

15621

I500-LEO-E

- - JUIL. 1972

CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCEANS.

ETUDE SUR LA FAISABILITE  
DES  
ILES ARTIFICIELLES.

**DOCUMENTATION**

**GROUPE AMÉNAGEMENT DU LITTORAL**

CENTRE NATIONAL  
pour l'EXPLOITATION des Océans  
39, Avenue d'Iéna  
PARIS - 16<sup>e</sup>

IFREMER-DERO/EL



0EL03216

E T U D E  
S U R  
L E S I L E S A R T I F I C I E L L E S .

---

---

---

0 0 0 0  
0

Serge LEONARD.

Ingénieur des Arts et Manufactures

## TABLE DES MATIERES.

<u>Chapitre</u>	<u>Titre</u>	<u>Page.</u>
I	Introduction.	1
<u>1ère partie: Généralités.</u>		
II	Raisons des îles artificielles	2
	- démographiques	3
	- foncières	6
	- techniques	6
III	Etat actuel du problème.	8
IV	L'Environnement marin.	11
	- L'eau de mer	11
	- Les éléments	12
	- Le fond marin	15
V	Protection contre les effets de l'environnement marin.	18
	- Corrosion	18
	- Fouling	21
	- Action des éléments	22
<u>2ème partie. Des différents types d'îles artificielles.</u>		
VI	Îles en remblai.	30
VII	Îles-Polder.	64
VIII	Îles sur piliers	76
IX	Îles flottantes.	95
X	Îles-caissons	113
<u>3ème partie. Eléments comparatifs.</u>		
XI	Avantages et défauts des différents types d'îles artificielles	120
XII	Coûts comparés.	122
XII	Engineering.	127
XIV	Liaisons avec la côte.	129
XV	Considérations écologiques	132
<u>4 ème partie. Conclusions.</u>		
XVI	Perspectives de développement	138
XVII	Aspects juridiques.	147
XVIII	Recommandations en vue d'études détaillées.	149
Bibliographie sommaire.		

I<sup>ERE</sup> PARTIE.

GENERALITES.

## I. INTRODUCTION.

L'étude des perspectives à long terme d'aménagement du Littoral Français a pour objet principal:

-de rassembler, élaborer et diffuser des données utiles et des idées prospectives afin d'apporter aux responsables de cet aménagement

- . un éclairage sur leurs décisions
- . une connaissance sur leur faisabilité  
par une bonne information sur les moyens.

Le programme général de cette importante étude comprend entre autres recherches la faisabilité d'infrastructures littorales artificielles et en particulier d'iles faites par la main de l'homme.

L'objectif de l'étude sur les iles artificielles a été défini comme suit:

" Dans quelles mesures pourrait-on envisager l'implantation d'iles artificielles sur le littoral ? "

C'est à cette question que cherche à répondre l'étude confiée à la Société " Méditerranée Engineering.

## II. RAISONS DES ILES ARTIFICIELLES.

A l'orée du XXI ème siècle, des problèmes de plus en plus angoissants sont posés à l'Humanité entière, alors que, jusqu'à ce jour, ils ne l'étaient que pour des collectivités ou des pays à l'économie et aux ressources misérables, constamment hantés par des problèmes de survie.

Ces problèmes sont créés avant tout par les besoins accrus des hommes

- en nourriture
- en eau
- en matières premières
- en terres utilisables.

L'Humanité semble en effet être à un tournant de son histoire.

Pendant des millénaires, les sociétés humaines ont vécu à un rythme lent, croissant imperceptiblement dans les sociétés dites civilisées et figé dans les sociétés primitives, dont le nombre était encore important à l'aube du XX ème siècle, dans des contrées encore inexplorees.

A cette lente évolution a succédé la vertigineuse explosion due au progrès scientifique et technique, qui a causé une révolution dans l'amélioration rapide des conditions de vie de l'homme, entraînant une démographie mondiale galopante.

Cette révolution explosive, associée au facteur temps, est assurément à l'origine de cette angoisse nouvelle du monde, hanté par les spectres de

- la faim
- l'épuisement des richesses terrestres
- la dégradation de l'environnement humain.

O O O

Pendant des siècles, les hommes se sont aventurés de plus en plus hasardeusement sur les mers, voies de l'exploration, de la découverte, de la civilisation, de la culture et du commerce, d'une manière si naturelle que peu d'hommes ont senti, jusqu'à ce jour, combien l'humanité devait à la mer, considérée comme une réserve alimentaire pratiquement inépuisable.

Aujourd'hui, les hommes redécouvrent le potentiel extra-ordinaire des mers et voient en elles le remède inespéré à tous leurs maux futurs, qu'ils soient d'origine

- démographique
- foncière
- énergétique ou technique.

0 0 0

## 21. RAISONS DEMOGRAPHIQUES.

En 1970, la population mondiale était d'environ 4 milliards d'êtres humains.

Au taux moyen d'accroissement annuel de 1,5 %, soit 150.000 habitants nouveaux par jour, cette population sera de:

- 6 milliards en l'an 2.000
- 8 milliards en 2.030.
- 500 milliards en 2.300.

Si cette dernière hypothèse se vérifiait, la totalité des terres serait alors urbanisée.

La superficie de ces terres émergées est de 145 millions de kilomètres carrés, dont plus de la moitié est peu habitable en son état actuel ( Régions polaires - désertiques ou haute montagne.)

Une population de 6 milliards d'habitants en l'an 2.000 ne laisserait disponible qu'un hectare environ par être humain, ce qui, compte-tenu des surfaces nécessaires à l'habitat, à la circulation et aux activités industrielles, ne donnerait plus qu'une portion infime et insuffisante aux surfaces rurales et agricoles nécessaires à la nourriture de l'homme.

Il est reconnu qu'il existe une densité critique de population que tout système humain, pour son équilibre industriel et rural ne doit pas dépasser; cette densité peut être estimée à 350 habitants au kilomètre carré.

Cette densité est par exemple de:

- 100 en France
- 320 en Grande-Bretagne et en Belgique
- 425 en Indonésie.

On voit que déjà quelques pays industrialisés approchent de cette densité critique.

Par ailleurs, dans tous les pays, certaines régions urbanisées sont démesurément surpeuplées, cette densité excédant dans les grandes métropoles 5.000, voire 10.000 habitants au kilomètre carré.

Aussi pour conserver les surfaces rurales nécessaires à la vie et loger les hommes sur les surfaces restantes, les urbanistes ont-ils conçus des cités futures:

- soit en Hauteur-gratte-ciels gigantesques.
- soit en Profondeur- Cités souterraines.
- soit sur la mer.
- soit même dans les airs.

Il est en effet naturel que les urbanistes se soient tournés vers la mer, espérant y trouver le moyen de diminuer cette pression démographique, sensible surtout dans les cités portuaires, adossées à la mer.

Or la mer couvre 75 % de la surface totale du globe, soit 355 millions de kilomètre carrés.

C'est donc une possibilité d'extension naturelle, que d'ailleurs depuis des siècles les Néerlandais ont exploité en conquérant des centaines d'hectares sur la mer par des polders à utilisation rurale.

Des impératifs industriels et économiques de plus en plus pressants poussent aujourd'hui les hommes à profiter au maximum de ces possibilités extraordinaires.

Alors que jusqu'à ce jour la vie industrielle se concentrait autour des mines terrestres, sources de la puissance de notre société industrielle moderne, ou au croisement des voies de communication terrestres ou fluviales, de plus en plus cette vie industrielle a tendance à se localiser dans les zones portuaires.

80 % des grandes villes Américaines de plus de 1 million d'habitants sont situées en bordure des océans ou des grands lacs ou fleuves, du fait que dans ce pays neuf les transports par eau ont prélué à leur naissance et à leur remarquable développement.

Cette tendance de l'industrie "sur l'eau" se développe dans tous les pays et de plus en plus les ports modernes conditionnent la vie économique et industrielle des plus grands d'entre eux.

Les grands ports maritimes sont en effet en extension croissante et leur développement industriel se poursuit à une allure d'autant plus rapide que s'accroît le tonnage des navires.



Les bulk-carriers de 250.000 tonnes, les super-tankers de 500.000 ,voire de 1.000.000 de tonnes vont bouleverser tous les courants maritimes et économiques traditionnels.

Partout les carreaux des mines en voie d'épuisement et les carrefours terrestres cèdent la place aux terre-pleins des ports pétroliers et minéraliers, où se développent des zones industrielles gigantesques ( Rotterdam- Fos)

Les zones industrielles du "bord de mer" sont en train d'insérer dans une ceinture littorale, groupant 75 % des activités d'un pays, un désert intérieur de plus en plus inquiétant.

Il n'est pas utopique de penser que dans quelques années sur une bande littorale de quelques kilomètres de profondeur se concentrera plus de 50% d'une population qui y aura son lieu de travail et de vie.

Cette concentration côtière est une menace pour l'environnement humain.

Elle dépossédera l'homme de ce bien inestimable qu'est la côte et de toute ouverture sur la mer et sur l'horizon, objet de la méditation humaine depuis la naissance des civilisations.

On se bat aujourd'hui pour la suppression des plages privées et le libre accès à la mer.

Demain on se battra pour la suppression de ce littoral industrialisé, source de pollution, défigurant à jamais des côtes qui sont encore les rares joyaux naturels dans la vie de plus en plus artificielle des hommes.

Aussi certains savants et industriels, aux Etats-Unis d'Amérique tout particulièrement ainsi qu'au Japon, souhaitent voir reporter cette ceinture en mer à une dizaine ou une vingtaine de kilomètres des côtes.

