc.), utilisent des employés très qualifiés.

Lors des études d'implantation du port, on devra vérifier que l'on dispose de la main-d'œuvre voulue en nombre et qualité. Faute de quoi, il faudra prévoir des mesures correctives, telles que la formation complémentaire, et en chiffrer le coût et les impacts.

2.1.5 Position géographique du port

L'étude d'implantation du port ou du choix de site doit tenir compte de la position du projet par rapport :

- aux liaisons terrestres existantes ou prévues à court terme ;
- aux routes maritimes ;
- aux zones d'activité desservies par le port.

La notation d'hinterland revêt, ici, toute son importance : le port ne peut remplir correctement son rôle que s'il est bien situé par rapport à la chaîne de transport dont il fait partie.

2.1.6 Moyens de transfert des informations

Un port est un grand consommateur d'informations. La bonne gestion des équipements demande, par exemple, de connaître la date d'arrivée des navires, le volume des manutentions à réaliser, la nature des marchandises si celles-ci sont considérées comme dangereuses, etc.

Le traitement des informations douanières ou commerciales nécessite la mise en place de réseaux de traitement des données informatisées. Ces réseaux doivent, pour être efficaces, être reliés entre eux tout en assurant la confidentialité des informations.

Un port doit donc pouvoir bénéficier de ces techniques modernes de gestion commerciale, ce qui suppose de bonnes installations de télécommunications.

2.1.7 Évolutions à court et à moyen terme

Sauf cas très particulier, on construit un port pour plusieurs dizaines d'années voire plusieurs siècles, et il est donc nécessaire de prévoir les évolutions possibles. On peut imaginer plusieurs scénarios de développement qui se traduiront, au niveau technique, par autant de variantes.

On tiendra compte à la fois des modifications techniques du transport maritime telles que la taille des navires ou la modification des routes maritimes, mais aussi des modifications de type économique susceptibles d'intervenir.

2.2 Environnement physique

Les études vont permettre de recueillir les données nécessaires au choix du site, dans un premier temps, puis à l'établissement de l'avant-projet et, enfin, à la réalisation du projet final.

Ces études seront donc conduites par phases successives avec une précision croissante. En effet, compte tenu du coût important de ces études, on commencera par des reconnaissances globales pour terminer, sur la zone choisie, par les études de détail.

2.2.1 Topographie

On se reporterà à l'article *Topographie. Topométrie. Géodésie* [C 5 010] de ce traité.

Les premiers relevés à grande échelle, éventuellement complétés par des photographies aériennes, permettront de se faire une idée de la capacité de chaque site à recevoir un port et ses installations terrestres.

Une fois le site définitif retenu, on procédera aux levés précis.

2.2.2 Bathymétrie

Là encore, on procédera par étapes. Le but est de savoir si un site sélectionné *a priori* est capable d'accueillir les navires prévus. Cette première reconnaissance peut, en fonction des besoins du projet, être très étendue : pour la construction du port du Havre-Antifer, il a fallu reconnaître une zone de navigation entre Cherbourg et Le Havre car la Manche est une mer peu profonde et encombrée de nombreuses épaves.

Puis, on réalisera les sondages nécessaires à l'étude du projet. On portera une attention particulière au calage du zéro de référence local (zéro des cartes marines), car il peut varier d'un endroit à l'autre.

2.2.3 Géologie et géotechnique

On se reporterà aux articles *Géophysique appliquée au génie civil* [C 224], *Diagraphies et géophysique de forage* [C 225] dans ce traité.

Les premières reconnaissances permettront de définir l'aptitude du site à recevoir le port. On recourra à des techniques globales de prospection telles que l'utilisation de la sismique.

On s'attachera à caractériser la qualité du sol du point de vue de la facilité avec laquelle on pourra fonder les ouvrages, trouver des matériaux de construction ou creuser des bassins.

Ensuite, on réalisera une campagne complète de reconnaissance au moyen de forages et d'essais sur les échantillons prélevés.

2.2.4 Océanographie

Il s'agit de recueillir les principales données relatives aux courants, aux vents, aux marées, aux houles, aux événements rares, mais importants, tels que les typhons, les cyclones ou les tsunamis (liés aux séismes).

Celles-ci seront affinées au fur et à mesure de l'avancement des autres études : l'étude de la marée n'a été entreprise à Antifer qu'une fois le site définitivement retenu.

On portera une attention toute particulière à la fixation des niveaux de référence. Le niveau de l'eau est fonction de la marée mais aussi de bien d'autres facteurs. La surface de la mer se comporte comme un baromètre et varie au rythme des dépressions qui peuvent, en

outre, créer des fluctuations importantes du plan d'eau. Ces ondes de tempête sont à l'origine des surcotes proches de 3 m enregistrées en novembre 1973 sur les côtes hollandaises.

2.2.5 Sédiméntologie

Cette étude est à entreprendre très tôt car elle conditionne en grande partie le choix du type d'implantation du port ainsi que le choix du type d'ouvrage à réaliser.