Les îles artificielles seront les supports obligés de cette audacieuse hypothèse, dont les prémices se réalisent déjà.

## 22. RAISONS FONCIERES.

Le problème foncier se pose de plus en plus d'une manière aigue dans les nations surpeuplées, au territoire fortement urbanisé, tant à cause de leur démographie galopante que de la croissance insensée des densités locales de leur urbanisation.

Sous peine de mort de l'humanité, il importe de réserver dès nos jours les terres nécessaires à la vie des hommes.

Dans les grandes métropoles, le taux d'occupation des sols est si élevé que non seulement aucune surface importante n'est plus disponible, mais que celles qui existent encore le sont à des couts si extraordinaires que leur utilisation pose des problèmes financiers, très souvent insolubles.

Le cout de l'hectare de terrain au coeur de Paris est de 300 millions de francs; il est de 100 millions de francs au Japon à 30 kilomètres de Tokyo.

A ce cout s'ajoute celui des travaux de démolition, de nivellement et d'aménagement des réseaux.

Dans les grandes villes portuaires en bordure des mers ou des lacs, il est normal que les architectes et les urbanistes aient donné libre cours à leur imagination pour s'affranchir de tout problème foncier, en construisant sur l'eau, domaine public dont le prix a toujours été estimé nul.

0 0 0

## 23. RAISONS TECHNIQUES ET ENERGETIQUES.

Tout naturellement la prospection des gisements miniers ou pétroliers de terrestre est devenue marine, devant la raréfaction des ressources terrestres.

Tant que les gisements off-shore étaient à de faibles distances des côtes, tous les problèmes industriels en aval de l'extraction (stockage-traitement-transformation) peuvent être ramenés à des problèmes terrestres par utilisation de moyens de transports divers (navires-pipe-lines etc..)

A partir d'une certaine distance de la côte, le cout de ces moyens croit rapidement, créant un seuil de rentabilité.

Dans un premier temps on y suppléera par la création de mini-bases sur des navires transformées à cet effet.

Mais dans un deuxième temps pour les gisements importants, il sera nécessaire de créer de véritables bases industrielles off-shore.

L'industrie pétrolière se penche tout particulièrement sur ce problème, tant le développement des gisements off-shore est rapide et que leur exploitation à 100 ou 200 kilomètres des côtes va demander la mise en oeuvre de moyens extraordinaires.

La pollution industrielle dans les zones littorales, l'échauffement de la température de l'air dans les régions à forte densité de centrales énergétiques, des impératifs de sécurité incitent également à une implantation industrielle en mer, tout naturellement sur les gisements de pétrole ou de gaz off-shore.

La création de zones industrielles en haute mer n'est plus une utopie et de nombreuses sont déjà en étude.

Villes et aéroports seront alors nécessaires à de tels complexes marins, à forte densité humaine et qui pourront couvrir des kilomètres carrés sur des îles artificielles fonction de la profondeur de l'océan.

### III. ETAT DU PROBLEME.

Depuis des siècles, les hommes ont songé à utiliser la surface des eaux à des fins de sécurité, d'habitat ou d'extension de leurs activités terrestres.

Les exemples en sont nombreux et fort connus:

- villages sur pilotis de l'époque lacustre.
- villages sur radeaux de paille de certaines tribus primitives de l'Amérique du Sud.
- polders Hollandais.
- cités flottantes de sampans abritant des millions d'êtres humains dans les grands ports Asiatiques

Les Hollandais semblent avoir été les premiers à conquérir des surfaces importantes sur la mer.

La vue des milliers d'hectares de leur contrée plate et basse, perpétuellement inondés d'une manière cyclique par les fortes marées de la Mer du Nord les a incité : depuis des siècles à protéger ces surfaces tour à tour terre et mer contre les flots montants.

Devenus spécialistes en digues dès le XIII<sup>ème</sup> siècle, il n'est pas étonnant que dès le début du XVIII<sup>ème</sup> siècle, des hydrauliciens aussi éminents que CRUQUIUS, NOPPEN et BOLSTRA, aient songé à conquérir des centaines de kilomètres carrés de terre par assèchement de lacs ou construction de gigantesques polders, poussés par le développement prodigieux de leur nation étouffant sur son territoire trop étroit.

La conquête des terrains sur la mer a été ensuite commandée par des impératifs d'aménagement artificiel des côtes, imposés par les progrès techniques:

- Installations portuaires gagnées sur la mer, (Marseille- Rotterdam, etc..) pour répondre à l'accroissement des tirants d'eau des navires à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle.
- Extension des pistes aériennes sur l'eau des aérodromes côtiers, non conçus pour les jets et dont l'allongement n'était plus possible que sur l'eau.

Ces stades de la conquête de la mer se caractérisent cependant par une liaison continue et permanente des terrains conquis ou aménagés avec la côte.

Les techniques de construction des ponts, qui suppriment l'obstacle créé par l'eau aux hommes, se sont aussi servies depuis longtemps de l'eau comme support de la chaussée par l'intermédiaire de flotteurs ou de bateaux ( technique des ponts militaires).

Un évènement technique important dans ce domaine a été la réalisation en 1939 dans l'Etat de Washington ( U.S.A) d'un pont flottant permanent d'une longueur de 3 kilomètres environ, permettant à une autoroute de traverser le grand lac de Washington sans utiliser de bac.

Ce pont est toujours en usage et 2 autres ponts identiques ont été mis en service en 1961 et 1963.

0

Depuis des années, devant l'expansion démographique extraordinaire de certaines métropoles portuaires ( Tokio-New-York - Chicago ...) après avoir réalisé l'agrandissement de leurs cités par grignotage de la surface liquide ont pensé à une utilisation plus complète de l'eau comme support de villes nouvelles ou de faubourgs nouveaux.

0

Le développement dans la décennie précédente des plateformes de forage offshore, véritables îlots artificiels a démontré après quelques tâtonnements la faisabilité de tels ouvrages, même dans les mers les plus démontées.

L'exploitation des richesses pétrolières, sortant de nos jours du stade de la recherche et de la prospection, est arrivée sur mer à des intensités comparables à celle de gisements terrestres, à des distances de plus en plus grandes des côtes.

Aussi les besoins logistiques en hommes et en matériel incitent les promoteurs pétroliers à établir en mer à des dizaines de kilomètres des côtes de véritables îles artificielles, supports de vie et d'activités humaines.

Le gisement d'Eko Fisk en est un exemple.

Déjà à Long Beach et en plusieurs points de la côte Américaine des îles artificielles de plusieurs hectares servent de support à des puits d'extraction et à des installations importantes.

Des îles naturelles doublent de surface afin de servir de zones de stockage et de transformation.

Ces mini expériences laissent augurer de développements extraordinaires.

Le développement surprenant des transports aériens impose une extension de plus en plus importante des aérodromes anciens, étouffant dans un tissu terrestre qui de rural est devenu urbain.

La terre ne peut plus leur donner, à moins d'un bouleversement total de la technique aéronautique, les surfaces requises par les pistes de l'avenir.

Aussi depuis dix ans les projets de construction des futurs aérodromes internationaux se situent-ils en majorité sur l'eau.

Plus de cent projets ont ainsi été étudiés aux Etats Unis d'Amérique, en Grande-Bretagne et au Japon.

La hantise de plus en plus forte de catastrophes aériennes sur le centre des villes, l'augmentation rapide du taux des nuisances ( pollution de l'air- bruit- etc..) font que la plupart de ces projets sont envisagés sur de véritables îles artificielles à une dizaine de kilomètres des côtes.

O

Le développement prévisible des centrales nucléaires devant suppléer à la disparition des gisements d'origine fossile commande leur installation sur les rivages des mers ou des lacs.

Aussi est-il normal que dans une prospective du XXI ème siècle les savants de l'atome conçoivent cette installation sur des îles artificielles à 10 ou 20 kilomètres des côtes tant pour des raisons de sécurité que d'environnement.

O

On voit ainsi que dès maintenant collectivités-urbanistes-économistes et industriels conjuguent leurs efforts pour que sous peu les îles artificielles deviennent une réalité.

Quelque soit la forme qui sera donnée à ces îles et la conception qui présidera à leur réalisation - île par remblaiement - île polder- île plateforme-île flottante - etc.. ces îles artificielles sont toutes solidaires d'un environnement marin qui conditionne leur structure et qu'il importe de définir avant de les étudier en détail.

O O O

#### IV. L'ENVIRONNEMENT MARIN

L'environnement du milieu marin, hostile, agité, aux lois encore peu connues à ce jour, a été de tout temps un obstacle majeur pour l'homme dans sa volonté de réaliser au large des côtes des structures fixes importantes.

La méconnaissance profonde des processus des phénomènes marins en haute mer en a été une des raisons principales.

Depuis la deuxième guerre mondiale, cette connaissance s'est améliorée. Les progrès rapides de la science apportent de plus en plus des solutions mathématiques à des problèmes résolus jusqu'alors par une science empirique de la mer.

Cet environnement marin se caractérise par:

- le milieu liquide, l'eau de mer
- les éléments modifient l'aspect de ce milieu:
  - les marées.
  - les vents.
  - les courants.
  - la houle.
  - les vagues.
  - les tsunamis.
- le fond marin.

0

#### 41. L'EAU DE MER.

Il n'entre pas dans le cadre de cette étude de traiter d'une manière générale de cet élément qui conditionne la création d'une île artificielle, mais de souligner trois de ses propriétés caractéristiques importantes:

- Sa température.

Par son influence sur l'action corrosive de la mer, la température conditionne cette dernière dans l'influence qu'elle joue sur les constituants principaux d'une île artificielle - mortiers, bétons, etc.

- Sa densité.

Son importance joue surtout dans la réalisation d'îles flottantes.

- Sa composition chimique.

Elle conditionne l'action chimique de la mer sur tous les matériaux, constituants de base de toute île artificielle (liants hydrauliques-ciments-mortiers-bétons-aciers et alliages divers-bois-plastiques).

## 42. LES ELEMENTS.

### 421. LES MAREES

La marée, phénomène dû à l'effet direct des forces de gravitation exercées par les astres les plus proches de la terre sur la masse liquide des océans, est l'un des éléments les plus connus et les mieux prévus tout au moins au voisinage des côtes.

Les statistiques cotières les intéressant remontent à des siècles.

Il n'en est pas de même pour la haute mer, mais les études menées depuis une dizaine d'années permettront de combler ce manque de connaissances actuel.

L'action de la marée sur les îles artificielles influence le niveau de l'île artificielle au dessus du fond ou les dimensions des ouvrages de protection.

Elle conditionne également la stabilité et les systèmes d'amarrage des îles artificielles flottantes.

L'onde marée peut avoir des effets et des répercussions possibles sur une île de grande dimension implantée dans un bassin de mer de faible dimension, où des perturbations sérieuses aux oscillations naturelles de la marée et aux courants induits peuvent être enregistrées.

0

### 422. LES VENTS.

La force des vents conditionne tout projet d'île artificielle et en particulier leur forme, l'importance de leur protection ou leur caractéristiques techniques.

Leur importance est encore plus forte que sur terre dans le calcul de la résistance des ouvrages - 50% environ de plus.

Les tempêtes, résultats de l'action combinée de vents violents, de variations brutales de la précipitation atmosphérique et de précipitations météorologiques diverses augmentent la valeur des coefficients correctifs à introduire dans les projets afin d'avoir une totale fiabilité.

Le déchaînement d'une tempête engendre de grandes vagues dont la valeur maximale sur un siècle et plus doit être connue avec le plus de précision, ce qui est encore rarement le cas en haute mer.



Cette valeur maximale devra en particulier être introduite dans le calcul des ouvrages de protection et du niveau de l'île afin d'éviter toute submersion future.

Il est impératif pour une implantation d'île artificielle de connaître avec le plus de précision possible les conditions de mer du lieu.

Ces dernières se caractérisent en termes statistiques:

- hauteur moyenne de la vague.
- hauteur significative.
- hauteur maximale.
- vague séculaire.
- période des vagues.
- durée.
- spectre énergétique.etc..

Tout projet de réalisation d'une île artificielle, pour pouvoir être étudié avec la fiabilité voulue doit tenir compte de ces éléments dont la synthèse peut ainsi être résumée:

" La localisation marine est caractérisée par une profondeur d'eau moyenne de H mètres et par le fait que pendant x heures ou X jours par an, les vagues excèdent une hauteur de V mètres."

0

#### 423. LES COURANTS.

Les courants de marée, fonction de cette dernière et du contour des côtes, sont connus avec assez de précision parce que côtiers.

De nombreux autres courants circulent au sein des océans dont certes les plus puissants - Gulf Stream par exemple - sont connus.

Dans une localisation donnée, il importe de connaître les courants prédominants:

- courants profonds dont l'origine peut être qualifiée de thermique et qui par leur intensité en certains points peuvent jouer sur les infrastructures de l'île.
- courants de vent ou de dérive
- courants verticaux ou "upwelling".

Dans les bassins de mer de faible dimension ces courants peuvent donner naissance à des surélévations brutales, comme les storm-surges, pouvant engendrer des catastrophes.

#### 424. AUTRES PHENOMENES MARINS.

Les "Seiches" sont des oscillations du niveau liquide, créées par des turbulences dans des compartiments liquides; plus ou moins fermés-lacs,baies ou golfes,entourés de reliefs élevés

Elles donnent naissance à des courants importants dans ces bassins ou les détroits de communication.

La création d'une ile artificielle dans un bassin étroit peut en bouleverser l'allure et être à l'origine de seiches pouvant influencer sa protection ou sa sécurité,surtout si des phénomènes de résonance entrent en jeu.

Les " ondes de berge" (edge waves) naissent au passage de dépressions météorologiques sur le plateau continental; elles sont encore assez mal connues mais peuvent être dangereuses pour une ile artificielle.

A ces ondes de berge on peut rattacher les inclinaisons que peut prendre la surface de la mer sous l'effet de phénomènes autres que les marées et qui peuvent être à l'origine de catastrophes,comme cela s'est produit en Mer du Nord.

#### 425. LES TSUNAMIS.

Les secousses sismiques engendrent en mer de grandes vagues, dites "Tsunamis" ou raz de marée,à période de faible amplitude et se déplaçant à très grande vitesse à travers les mers.

Leur vitesse est plus faible dans les faibles profondeurs et l'énergie potentielle développée par ce ralentissement cause une surélévation marquée de la vague,engendrant le raz de marée.

Un certain nombre de régions sont plus exposées que d'autres à l'action des tsunamis et imposent des conditions de protection spéciales dans la construction d'une ile artificielle.

0

Les phénomènes marins précités et sommairement décrits soulignent toute l'importance que l'environnement marin joue dans le projet d'une ile artificielle.

Il importe d'en connaître avec le plus de précision tous les éléments afin de rendre caduc le vieil adage marin

" Rien ne résiste à la Mer "

0

#### 43. LE FOND MARIN.

Le fond de la mer est composé de matériaux qui peuvent être classés en:

- Matériaux "meubles" d'origine alluvionnaire ou érosive plus ou moins récente ( limon-vase-galets-sable-graviers etc ..) dont les couches supérieures sont déplacées par l'action de la mer

- Matériaux "en place" sur lesquels l'action de la mer est surtout érosive, le degré d'érosion variant avec la dureté du bedrock ( conglomérats-calcaires-marnes-granits-schistes- etc..)

##### 431. Les Matériaux meubles.

Les limons et les vases sont constitués d'éléments de dimension inférieure à 50 microns, extrêmement fins, associés à des matières organiques et liés par des colloïdes divers (gels de sulfure ou d'hydroxide de fer).

Certains proviennent surtout de coquilles brisées et sont appelées "Tangues".

Ce sont des matériaux dotés de propriétés physiques et mécaniques très diverses suivant leur composition et leur teneur en eau, sable et argile.

Ils durcissent en se séchant et leur surface alors se fendille.

La cohésion des vases en particulier est détruite par l'agitation de la mer et se reconstitue après un temps de repos.

Leur tenue est également influencée par la salinité de l'eau, et sa composition chimique, perturbée dans les régions cotières par les effluents urbains et industriels?

Les couches des éléments meubles peuvent avoir des épaisseurs de plusieurs dizaines de mètres et leur taux de tassement peut être considérable sous l'effet de fortes charges dues à des remblaiements ou des pressions de piles.

0

Les Sables sont constitués par une accumulation de grains de quartz mélangés à des micas et des coquilles brisées, parfois colorées par des sels de fer et dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 2 millimètres.

Les sables sont classés en diverses catégories suivant leur diamètre:

-sables fins	trèsfin	0,063 - 0,125 mm.
	fin	0,125 - 0,25 mm.
-sables moyens		0,25 - 0,5 mm.
- sables grossiers		0,5 - 2 mms.

Le diamètre des grains de sable influence leur résistance au déplacement dans les courants marins, leur pouvoir de drainage et leur résistance au tassement.

Les couches de sable peuvent contenir plus ou moins de poches de vase, d'argile ou de galets et avoir ainsi des résistances variables.

Les galets, graviers et cailloutis et blocs, ont des dimensions supérieures à 2 mms et sont principalement à base de débris de roches ( silex, calcaires, granits, basalte, etc.)

Ils ont une forme plus ou moins arrondie.

Les graviers ont des dimensions comprises entre 2 et 20 mms. et ont des formes plus irrégulières que les galets, dont les dimensions sont supérieures à 20 mms.

Ces matériaux se trouvent soit à l'état granuleux, surtout près des côtes, soit en couches "cimentées" de très grande dureté ou en "poudingues" formant des couches ou des poches dans les couches de sable ou d'argile.

0

#### 432. Les matériaux en place.

Ils sont constitués par le bedrock, composé de couches rocheuses, prolongement des couches terrestres.

Les couches cristallines ou basaltique ont une très grande dureté.

0 0 0

Le fond marin présente également une topographie variable, qu'il importe de connaître s'il doit être travaillé sur de grandes étendues.

Il peut être soit uni, véritable plaine descendant en faible pente vers le large,  
soit tourmenté par de véritables canyons sous-marins ou des paléovallées, plus ou moins comblées par des alluvions diverses d'où émergent des pointes rocheuses.

0 0 0

Le fond marin n'a pas encore fait l'objet d'études systématiques dans le but d'implantation de réalisations artificielles, où la recherche de la résistance du sol aura autant d'importance que pour les constructions terrestres.

Jusqu'à ce jour les cartes marines ne donnaient que la profondeur de l'eau.

Sous l'autorité du Service Géologique National, de nouvelles cartes marines indiquent la nature des dépôts meubles superficiels classés suivant leur granulométrie, la teneur en carbonates et éléments sédimentaires remarquables.