Une bonne compréhension des phénomènes globaux permettra de retenir des solutions viables à long terme qui minimiseront les dépenses de dragage tout en préservant la stabilité des rivages voisins.

2.2.6 Sismicité

Cette étude permettra de fixer les risques encourus et devra être prise en compte dans l'élaboration du projet pour fixer les caractéristiques des ouvrages à construire, notamment en ce qui concerne leurs fondations.

Un fort séisme peut avoir deux types d'action propres aux ouvrages maritimes : la liquéfaction des sols et les tsunamis. Construire en zone à sismicité forte est un handicap important que l'on tentera d'éviter en choisissant, si possible, un site moins exposé.

2.2.7 Évolutions prévisibles

Du fait de l'échelle de temps qui est, au moins, de plusieurs années, de nombreux paramètres vont varier au cours de la vie du port.

Le premier d'entre eux est le niveau de référence qui va varier au gré des changements de climat. D'autres phénomènes vont avoir des conséquences sur le niveau de l'eau : les travaux dans les estuaires, qui vont modifier la marée et l'évolution relative des niveaux de la mer et de la terre. Dans nos régions d'Europe occidentale, on peut raisonnablement tabler sur une élévation du niveau des mers d'environ 1 cm par an.

Ces variations de niveau entraînent des variations dans la propagation des houles qui deviennent plus agressives.

L'ensemble de ces évolutions est à l'origine de phénomènes qui génèrent des tempêtes exceptionnelles. C'est pour se prémunir contre ces catastrophes que l'on a construit le barrage anti-tempêtes sur la Tamise afin de mettre à l'abri des eaux les bas quartiers de Londres.

2.3 Conclusion

Les études qui restent alors à réaliser vont permettre :

- de choisir un site et un scénario de développement ;
- d'élaborer le schéma directeur du port ;
- de réaliser par phases la construction du port.

Les figures 2 et 3 présentent un organigramme possible de l'étude d'implantation et d'aménagement d'un port.

Quelques points méritent une attention particulière.

L'analyse objective des conditions économiques d'implantation d'un port mène à la conclusion essentielle qu'un port ne peut être viable à moyen ou long terme que s'il répond à un besoin réel.

Il ne suffit pas de construire un port pour créer automatiquement une zone ou un pôle d'activité. Par contre, être équipé d'un port est un avantage non négligeable pour la vie économique d'une région.

Bien souvent, il apparaît, lors de l'analyse multicritère, que le meilleur site est celui qui réalise le meilleur compromis entre les impératifs sociaux et économiques, tout en respectant les contraintes techniques les plus fortes.