Il faut une connaissance géologique et géotechnique plus poussée des diverses couches sous-jacentes afin de pouvoir situer le bedrock ou les couches à portance suffisante.

Les moyens d'investigation se développent de plus en plus grâce aux besoins de la recherche pétrolière.

Ils sont de plusieurs sortes:

- Prélèvements en substrats meubles et durs par dragage, carottage et forages.
- Prospection sismique par réfraction ou réflexion.
- Prospection gravimétrique.
- Prospection magnétique.

Il importera de le mettre en jeu avant toute étude d'implantation d'une île artificielle, sur des zones dont la méconnaissance géologique et géotechnique peut amener des avatars financiers ou des catastrophes terribles.

0 0 0

## V. PROTECTION CONTRE LES EFFETS DE L'ENVIRONNEMENT MARIN.

Cette protection doit jouer contre

- l'action chimique de l'eau de mer
- l'action des éléments
- la mauvaise qualité du fond marin.

en vue de maintenir l'île artificielle dans son état initial et la protéger contre toute immersion éventuelle.

### 51. Protection contre l'action de l'eau de mer.

L'environnement marin est très corrosif pour tout ce qui y est plongé.

Cette corrosion s'exerce de différentes manières dans les zones suivantes:

- zone à l'air libre, hors de l'action des vagues, à un taux plus élevé que sur terre.
- zone d'éclaboussure (zone de marnage, zone soumise aux embruns.
- zone sous l'eau.
- zone du fond.

Elle est activée par les dépôts de sel, l'humidité permanente, les variations de température diurne et nocturne, l'ensoleillement, le gel, etc...

Les matériaux résistent plus ou moins bien à cette corrosion.

### 511. Corrosion de l'acier.

La corrosion de l'acier est un phénomène principalement électrolytique, du à des effets galvaniques, l'eau salée ou même les embruns constituent l'électrolyte, les hétérogénéités de l'acier constituent les électrodes..

Le taux de corrosion est relativement élevé.

Les statistiques, données par l'examen des plateformes de forage offshore, montrent que sans entretien sérieux ce taux est de:

- 2 à 6 dixièmes de millimètres par an sous l'eau.
- 6 à 10 dixièmes de mm. par an dans la zone d'éclaboussure.

Aussi une protection sérieuse doit-elle être prévue si l'on veut que la durée de vie du matériau acier soit de l'ordre de 20 à 25 ans.

La lutte contre la corrosion fait appel aux techniques suivantes

- peinture.
- métallisation par zingage
- cimentage
- protection cathodique

Les trois premières techniques ont pour but d'isoler le métal du milieu ambiant:

- soit par une couche étanche et plus résistante que le métal à la corrosion du milieu ( revêtement passif de défense.
- soit par création à la surface du métal de réactions s'opposant à celles qui provoquent la corrosion du métal, ( revêtement actif).

On peut citer comme principaux modes de protection:

- dans les revêtements passifs ou inertes:
  - a: Les enduits de peintures à base de bitume, de goudron ou de caoutchouc.
  - b: Les enduits de peinture epoxy et vinyliques plus onéreuses que les peintures antirouille à base d'huile de lin.
  - c: Les peintures plastiques et les revêtements adhésifs.
  - d: Les revêtements métalliques cathodiques.  
On recouvre l'acier par un métal plus noble, ( nickel, laiton, cuivre, plomb,..)
- dans les revêtements actifs:
  - Les revêtements métalliques anodiques (pro-jection par zingage)
  - Les peintures antirouille à deux couches.

Quelque soit le revêtement utilisé, son adhérence et sa continuité doivent être parfaites.

La protection cathodique a pour principe de porter les surfaces à protéger à un potentiel suffisamment négatif par rapport à l'eau de mer et d'effectuer une électrolyse inverse de celle que constitue le phénomène d'oxydation produit de la corrosion.

Deux procédés sont possibles:

- la protection cathodique par mise en place d'anodes plus électronégative que l'acier.
- Le procédé par soutirage de courant.

0

## 512. Le Béton.

Le béton n'est pas neutre devant l'action d'eaux agressives qui peuvent attaquer sa composition chimique, en particulier par l'action des sels de chaux et de magnésie sur les composants du ciment.

L'action de l'eau de mer est à la fois :

- mécanique, par le choc des vagues en particulier et par toutes les attaques consécutives à l'action des éléments réunis.
- physique. ( cristallisation de sels)
- chimique.

Elle se produit principale dans la zone de marnage et au dessus, mais très rarement dans les parties très constamment immergées.

Dans les zones de marnage l'action mécanique est double: délavage interne et érosion de la surface.

La corrosion électrolytique des bétons armés et précontraints se se produit chaque fois que l'eau de mer, ayant pu pénétrer dans les pores du béton, s'évapore en y laissant de petits dépôts de sel qui déclenchent une action électrolytique conduisant à une détérioration chimique du béton et une corrosion progressive et sérieuse des fers.

Cette attaque est d'autant plus active que le béton est plus poreux et contient de ce fait un gradient élevé d'oxygène dans ses cavités en contact direct avec l'acier des armatures.

L'imperméabilité parfaite du béton s'oppose donc à toute corrosion de ce type.

Cette imperméabilité est aujourd'hui obtenue dans les bétons marins et aucune couche de protection n'est estimée nécessaire.

C'est donc la possibilité de dégradation superficielle du béton qui peut favoriser la corrosion électrolytique et chimique et il importe d'y pallier.

Les mécanismes possibles de ces dégradations sont:

- la destruction de la couche superficielle par des actions mécaniques et des chocs.
- l'action du gel et la formation de couches de glace internes, qui conduisent à des infiltrations d'eau de mer, l'hydrolise du ciment et la corrosion des armatures.

Les palliatifs sont:

- une protection superficielle des zones soumises à des actions mécaniques par un revêtement approprié.
- une protection des armatures métalliques par anodisation, revêtement plastique et un bon enrobage du béton.
- la réparation immédiate de toutes les dégradations repérées, opération facile avec le béton.



L'eau de mer a une agressivité différente, en particulier sur le béton, suivant sa composition chimique et la localisation de l'île.

Les éléments commandant cette agressivité sont en particulier:

- la salinité, le  $p^H$  et la température de l'eau de mer
- l'amplitude des marées.
- l'agitation superficielle.
- l'action biologique marine.
- la rigueur du climat et le gel.

Il importe de connaître parfaitement toutes ces données afin d'utiliser le béton le plus approprié et le moins corrosif.

#### 513. Le Bois.

L'action est surtout biologique et particulièrement importante dans les zones de marnage ou de batillage.

Par contre des ouvrages en bois constamment immergés se comportent très bien pendant des siècles.

On y pallie par:

- utilisation de bois résistants (essences rares)
- enduit au coaltar
- Flambage.
- créosotage
- doublage en cuivre ou en zinc
- rivetage et maillage.

#### 514. Les Plastiques.

Bien que ces matériaux ne soient pas utilisés depuis très longtemps, ils ont prouvé tant en laboratoire qu'en utilisation courante un bon comportement en mer.

O O O

#### 515. LE FOULING.

Les salissures, qui s'accrochent et se développent dans tout ce qui est immergé, favorisent énormément la corrosion par des processus physico-chimiques et mécaniques, dénommés "fouling".

L'action des salissures est diverse:

- accroissement de la rugosité.
- accroissement du poids
- accélération de la corrosion, parfois quadruplée.

Un grattage de toutes les parties délicates d'une île artificielle soumise au fouling ( piles, piliers, structures flottantes etc..) doit être réalisé au moins une fois par an; les parties en acier doivent être repeintes après.

Il existe des peintures anti-fouling, mais leur toxicité disparaît rapidement.

Il faut procéder à un revêtement assez épais, résistant et très adhérent pour résister à l'action de ces organismes vivants.

Le facteur entretien jouera une grande importance dans la vie de toute île artificielle et dans le domaine de la lutte contre la corrosion, des équipes d'entretien à base de plongeurs seront nécessaires en permanence.

O O O

## 52. PROTECTION CONTRE L'ACTION DES ELEMENTS.

La protection des îles artificielles contre l'action des éléments a pour but de rendre l'île artificielle inattaquable et indestructible sous le choc des vagues et la violence des courants.

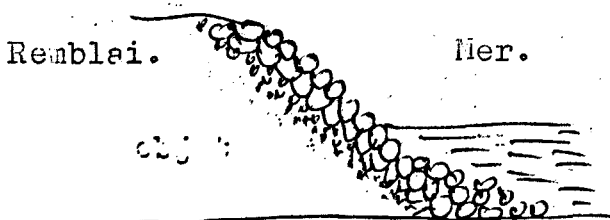
Cette protection est réalisée par des ouvrages de défense classique, relevant de la technique des travaux maritimes:

- revêtement des berges de l'île.
- digues.
- brise-lames.

### 521. Revêtement des berges de l'île.

Quand une île artificielle est réalisée par un amoncellement de matériaux divers directement versés dans les flots, il est évident que ces berges doivent être soustraites à l'action destructrice des vagues.

Figure 1.



La protection de tout autre type de berge doit également faire l'objet de travaux de revêtement complémentaire.

Ces ouvrages de revêtement sont des "perrés" classiques.

Le perré est constitué d'une maçonnerie de pierres dures ou de galets tout-venant, reposent sur une couche de matériaux filtrants. ( Figure 1 ).

Les revêtements sont constitués par des perrés maçonnés, où les enrochements ou les blocs en béton sont liés par un mortier de ciment ou un mastic de bitume.

Le couronnement comporte un revêtement étanche ( pavage-dallage, etc..)

Si la hauteur de l'île au dessus du niveau de la mer est insuffisante, le couronnement doit comporter un parapet suffisamment résistant et assez haut pour réduire le franchissement par les lames déferlantes qui pourraient provoquer l'érosion de la partie supérieure de l'île et de l'intérieur de la protection.

### 522. Digues.

On peut concevoir en bordure extérieure de l'île la construction d'une véritable digue, véritable ouvrage de choc, destiné à empêcher toute action directe des vagues sur l'île.

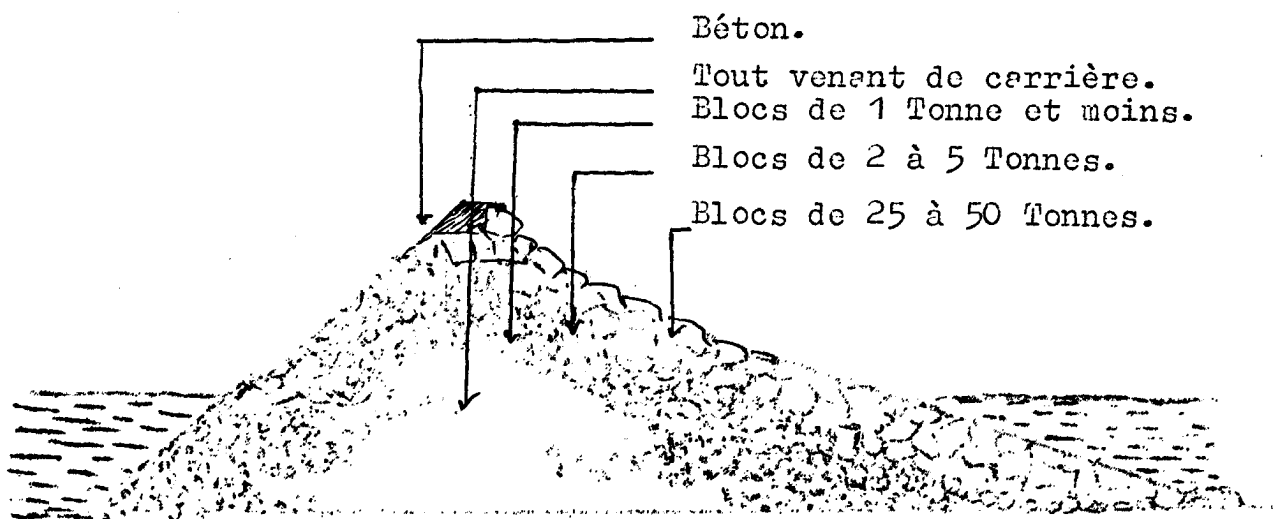
Suivant leur construction, les digues sont du type

- à talus
ou - vertical.

La digue à talus est constituée par : (figure 2)

-une infrastructure en enrochement naturel, avec ou non un noyau en sable naturel ou en argile et comportant une carapace en blocs de poids élevé, naturels ou artificiels (tétrapodes-tribars-blocs de 20 à 100 tonnes et plus) ou un revêtement en enrochement lié par un mastic de bitume.

Figure 2.



Digue à Talus.

- une superstructure constituée par un couronnement émergent et résistant aux vagues les plus violentes.

La digue verticale est constituée par une muraille en maçonnerie (figure 3) ou plus souvent en blocs de béton empilés (figure 4) ou en caissons préfabriqués (figure 5) ou en palplanches (figure 6).

Elle est généralement fondée sur une infrastructure en enrochements naturels aux talus protégés contre l'action de la houle par des blocs naturels ou artificiels de tonnage élevé.

Figure 3.



Figure 4.

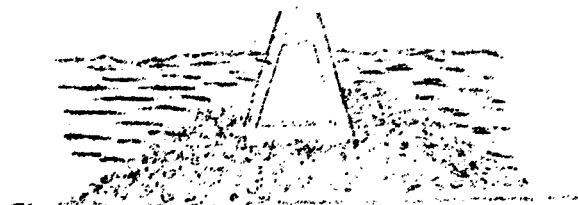
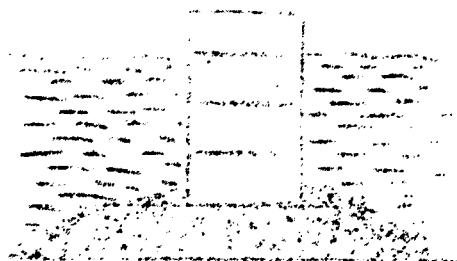


Figure 5.

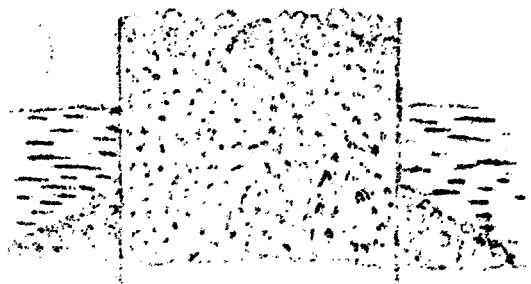


Figure 6.

### 523. Brise-lames.

La majeure partie de l'énergie de la houle est concentrée à la partie supérieure de la masse liquide.

En interrompant le mouvement de cette partie supérieure on réduit l'agitation et la hauteur des vagues en aval de l'ouvrage par rapport au sens de la propagation de la houle.

Pour être efficace, un brise-lame doit avoir des dimensions importantes, car l'énergie en tonnes-mètre par mètre de longueur de crête varie extrêmement vite avec la houle.

Elle est de:

0,6	Ton/m	pour une houle de $T= 2$ sec. et d'amplit. 0,90 mètre							
7	-	-	-	-	-	3	-	-	2
40	-	-	-	-	-	4	-	-	3,5
200	-	-	-	-	-	8	-	-	4
850	-	-	-	-	-	16	-	-	4

Cette variation de l'énergie avec les périodes de houle se répercute sur le dimensionnement des brise-lames flottants en particulier.

Si un engin de dimensions données a une certaine efficacité sous l'action d'une houle de période  $T$ , pour avoir la même efficacité pour une houle de période  $k \times T$ , ces dimensions devront être multipliées par le carré de  $k$ , le poids et le volume correspondant par la puissance 4 de  $k$ .

Les brise-lames superficiels sont de plusieurs types:

- brise-lames discontinus.
- brise-lames flottant.
- brise-lames pneumatiques ou hydrauliques.

5231. Les brise-lames discontinus, très utilisés en U.R.S.S., sont de simples poutres, portées par des piles ou des pieux et émergeant de l'eau, la hauteur d'immersion étant fonction du coefficient d'amortissement recherché.

5232. Les brise-lames flottants sont tout simplement des obstacles flottants, dont on connaît plusieurs types brevetés.

52321. Brise-lames HARRIS & SUTHERLAND.

Ce brise-lames est constitué par une série de poutres creuses en béton armé, remplies de polystyrène expansé et disposées en zig-zag continu sur la mer, recouvrant ainsi une surface où les vagues se brisent et meurent.

La dissipation de l'énergie est progressive le long du brise-lames et les forces auxquelles sont soumises les chaînes d'amarrage sont assez faibles.

Les expériences en cours ont prouvé que les vagues dont la longueur d'onde est de moitié de la largeur du brise-lames sont totalement neutralisées.

Ces brise-lames, d'un coût encore élevé, soulèvent des problèmes délicats d'amarrage; ils peuvent également constituer un danger pour la navigation et en cas de bris d'amarres, ils peuvent être à l'origine de dégâts sérieux aux structures de l'île qu'ils ont à protéger.

52322. Brise-lames type "Sea-City."

Le brise-lames flottant, conçu par les promoteurs du projet de la Sea City, est un cordon protecteur, composé de longs tubes flexibles en matière plastique renforcée, remplis d'eau douce à 90 % de leur volume et flottant sur la mer.

Ce brise-lames qui pose les mêmes problèmes d'ancrage que le précédent, ne constitue cependant pas un danger en cas de bris d'amarres.

52323. Brise-lames type "H.M. BUSEY"

Ce brise-lames, étudié pour le compte de la Douglas Corporation par l'ingénieur H. Busey, est composé de cylindres flottants en béton armé, reliés entre eux et forment un cordon continu autour de l'île, dont il est solidaire.

Les dimensions des cylindres, disposés sur plusieurs lignes parallèles, sont calculées pour obtenir une diminution progressive de l'amplitude des vagues et leur annulation totale à la périphérie de l'île.

52324. Brise-lames type SOGREAH.

Les études menées par la Société Française Sogréah en vue d'utiliser des éléments flottants comme brise-lames ont abouti à un type d'appareil de protection contre les houles courtes de période comprise entre 2 à 4 secondes environ.

Son application n'est cependant envisagée que pour la protection de plans d'eau de faible étendue où l'action du vent n'agit que sur des distances limitées.

5233. Brise-lames pneumatiques.

En injectant un fort courant d'air au moyen d'un tube perforé posé au fond de l'eau, la turbulence créée par cet air absorbe une grande part de l'énergie de la houle et amortit son amplitude sans en modifier la longueur d'onde ni la période.

L'amortissement peut atteindre 92 %.

Ces brise-lames sont surtout intéressants pour des travaux provisoires car en cas de panne ils peuvent laisser l'île sans aucune protection.

Ils ont été utilisés en U.R.S.S et en Grande-Bretagne.