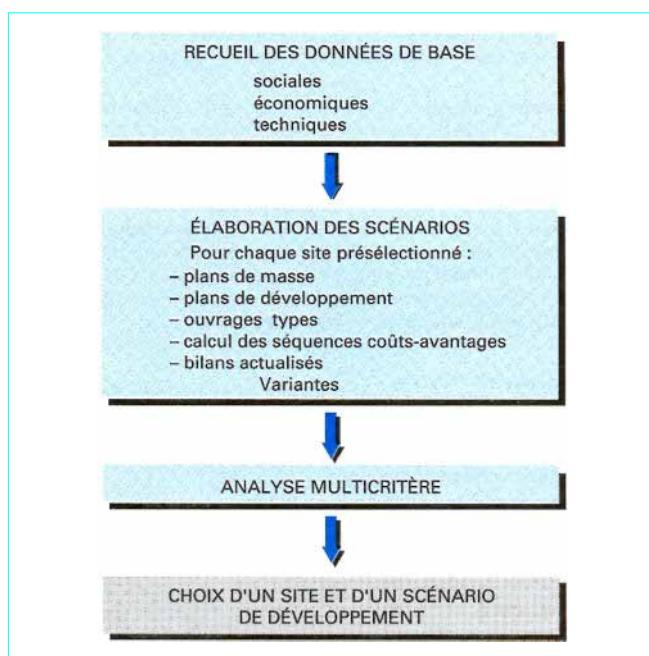


Figure 2 – Choix du site

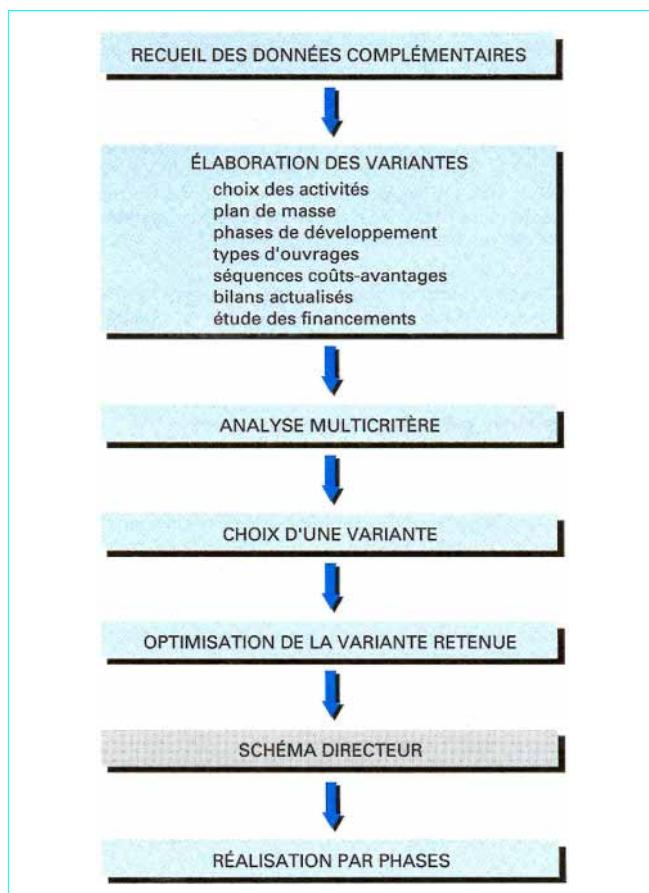


Figure 3 – Élaboration du schéma directeur du port

Il vaut souvent mieux disposer d'une environnement socio-économique très favorable et d'un environnement physique plutôt médiocre que le contraire. Les ingénieurs résoudront les problèmes techniques, parfois au prix de surcoûts et sous réserve qu'il n'apparaisse pas d'impossibilité, alors que la loi du marché international pèsera de tout son poids sur l'activité et la rentabilité du port.

Le port de Zeebrugge, pourtant bien mieux situé du point de vue des accès maritimes que celui d'Anvers, a connu une période de démarrage difficile. La tentative de diversification et d'amélioration des conditions d'accès du port de Bordeaux par la création du Verdon n'a pas donné les résultats escomptés.

Le choix du site est donc fondamental pour la réussite du projet dont la durée de vie est très grande.

3. Solutions possibles

3.1 Diverses implantations géographiques

3.1.1 Ports intérieurs

Ils sont situés, comme leur nom l'indique, à l'intérieur des terres et peuvent être classés en deux grandes familles.

Les ports situés le long d'un fleuve, bien à l'intérieur des terres, sont au centre de leur hinterland proche. L'acheminement des marchandises par voie maritime à proximité des centres de consommation ou de transformation ainsi que les facilités offertes à l'exportation procurent à ces ports un avantage économique certain sur les coûts de transport intérieur. Par contre, ils sont confrontés aux problèmes liés au maintien et à l'amélioration de leur accès maritime.

On peut classer dans cette famille les ports de Rouen, Nantes, Anvers, le port ancien de Rotterdam, l'ensemble des ports desservis par la partie navigable du Saint-Laurent.

L'autre grande famille est constituée des ports implantés à l'intérieur des terres mais à proximité immédiate de la mer : Sidney, Nouméa, Abidjan...

Ils bénéficient d'un environnement favorable qui leur permet de s'affranchir, la plupart du temps, de la construction onéreuse d'ouvrages de protection contre la houle. Leur position géographique les apprend, par bien des aspects, aux ports extérieurs.

3.1.2 Ports extérieurs

Ces ports, construits à proximité du rivage initial, comportent la plupart du temps une partie gagnée sur la mer et une partie sur le littoral.

Soumis à l'action directe de la houle, ils doivent être protégés par des ouvrages spécifiques.

Ils bénéficient, par rapport aux ports situés à l'intérieur des terres, de meilleurs accès maritimes mais sont plus éloignés de leur hinterland, ce qui entraîne des coûts de transport intérieur plus élevés.

À titre d'exemple, on peut citer les ports d'Alger, de Dunkerque, de Zeebrugge, du Havre, de Marseille, d'Europort à Rotterdam...

3.1.3 Ports détachés du rivage

Lorsque l'on a besoin de grandes profondeurs d'eau pour recevoir des navires tels que les grands minéraliers ou les grands pétroliers et que les fonds naturels sont faibles, on peut choisir d'implanter le port au large de la côte.

Cette solution technique permet de réduire les dragages nécessaires à l'établissement et au maintien des profondeurs. Par contre, la liaison avec la terre pose problème. Dans le cas d'un port pétrolier, on peut réaliser la liaison grâce à des canalisations sous-marines

(*sea-lines*). S'il s'agit d'un port minéralier, il faudra construire une estacade que l'on devra protéger contre le choc possible des navires fréquentant la zone : caboteurs, bateaux de pêche...

Ces ports, généralement destinés à des installations spécialisées, sont souvent implantés dans des zones naturellement protégées.

3.1.4 Évolution des ports

Compte tenu des difficultés rencontrées par les ports intérieurs situés sur des fleuves à maintenir et à améliorer leurs conditions d'accès, on constate une évolution de leur implantation.

La plupart d'entre eux construisent des installations situées en aval : le port de Rotterdam a ainsi aménagé de nouvelles installations regroupées sous le terme d'*Europort*. Nantes s'étend vers l'aval grâce aux installations situées à Saint-Nazaire.

3.2 Élaboration du plan de masse

L'élaboration du plan de masse doit prendre en compte la réalisation des accès et l'implantation des ouvrages de protection contre la houle, tout en garantissant les aménagements intérieurs prévus par ailleurs.

3.2.1 Accès

Les caractéristiques à donner aux accès et aux zones de manœuvre dépendent des conditions naturelles régnant sur le site et des navires fréquentant le port.

Ces accès comprennent, outre le chenal d'accès, les zones de décélération, de freinage et d'évitement.

La position et les dimensions à donner à ces divers éléments seront établies conformément aux indications de l'article *Navires. Navigation. Balisage* [C 4 620] de ce traité.

L'implantation du chenal d'accès résultera d'un compromis entre la facilité d'accès des navires et la nécessité de bien protéger le port de l'action des houles et des courants : bien souvent, la meilleure implantation du chenal est celle qui favorise la pénétration de la houle à l'intérieur du port.

De plus, l'action des éléments naturels sur un navire donné dépend de son état de chargement : un navire pétrolier à pleine charge est très sensible aux courants à cause de son tirant d'eau important ; par contre, allégé, il sera plus sensible à l'action du vent.

Les paramètres dont il faut tenir compte sont très nombreux et il sera utile, sinon obligatoire, de prendre l'avis des marins.

Pour la réalisation du port ouest de Dunkerque, le problème a été résolu grâce à l'emploi d'un modèle réduit représentant l'ensemble des conditions du site.

3.2.2 Ouvrages de protection contre la houle

Le rôle de ces ouvrages est de procurer une protection contre la houle suffisante pour que les navires puissent travailler correctement. L'article *Ports de commerce et de pêche. Aménagement et équipements intérieurs* [C 4 640] précise, en fonction du type de navire et de manutention, les valeurs maximales du creux de la houle à ne pas dépasser.

La protection offerte dépend du type d'ouvrage retenu et de la configuration adoptée.

3.2.2.1 Digues parallèles à la côte

Lorsque la pente des fonds est importante, on ne peut construire des ouvrages d'un coût et d'une taille raisonnables, que s'ils ne sont pas trop éloignés de la côte.

Dans ce cas, on dispose la digue de protection parallèlement à la côte. La protection offerte contre la houle est bonne. Par contre, les manœuvres d'accès des navires peuvent s'avérer délicates et il peut être nécessaire d'incliner légèrement la digue par rapport à la côte.

La pénétration de la houle à l'intérieur du port s'en trouve alors facilitée et l'on complètera la protection par la construction d'une contre-jetée.

On rencontre ce type de port en Méditerranée comme à Marseille (figure 4).

Il faut prendre garde, lors de l'aménagement intérieur du port, à ne pas créer de dispositions favorables à l'apparition de seiches qui rendent difficile la tenue à poste des navires.

La passe d'entrée étant peu éloignée du rivage, on surveillera les apports éventuels de sédiments, surtout si le port est situé près de l'embouchure d'une rivière.

3.2.2.2 Digues parallèles

Cette disposition était utilisée autrefois pour canaliser les courants de vidange des ports afin de créer des chasses en vue d'entretenir naturellement les chenaux d'accès.

La protection contre la houle est très faible dès que la houle n'est pas très inclinée par rapport à l'axe du chenal.

Si l'on veut obtenir un résultat acceptable de ce point de vue, il faudra recourir à des ouvrages complémentaires tels que des jetées intérieures ou des talus disposés le long du chenal afin d'y faire déferler la houle.

Les conditions de navigation, surtout à l'engainement, s'avèrent délicates dès qu'il y a le moindre courant traversier.

3.2.2.3 Digues convergentes

Cette disposition est particulièrement favorable à l'établissement d'un port bien protégé et offrant de bonnes conditions de navigation.

Les digues permettent de constituer de larges plans d'eau abrités qui constituent l'avant-port, où la houle s'atténue après diffraction autour des musoirs.

Ces plans d'eau sont mis à profit pour offrir aux navires les zones d'évolution dont ils ont besoin.

Il est possible d'améliorer ces dispositions de base en aménageant des ouvrages intérieurs complémentaires comme au Havre (figure 5) ou en décalant les jetées comme à Dunkerque (figure 6).

3.2.3 Aménagement intérieur des ports

La mise au point du plan de masse d'un port nécessite l'étude de nombreuses variantes afin d'optimiser l'ensemble du projet et non pas tel ou tel aspect.

Par exemple, le respect des normes d'agitation maximale admissible pourra être obtenu de bien des manières. Si l'abri procuré par les digues principales n'est pas suffisant, on pourra envisager de construire des ouvrages spécifiques tels que des jetées intérieures ou des plages d'amortissement de la houle.

On pourra, tout aussi bien, décider de limiter la réflexion de la houle à l'intérieur du port en aménageant des talus en fond de bassin ou en construisant des quais peu réfléchissants (quais sur pieux avec talus d'enrochements ou quais à paroi extérieure perméable).

Dans ce cas, l'aide des modèles réduits physiques ou de modèles numériques est bien utile pour retenir la solution la plus judicieuse (cf. rubrique *Modélisation* dans ce traité).