#### 524. Autres dispositifs de protection.

Une attention toute spéciale doit être apportée aux digues à parois perforées type "JARLAN " aux résultats concluants.

Des réalisations ont été faites au Canada et en France à Roscoff.

Ces digues pouvant être réalisées à terre sous forme d'éléments caissons peuvent être très utiles pour la protection d'îles artificielles.

0

On citera pour mémoire:

- les brise-lames hydrauliques utilisent un même principe que le pneumatique.
- le filage d'huile, procédé connu depuis des siècles et pouvant avoir encore son utilité en période de travaux.
- le rideau flottant d'algues artificielles, qui n'est encore qu'une vue de l'esprit mais qui peut se développer.

#### 525. Caractéristiques intéressant la Protection.

Il est évident que l'importance et le volume des ouvrages de protection sont fonction de plusieurs paramètres qui sont:

- la hauteur de vague.
- la profondeur de l'eau.
- la pente des berges de l'île.

Il est démontré que l'importance du revêtement croit proportionnellement au cube de la hauteur de vague et en raison inverse de la pente du revêtement.

C'est ainsi qu'à un accroissement de 10 % de la hauteur de vague correspond un accroissement de 33 % du volume du revêtement.

Par ailleurs le déferlement des vagues sur les berges de l'île est une fonction connue de la pente comme l'a montré M. Miche pour des inclinaisons supérieures à 20°.

Cependant des essais en bassin ont montré des résultats très intéressants pour les très faibles pentes, pour lesquelles le ratio Longueur de déferlement / Hauteur de vague varie proportionnellement à la pente.

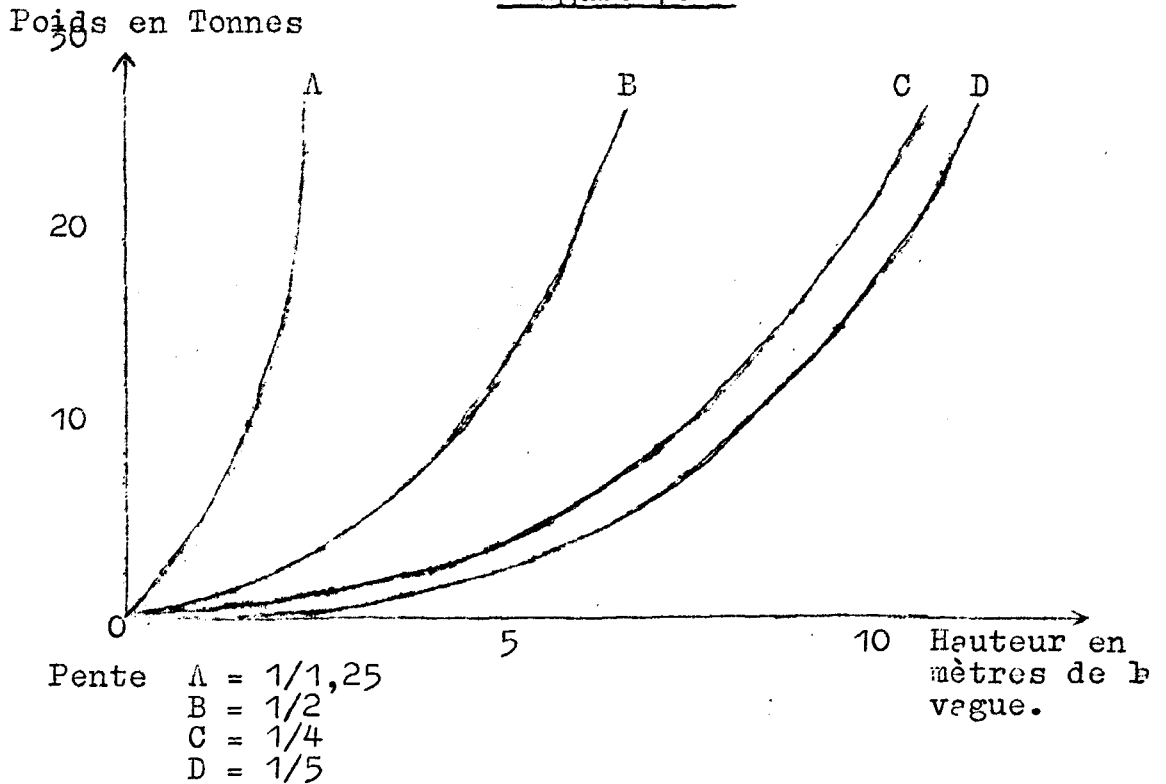
Ce ratio  $R/H$  a en effet les valeurs suivantes:

Angle d'inclinaison	Pente	$\frac{R}{H}$
4°	0,07	0,25
6°	0,10	0,7
9°	0,15	0,75
11°	0,20	0,8
14°	0,25	1 à 1,2

On voit donc l'intérêt des faibles pentes dans l'atténuation des effets des vagues.

Cet intérêt se manifeste en particulier dans le poids des blocs de protection comme le montre les courbes suivantes:

Figure 7.





53. PROTECTION CONTRE LA NATURE DU FOND.

Le fond de la mer, par sa nature, peut influencer les conditions d'implantation d'une île artificielle, pour diverses raisons dépendant du type de cette dernière.

Les couches de vase trop molles rendent plus délicate la réalisation des remblaiements, la construction des digues, en particulier d'une digue-polder, l'édification de piles ou l'ancrage d'île flottante.

Les fonds accidentés rendent plus difficile la repose sur le fond d'une île-caisson.

L'action à mener est une préparation du sol sous-marin afin de disposer d'un bon sol, par des moyens techniques appropriés qui seront étudiés pour chaque type d'île artificielle.

0 0 0

II ème PARTIE.

DES DIVERS TYPES D'ILES ARTIFICIELLES.

Les îles artificielles, structures nouvelles créées par la main de l'homme à la surface des mers relèvent, comme il l'a déjà été dit sommairement des types suivants:

A/ Ile-Remblai.

Elle est le résultat du remblaiement total de la partie liquide à laquelle on prétend substituer un volume solide dont la face supérieure hors d'eau sera constamment utilisable par l'homme.

B/ Ile-Polder.

La construction d'une digue à la périphérie de la surface convoitée et l'assèchement du volume liquide ainsi délimité réalisent la mise à sec d'une zone-polder utilisable par l'homme.

C/ Ile-Plateforme.

Elle est réalisée par la construction d'une plateforme à un ou plusieurs niveaux, prenant appui sur des piles ou piliers reposent ou fichés sur le fond.

D/ Ile-Flottante.

C'est une plateforme horizontale à un ou plusieurs niveaux flottant sur la mer comme un radeau.

E/ Ile-Caisson.

Elle est constituée par un caisson d'une hauteur supérieure à la profondeur de la mer sur le lieu de réalisation.

Ce caisson repose sur le fond, dont il est sciemment uni par enrobage bétonné, fixation par pieux battus ou système d'amarres.

Ce type d'île est un cas dérivé de celui de l'île-flottante.

## VI. ILES ARTIFICIELLES EN REMBLAI.

Le remblaiement de la mer a été la méthode la plus couramment utilisée dans les zones côtières peu profondes pour gagner des espaces sur l'eau par son remplacement par les matériaux solides les plus variés (Sable- terre - béton- débris ou déchets divers- ..).

Les exemples d'aménagements côtiers sont déjà fort nombreux dans le monde:

- infrastructures portuaires: Marseille-  
-aérodromes côtiers :Hong-Kong . New-York.  
Nice. Gênes. Marignane.
- extensions urbaines : Chicago.

Les exemples d'iles artificielles sont encore assez rares, mais existent en nombre de plus en plus élevé.

Un des exemples les plus typiques est celui des iles artificielles de la ville de Long-Beach en Californie(U.S.A.) qui à des fins d'exploitation pétrolière ont été construites au nombre de 4 depuis 1966.

L'ile de Pulau Bukom au large de Singapour en est un autre exemple encore plus important.

0

La réalisation d'iles artificielles de ce type pose deux problèmes importants:

- le remblaiement en mer.
- la protection de ce remblaiement contre l'action des éléments.

0

### 61. Le Remblaiement.

Dans les extensions terrestres, deux techniques sont appliquées:

- le remblaiement par avancement.  
En partant du rivage, on gagne progressivement du terrain sur la mer, en y déversant des déblais, le plus généralement d'origine terrestre, dans l'eau.
- le remblaiement endigué.  
L'étendue à remblayer est ceint<sup>o</sup> par une digue et on comble ensuite le volume ainsi limité par des déblais d'origine terrestre ou hydraulique.

Ces deux techniques se retrouvent dans la réalisation des îles artificielles en remblai; le remblaiement endigué sera le plus couramment utilisé, imposé par l'utilisation de déblais hydrauliques; le remblaiement par avancement suppose d'ailleurs qu'une partie de l'île ait pu être réalisée pour permettre l'installation d'un chantier.

Les techniques de remblaiement sont par ailleurs des plus variées car elles sont fonction

- du fond marin
- des matériaux de remblaiement.
- de la profondeur à remblayer.
- de la force des éléments et de la météorologie.

0

#### 611. Le Fond Marin.

Sur de grandes étendues, le fond marin peut être composé de couches de taux de portance ou de compressibilité différentes qu'il importe de connaître avec précision pour conduire le remblaiement avec soin et éviter des tassements variables sur toute la surface de l'île.

C'est ainsi que pour le port de New-York, l'un des plus stables remblais est celui de l'aérodrome Kennedy et l'un des plus instables est celui de l'aérodrome de La Guardia.