Enfin, la disposition des plans d'eau forme un tout qui doit être conçu dans son ensemble et la distinction entre plans d'eau intérieurs ou extérieurs s'atténue alors pour laisser la place à la notion de zones de manœuvre.

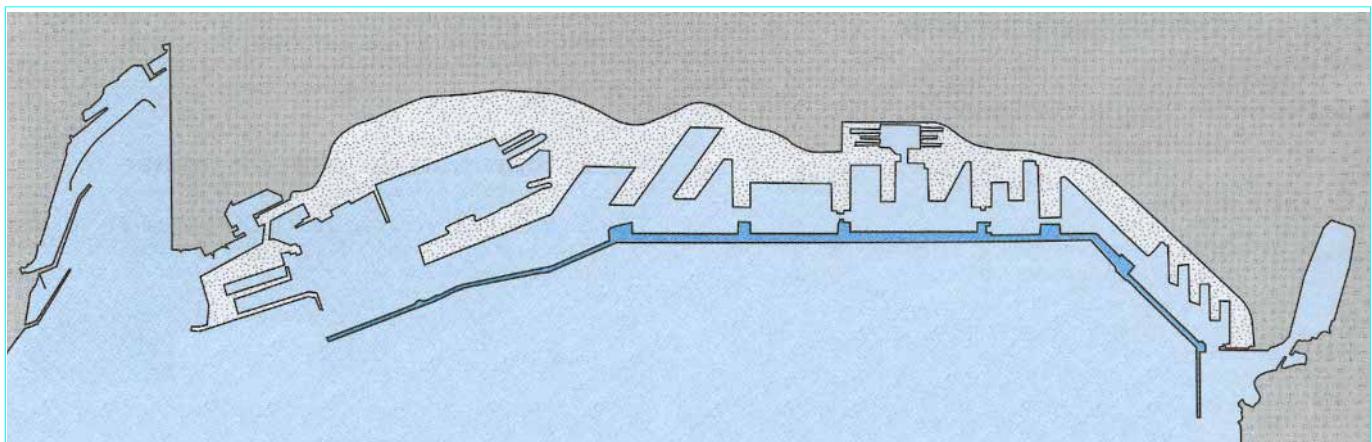


Figure 4 – Port à jetées parallèles à la côte : Marseille

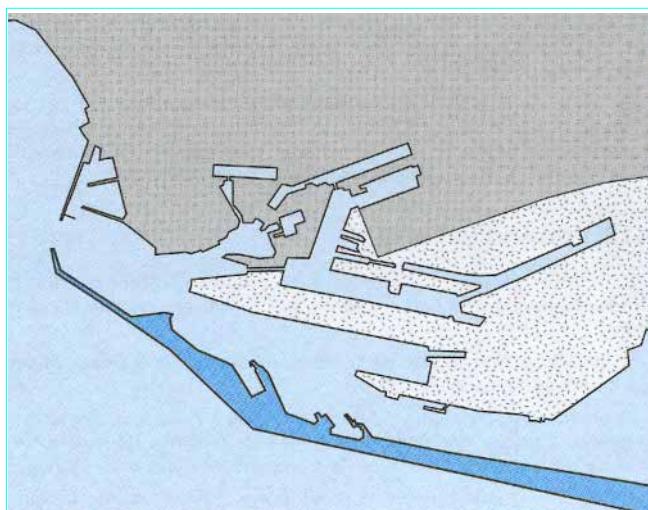


Figure 5 – Port à jetées convergentes : Le Havre

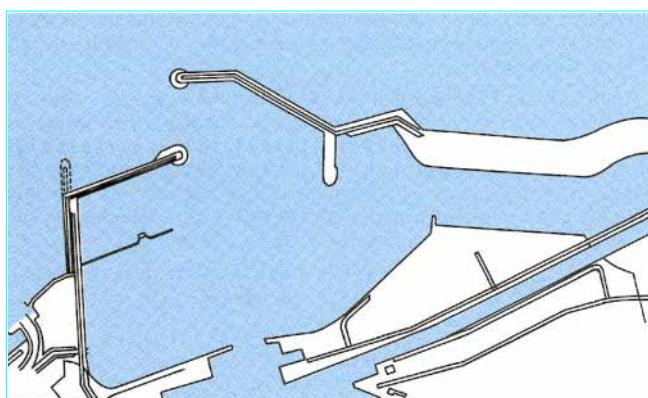


Figure 6 – Port à jetées convergentes et décalées : Dunkerque ouest

4. Aménagements particuliers aux ports intérieurs

Les ports intérieurs situés le long des fleuves demandent certains aménagements particuliers visant à maintenir et à améliorer la qualité de leurs accès, car ils sont souvent soumis à une sédimentation naturelle importante.

Les aménagements intérieurs proprement dits seront réalisés conformément aux indications de l'article *Ports de commerce et de pêche. Aménagement et équipements intérieurs* [C 4 640], en tenant compte de la particularité de ces ports : le fleuve est un axe structurant le long duquel seront implantés les différents terminaux spécialisés ou les diverses zones d'activité.

4.1 Aménagement de la partie fluvio-maritime (estuaire)

4.1.1 Régimes hydrauliques d'un estuaire

L'estuaire est le lieu géographique où se mêlent les actions de la mer (marées et courants) et du fleuve.

Suivant la force relative de chacun, l'estuaire va fonctionner différemment (figure 7).

Dans le cas d'un estuaire stratifié qui, généralement, correspond à un débit fluvial très important comparé à celui engendré par la marée, on constate l'existence d'un coin salé par-dessus lequel s'écoule le fleuve. C'est le cas du Rhône.

Si l'action de la marée est importante par rapport à celle du fleuve, l'eau de mer pénètre profondément dans le fleuve en se mélangeant largement à l'eau douce. Cette zone de mélange évolue en fonction de la marée. C'est le cas de la Seine, de la Loire, des fleuves à débit moyen se jetant dans une mer à fort marnage.

Certains estuaires peuvent avoir les deux régimes :

- stratifié en mortes-eaux et en période de crue du fleuve ;
- bien mélangé en vives-eaux et en période d'étiage.

4.1.2 Bouchon vaseux

Le fleuve transporte en suspension de nombreuses particules dont des argiles qui proviennent de l'érosion des régions traversées par le fleuve.

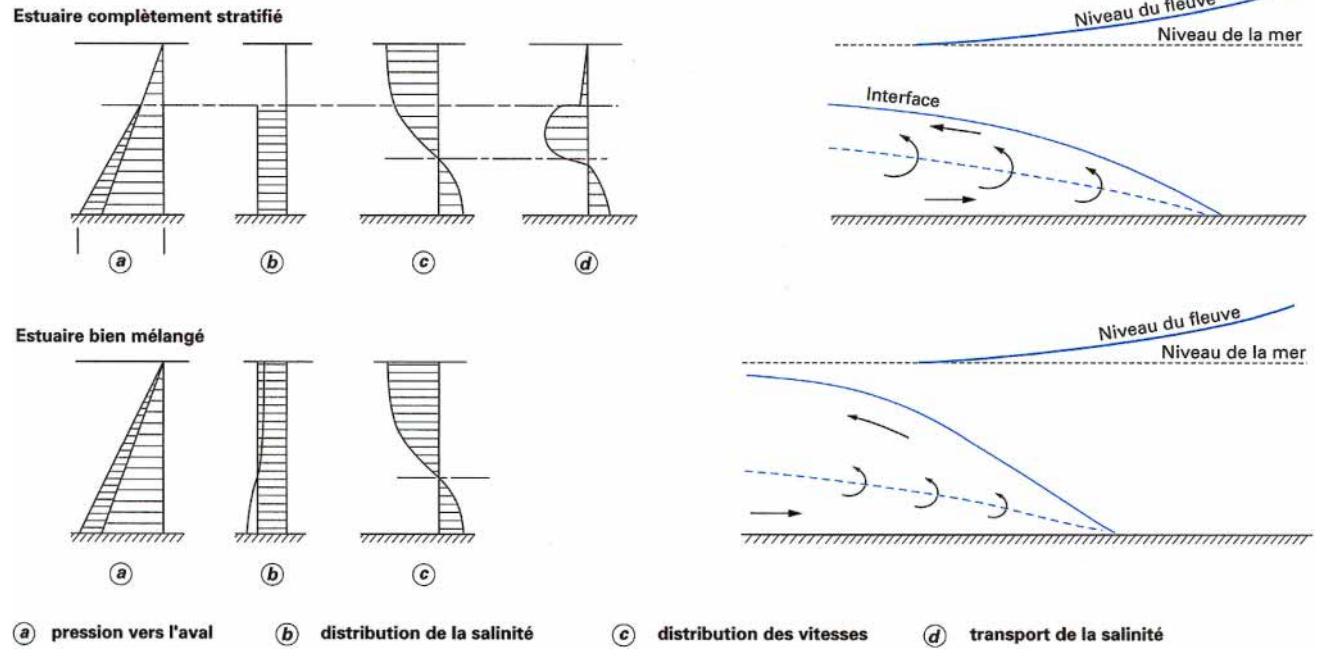


Figure 7 – Schémas de fonctionnement des estuaires

En eau douce calme, les particules isolées d'argile ont une vitesse de chute de l'ordre de 0,3 mm/h et restent donc en suspension. Dès que la concentration en sel avoisine 3 g/L, ces argiles floculent et la vitesse de chute est, alors, multipliée par un facteur 1 000.

Dans le cas d'un estuaire bien mélangé, ce taux de salinité favorisant la flocculation est atteint bien en amont de l'embouchure. Ces argiles floculent et forment un amas de vase, le bouchon vaseux.

Pendant les périodes de mortes-eaux, on constate une phase d'accumulation pendant laquelle les vases vont se consolider partiellement pour former la crème de vase.

Pendant les périodes de vives-eaux, les forts courants vont pouvoir remettre en suspension les vases insuffisamment consolidées, les autres continueront de se tasser et de se consolider.