L'extension de ce dernier aérodrome fait sans précaution majeure sur des couches très compressibles a fait apparaître un tassement total de 5 mètres, qui se poursuit actuellement au rythme de plusieurs centimètres par an.

Des zones de vase très fine, à très fort pourcentage d'eau devront parfois être draguées jusqu'à des couches plus portantes.

D'autres devront être recouvertes d'une couche intermédiaire, formant séparation entre le fond et le remblai; cette couche peut être

- de sable.
- de fascines
- une couverture en matériaux plastiques ( fibres de polypropylène ou de polyester à caractéristiques mécaniques élevées.)

D'autres pourront être rendues plus compactes par divers procédés dont les plus connus sont d'ordre mécanique ou physico-chimique, qui seront décrits dans le compactage des remblais.

On évite ainsi des phénomènes de fluage de la vase sous forme de bourrelet ou des absorptions importantes de remblais.

## 612. Les matériaux de remblaiement.

Les matériaux de remblaiement sont

- d'origine terrestre ( déblais de terre-  
démolitions- cailloutis- rocs, etc..)

- d'origine hydraulique( sable- graviers ,etc )

Les matériaux hydrauliques seront les plus généralement utilisés, surtout si la localisation de l'île est éloignée des côtes.

Cependant les matériaux terrestres seront nécessaires pour certaines parties du remblaiement et pour sa protection contre l'action des éléments.

Leur nature influence trois stades de leur utilisation:

- leur extraction.
- leur transport.
- la mise en remblai.

### 6121. Extraction.

Les matériaux hydrauliques, dont il sera seulement parlé, sont retirés du fond marin par dragage.

Les dragues utilisées sont de divers types, fonction de la nature du fond:

- Drague Aspiratrice-refouleuse.

La mixture de matériaux solides et d'eau, dont la concentration varie entre 10 et 30 % en produits solides, aspirée par la drague, est refoulée dans une conduite flottante ou dans des chalands.

Certaines dragues sont équipées d'un bec d'aspiration (dust span) qu'elles essayent d'enfoncer à l'avancement dans les couches à exploiter.

Dans les sols cohérents l'emploi d'un couteau désagrégateur ( cutter) permet d'augmenter la concentration de la mixture.

Pour les matériaux fins (vases sableuses), en particulier à grande profondeur, on utilise un système "hydro-jet"; le vide créé au bec d'aspiration, par effet de Venturi, par injection d'un courant d'eau à grande vitesse, réalise une désagrégation du sol, qui augmente le rendement de la drague.

Dans certaines dragues, l'aspiration des matériaux est produite par l'action d'un violent courant d'air comprimé, projeté au fond et entraînant dans sa remontée une mixture d'eau, d'air et de matériaux solides de dimensions parfois importantes.

Ces dragues peuvent travailler par des fonds de 30 à 40 mètres; cependant le Japon a mis en réalisation des dragues pouvant travailler à 100 mètres de profondeur.

Leur rendement peut varier de 500 à 2.000 mètres cubes à l'heure.

Elles ne peuvent travailler que dans des houles inférieures à 1 mètre ou des courants inférieurs à 4 nœuds.

- Drague Aspiratrice à puits.

Ce type de drague qui agit également par succion refoule la mixture aspirée dans ses puits ou dans des chalands.

La durée de remplissage des puits en sable de 0,1 mm est de l'ordre de 2.000 mètre-cubes par heure; les dragues modernes ont des puits de 5.000 mètres cubes et on envisage 10.000 M<sup>3</sup>.

Elles peuvent travailler dans des houles atteignant 2 mètres et par des fonds de 25 mètres; l'emploi de systèmes de mise en vitesse de l'eau d'aspiration permettra de porter cette profondeur à 50 mètres (Japon).

- Drague à Benne preneuse.

Une drague à benne preneuse peut travailler en site relativement exposé à la houle.

Son rendement est assez faible, dépendant de la capacité de la benne; un engin équipé de grues avec benne de un mètre cube a un rendement de l'ordre de 40 mètres cubes par heure sur fond de sable à 10 mètres de fond; le rendement est encore plus faible avec des galets, graviers ou sur un fond de forte cohésion.

La profondeur de travail est pratiquement limitée à 20 ou 30 mètres; il n'est cependant pas impossible que, devant la demande, des engins de grande capacité (5 à 10 mètres cubes) ne soient pas réalisés et à des possibilités d'action plus profondes.-

- Drague à cuiller (dipper-dredge)

C'est une véritable pelle mécanique flottante; avec une cuiller ou godet de 6 mètres cubes le rendement horaire est de 250 mètres cubes.

La profondeur maximum de dragage est de 20 mètres environ.

- Drague à Godets.

Les dragues à godets peuvent être utilisées dans presque tous les fonds: vase-sable-galets-rochers fissurés ou brisés par engins de déroctage ou explosifs.

La capacité des godets peut être de plusieurs mètres cubes.

Les profondeurs usuelles de travail sont comprises entre 5 et 25 mètres, mais on pourrait concevoir des dragues plus puissantes travaillant à plus grandes profondeurs.

Avec des godets de 2 mètres cubes, le débit d'une telle drague peut atteindre 500 mètres cubes-heure.

0

On voit donc que l'extraction des matériaux est fonction du fond exploité et du type de drague disponible.

6122. Transport des matériaux dragués.

Le transport des matériaux hydrauliques extraits du fond peut être réalisé de diverses manières:

- par refoulement dans des pipe-lines dont les canalisations sont posées au fond ou soutenues sur l'eau par des flotteurs au droit des rotules des tuyaux, source de pertes de charge importante.

La granulométrie des matériaux joue un rôle important dans ce mode de transport, car la vitesse critique de dépôt dans les conduites est fonction de la vitesse du courant et du diamètre des particules.

Cette vitesse se situe entre 1,50 mètre/seconde pour des grains de  $\varnothing = 0,1$  mm et 5 à 6 m/s pour des  $\varnothing$  de 1,2 mm.

Les matériaux sont d'ailleurs divisés en 3 classes suivant la vitesse de chute des grains.

- 1ère Classe Grains de  $\varnothing$  compris entre 0,05 et 0,15 mm dont la vitesse de chute est proportionnelle au carré du diamètre.
- 2ème classe. Grains dont la vitesse de chute est proportionnelle à une puissance du diamètre se situant entre 2 et 0,5.
- 3ème classe. Grains de  $\varnothing$  supérieur à 1,2 mm dont la vitesse de chute est proportionnelle à la racine carrée du diamètre.



Par ailleurs l'écoulement des mixtures dans les pipe-lines donne lieu à des pertes de charge variables et fonction du produit en suspension.

- par drague auto-porteuse, dont les puits : a remplis sur les lieux de dragage sont vidés par clapetage sur le lieu de remblaiement.

qui/

- par chalands, remplis sur les lieux de dragage ( ou à terre) sont vidés sur le lieu de remblaiement:

- chaland à clapet, vidé par clapetage
- chaland à fond fixe, vidé par un refouleur ou un élévateur à déblai.

### 6123. Remblaiement.

Le remblaiement peut se concevoir de deux manières:

- remblaiement libre par décharge directe des déblais sur la localisation non préparée.
- remblaiement endigué.

Les dépôts de matériaux dans une profondeur d'eau d'importance croissante se structurent en fonction de leur densité, de la hauteur d'eau, de la vitesse du courant dans le pipe-line et de celle des courants marins.

Les plus fines particules de matériaux sont séparées hydrauliquement des plus grosses, qui se déposent en premier et constituent souvent en front de remblaiement des couches fortement compressibles, dont il importe d'éviter la formation dans les zones à fortes charges.

Aussi très souvent dans les remblaiements de grande superficie, on reprend après dépôt les matériaux les plus gros par benne ou bulldozer sous-marin pour les reporter sur ces dernières.

On peut cependant arriver à utiliser un tel procédé dans diverses profondeurs en maintenant vertical le déversoir du pipe-line dans l'eau ou hors de l'eau; les déblais tombent alors verticalement et le remblaiement a une homogénéité suffisante.

On arrive par un tel procédé à avoir des pentes de remblai de l'ordre de 1/2.

Cependant la technique la plus employée sera celle du remblaiement endigué, qui pallie une dispersion et une perte importantes des déblais.

Ce remblaiement endigué peut être conduit de deux manières:

1°/ La digue de retenue peut être construite totalement avant le remblaiement jusqu'à émergence complète à une hauteur suffisante pour assurer une protection sûre des travaux contre l'action des éléments.

Elle est composée, autour d'un noyau d'éléments hydrauliques, de matériaux terrestres (rocs- blocs- matériaux de démolition) et d'éléments préfabriqués à terre et construite suivant les techniques connues des travaux maritimes.

Elle sera ensuite, améliorée, l'élément de protection de l'île artificielle dont elle aura défini le profil. Dès que cette digue sera à un stade suffisamment avancé le remblaiement peut être commencé dans la partie déjà protégée.

Surtout dans les mers à forte marée, un point délicat apparaît à la fermeture totale de la digue; cette opération ne doit être faite en effet qu'après le remblaiement quasi-total afin de permettre l'évacuation des eaux de dragage; des courants très violents se manifestent dans la passe ainsi créée et peuvent causer des dégradations sérieuses à la digue et faire perdre d'importantes quantités de déblais.

2°/ On se contente de ceinturer la totalité de la zone à remblayer par une digue de retenue de quelques mètres de haut-2 à 4 mètres-totalement immergée.