4.1.3 Aménagement des estuaires stratifiés

Compte tenu du régime hydraulique de l'estuaire, les matériaux fins se déposeront en grande partie au large. L'autre partie se déposera dans la zone amont du coin salé pour former, avec les autres matériaux amenés par la mer, la barre d'embouchure (figure 8).

L'entretien des profondeurs consistera, alors, à maintenir la passe d'entrée en réalisant des dragages d'entretien ou en favorisant l'auto-entretien par amélioration des conditions hydrauliques obtenue en canalisant le courant de vidange au moyen d'endiguements.

4.1.4 Aménagement des estuaires bien mélangés

L'aménagement de ces estuaires est beaucoup plus complexe dans la mesure où la marée contrarie l'écoulement du fleuve dont le lit n'est pas stabilisé.

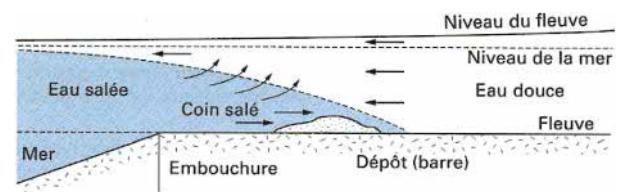


Figure 8 – Embouchure d'un fleuve dans une mer sans marée

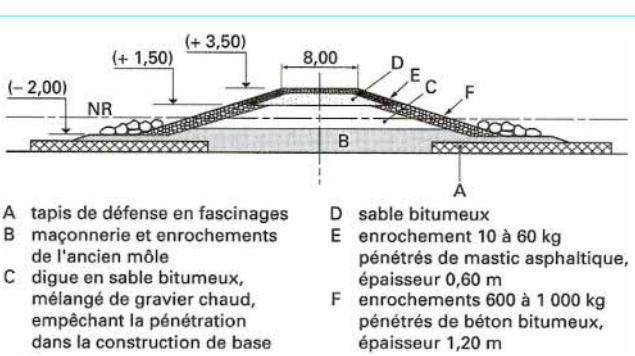


Figure 9 – Coupe type de la digue à Hock van Holland (port de Rotterdam)

Il faut donc, tout d'abord, choisir un tracé d'écoulement fluvial et le rendre permanent quitte à le stabiliser par des dragages et des endiguements d'un type particulier (figure 9).

Ensuite, il sera nécessaire de stabiliser l'embouchure et d'entretenir les profondeurs au niveau de la passe d'entrée comme pour les estuaires stratifiés.

Enfin, il faudra veiller à ce que les dépôts engendrés par le bouchon vaseux ne viennent entraver la navigation.

Pour toutes ces actions, il est souhaitable de renforcer l'action des courants, et tout particulièrement celle du jusant qui permet d'expulser les matériaux à l'extérieur de l'estuaire, avant de recourir aux moyens de dragage qui ne sont qu'un palliatif.

Dans le cas d'estuaires très chargés, une solution intéressante consiste à empêcher les dépôts de se consolider en les remettant en suspension grâce à l'action même des navires faisant battre leur hélice ou à l'action de dragues spéciales qui ne récupèrent pas les matériaux. Cette technique est utilisée avec succès au port du Degrad des Cannes en Guyane.

L'étude de l'aménagement de la partie fluvio-maritime fait souvent appel à l'usage de modèles réduits physiques qui permettent de tester et de comparer les diverses solutions envisagées. On prendra soin de bien étalonner le modèle en reproduisant le passé sur une longue période afin de pouvoir extrapoler correctement le comportement de l'estuaire (figure 10).

4.2 Aménagement de la partie fluviale

4.2.1 Principes généraux

L'aménagement des fleuves répond à quelques principes de base :

- le principe de **continuité** qui impose des variations lentes et régulières des sections de façon à éviter des pertes de charge ou des variations brusques de vitesses qui sont propices au dépôt des matériaux ;
- le principe de **solidarité** qui rappelle que tout aménagement d'une partie du fleuve a des conséquences à l'aval, mais aussi à l'amont ;
- le principe de **puissance hydraulique maximale** qui permet d'augmenter les capacités d'érosion et de transport du fleuve réduisant ainsi les dragages d'entretien.

4.2.2 Aménagement des fleuves sans marée

Outre l'application des principes rappelés ci-dessus, l'aménagement des fleuves sans marée consiste essentiellement à protéger les berges contre les érosions dues au courant et au batillage des navires.

On pourra s'inspirer des méthodes utilisées en navigation fluviale, sans oublier que les forces d'érosion sont, ici, bien supérieures.

L'amélioration des accès, en vue de la réception de navires toujours plus importants, réside non seulement dans l'approfondissement mais aussi dans la rectification du tracé en plan qui nécessite la modification et l'adoucissement des courbes pouvant aller jusqu'à la suppression des méandres.

4.2.3 Aménagement des fleuves avec marées

Outre la réalisation des travaux d'aménagement décrits ci-dessus, on devra procéder à des travaux particuliers liés à la propagation de la marée dans le fleuve.

Les courants de marée ne sont pas en phase avec la propagation de l'onde. Le courant de flot s'établit alors que la marée a déjà commencé à remonter.

Les navires qui remontent le fleuve sont portés par la marée : poussés par le courant, ils bénéficient d'une hauteur d'eau favorable qui se propage en même temps et dans le même sens qu'eux.

On peut, ainsi, remonter à Rouen des navires à pleine charge en une marée.

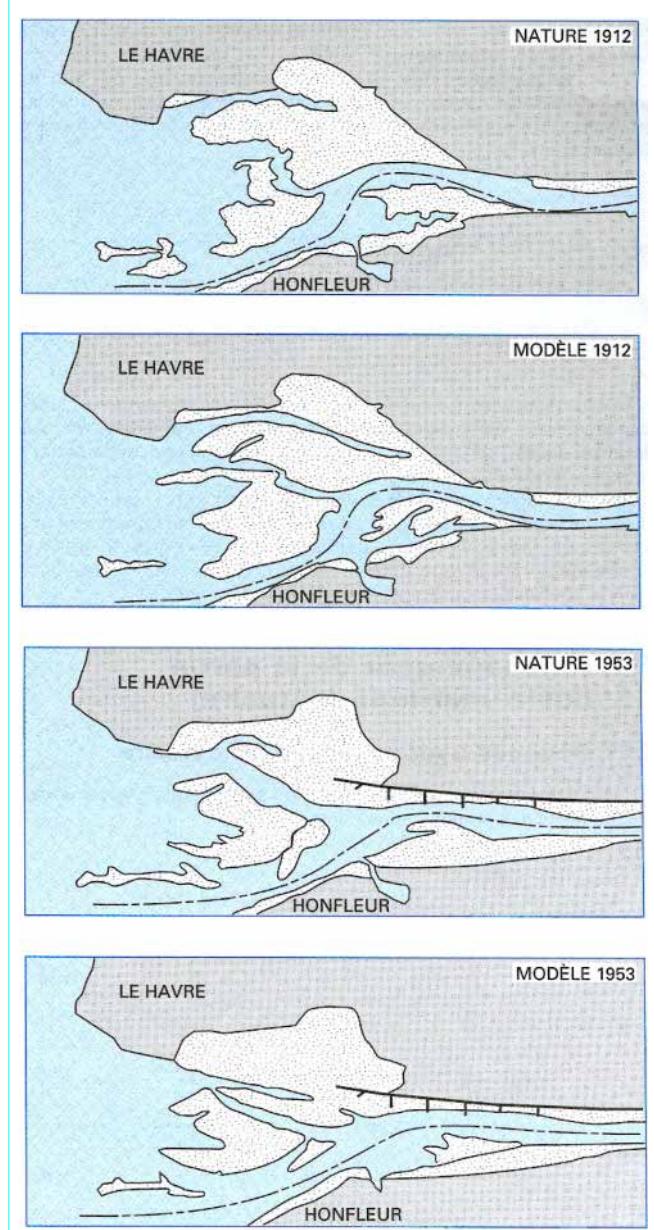


Figure 10 – Essais sur modèle réduit de l'estuaire de la Seine : étalonnage du modèle et comparaison des évolutions (nature/modèle) entre 1912 et 1953

Le phénomène joue à l'inverse lors du reflux. Certains navires sont contraints de descendre en plusieurs marées en s'arrêtant à marée basse si les fonds sont insuffisants. Il faudra donc prévoir des postes d'attente avec des profondeurs adéquates.

Par ailleurs, la stabilité des talus et des berges est plus difficile à assurer à cause des courants et des variations du niveau de l'eau.

Enfin, il ne faut pas oublier que tout aménagement va modifier les conditions de propagation de la marée, entraînant, *ipso facto*, des modifications des niveaux de référence. Un approfondissement du chenal de navigation engendre une plus grande pénétration de la marée et augmente les niveaux de référence hauts et l'on peut, alors, craindre que les berges ne soient submergées.

Principes d'implantation et d'aménagement des ports

par **Daniel CAMINADE**

*Ingénieur civil des Ponts et Chaussées. Docteur en Génie civil
Maître de conférences et Responsable de la Maîtrise de Génie civil à l'Université du Havre*

Bibliographie

BONNEFILLE (R.). – *Cours d'hydraulique maritime*.
École Nationale Supérieure des Techniques
Avancées. Masson (1990).

CHAPON (J.). – *Travaux maritimes*. Eyrolles (1972).

COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER
(CERC). – *Shore protection manual*. éd. (1984).

GRAILLOT (A.) assisté de MM. , CAMINADE,
FOUGEAUD, JANOUEX, JOLIVET, LEVEN,
TUAL et HAUVILLE. – *Cours de travaux*

maritimes. École Nationale des Travaux Publics
de l'État (1982). Institut Portuaire d'Enseignement
et de Recherche (1987).

LAVAL (D.). – *Cours de travaux maritimes*. École
Nationale des Ponts et Chaussées (1963-1964).