On remblaie la zone ainsi délimitée.

Lorsque le remblaiement arrive à hauteur du sommet de cette digue, on édifie sur le remblai ainsi formé une deuxième digue de retenue des déblais.

L'opération se poursuit autant de fois que nécessaire jusqu'à hors d'eau.

Ce procédé est employé dans la construction de quais en eau profonde (Long-Beach. USA) et a été mentionné dans divers projets à l'étude dont celui de la centrale nucléaire de l'île BOLSA (USA).

3°/ De plus en plus l'emploi de palplanches métalliques profondément enfoncées dans le fond se développe pour des profondeurs de 10 à 20 mètres.

Ces palplanches peuvent être disposées de manière jointive, parfois sur deux plans parallèles ou non-jointive, permettant la mise en place d'une paroi verticale souple en matière plastique permettant une retenue suffisante des déblais hydrauliques. ( Procédé VIDAL).

#### 6124. Stabilisation du Remblaiement.

Le problème de la stabilisation des remblais est un problème majeur à terre, encore plus en mer.

Ces remblais sont en effet recouverts par l'eau de mer pendant toute la durée du remblaiement; cette eau reste emprisonnée dans les couches de remblais successives et entre les grains des matériaux, ce qui rend le remblai impropre à supporter des charges élevées avant tassement définitif et ce avant plusieurs années.

Il est donc nécessaire dans des travaux importants de hâter le processus de consolidation et le tassement définitif afin de pouvoir édifier en toute sécurité les constructions définitives.

De nombreux procédés sont utilisés:

##### 1°/ Le compactage -procédé MENARD.

On fait tomber de plusieurs mètres de hauteur, une masse de plusieurs tonnes qui par son martèlement incessant chasse l'eau.

Le degré de tassement est fonction du poids de la masse et de la hauteur de chute.

L'idéal serait d'alterner des couches sableuses et d'autre matériau.

##### 2°/ La vibro-Flottation.

Dans cette méthode, mécanique comme la précédente, un vibreur pénètre par son propre poids dans les couches à compacter et forme une excavation remplie immédiatement par des matériaux divers (sable- cailloutis -etc..) ou par les matériaux du remblaiement lui-même.

Cette méthode est valable pour les couches de sable ou de gros sédiments, mais ne l'est plus pour les couches de vase fine, à moins qu'elles ne contiennent plus de 50 % de sable.

##### 3°/ Electro-Osmosis.

L'application d'un courant électrique entre des électrodes fichées dans le remblai accélère la circulation de l'eau.

Cette méthode, couramment utilisée pour la stabilisation des berges de canal ou les fondations de pont, peut l'être pour des remblais hydrauliques.

#### 4°/ Procédés Physico-Chimiques.

Ces procédés font emploi de produits divers pour la consolidation des diverses couches de matériaux;

- Gel de silice ,principalement pour la consolidation des agrégats.
  - plastifiants divers.
  - Acide Phosphorique.
  - Ciment.
  - Chaux ou mélange de chaux et de cendres fines.
  - Alginates.
  - Floculants et composés chimiques variés
- facilitent cette floculation et la prise des vases.  
etc....

0

#### 62. La Protection du Remblaiement.

La protection d'une île artificielle en remblai contre l'action des éléments et en particulier contre les assauts de la mer est assurée par:

1°/ une élévation du remblaiement hors d'eau le mettant à l'abri des déferlements les plus puissants.

2°/ la réalisation sur sa périphérie d'un ouvrage de protection suivant les techniques des travaux maritimes sommairement décrites au Chapitre V.52.

Ces ouvrages de protection, revêtement des berges de l'île ou consolidation des digues de retenues faites pour faciliter le remblaiement, ont pour but

- d'éviter une forte érosion des flancs et un risque d'affouillement de la base immergée de l'île.
- résister aux surpressions hydrostatiques des remblais, au besoin par des dispositifs de drainage appropriés
- empêcher les effets érosifs des gerbes d'eau projetées par le déferlement des vagues, pouvant attaquer le terrain remblayé en arrière des ouvrages et créer des affouillements dangereux pour les remblais et les ouvrages de protection.

0

De nombreuses solutions peuvent être apportées à la réalisation de cette protection.

##### A/. 1<sup>ère</sup> Solution.

Élévation du remblaiement hors d'eau à une hauteur rendant impossible même avec la vague centenaire le déferlement des vagues sur l'île.

Consolidation de la protection des pentes.

B/. 2 ème Solution.

Elévation du remblaiement hors d'eau à une hauteur moindre que la précédente et surélévation sur le revêtement de protection d'une digue périphérique empêchant tout déferlement.

C/. 3 ème Solution.

Construction d'une digue périphérique avant tout remblaiement à une hauteur identique à celle de la solution 2.

D/. 4 ème Solution.

Construction d'un brise-lames extérieur, puis réalisation du remblaiement sur une des solutions précédentes, en tenant compte de l'amortissement réalisé.

Le choix d'une de ces solutions dépend de nombreux facteurs

- degré de fiabilité
- cout etc.

L'étude de la protection est conditionnée par la valeur de la vague centenaire.

Cette dernière est également commandée par la hauteur d'eau, puisque dans les eaux basses, domaine principal des îles en remblai, la hauteur maximale possible des vagues est de 0,7 à 1 fois celle de la hauteur d'eau.

Ces éléments, hauteur d'eau et vague centenaire, conditionnent la hauteur de l'île au dessus des eaux, ainsi que la forme et le tonnage de l'ouvrage de protection.

On a vu que les pentes faibles réduisent le déferlement, qui est également fonction de la forme du revêtement, de sa rugosité, de la période de la vague et de bien d'autres paramètres qu'il importe de connaître si l'on veut un cout optimal.

Ces données permettent en effet de déterminer grâce aux calculs sur ordinateur les couts minima de tonnage de l'ouvrage de protection et du remblaiement optimal.

Par ailleurs le choix d'une hauteur de vague inférieure à celle de la vague centenaire amènera une diminution sensible des couts de la réalisation

- par diminution de la hauteur, donc du volume du remblaiement.
- par diminution de l'importance du revêtement. Une diminution de 10 % de la hauteur de la vague de calcul entraîne celle de 35% du tonnage des matériaux de protection.

Aussi voit-on l'intérêt de faire des études prévisionnelles afin de connaître la probabilité des dommages que peut subir l'île artificielle pour des hauteurs de vague se situant entre celles de la vague de calcul et de la vague centenaire.

Si cette probabilité est déterminée, on peut calculer le coût d'entretien annuel, qui, capitalisé, peut alors être comparé à l'accroissement d'investissement, conséquence du choix de la vague centenaire et d'une protection totale de l'île.

Un tel calcul d'optimisation peut aussi être fait pour l'étude des digues de protection des travaux si ceci doit durer plusieurs années, ce qui sera le cas pour des îles artificielles de plusieurs dizaines d'hectares.

Il est en effet certain que pendant la période des travaux on aura une probabilité assez faible de vague centenaire; par ailleurs les dégâts causés à la structure seront aisément réparables, sans coûts financiers importants, puisque tout le matériel de chantier est en place.

On voit ainsi dégagé la notion de vague de calcul optimale, bien souvent inférieure dans les projets à la vague centenaire sauf dans les cas où des impératifs de sécurité absolus imposent une protection complète.

Le coût des ouvrages de protection est non seulement tributaire de la hauteur de vague, mais également d'autres facteurs tels que:

- la localisation des ressources de matériaux utilisables.
- leur coût.

Ces matériaux sont généralement d'origine terrestre (Gros blocs - rochers - cailloutis etc..).

Si les carrières d'extraction sont trop éloignées ou trop coûteuses ou trop pauvres, on pourra y pallier par l'emploi de revêtements artificiels (Tétrapodes-Tribars- Akmon-Plaques armées de béton) aux dimensions appropriées, qui pourront être malgré leur coût élevé compétitifs.

### 63. Drainage du remblaiement.

Sous toute surface remblayée, entourée d'eau, existe en permanence une nappe hydraulique.

Son niveau est fonction des marées et des pluies et du pouvoir filtrant de la digue de protection.

Le drainage des eaux dans des conditions optima est d'abord réalisé par le choix d'un matériau de remblaiement à la

granulométrie convenable, puis par la réalisation d'un réseau superficielle de drainage à l'instar d'un drainage terrestre, surtout sur les îles dont la surface ne doit pas rester longtemps inondée après de fortes pluies.

0

#### 64. Technique de l'ingénierie.

La réalisation de grandes superficies remblayées au large des côtes ne soulève aucun problème technologique particulier, même par des profondeurs importantes, peuvent aller à plus de cent mètres.

Par contre elle pose des problèmes logistiques d'autant plus importants que les surfaces à remblayer et les profondeurs sont plus grandes.

Ces problèmes sont dus à

- l'environnement marin, hostile à l'homme.
- l'importance du chantier
- le potentiel humain et matériel à mettre en oeuvre.
- la durée des travaux
- les transports maritimes impératifs.

Une parfaite logistique des hommes, du matériel et des matériaux conditionne la faisabilité des îles artificielles de toute dimension

Aussi import-t-il qu'un maître d'oeuvre coordonne l'ensemble des opérations qui ne peut être le fait d'une seule entreprise, à moins que cette dernière ne soit organisée dans ce sens avec une section engineering puissante.

Les opérations d'engineering peuvent se classer comme suit:

- Définition du projet.
- Recherche de la localisation optimale.
- Planning des opérations techniques et logistiques.
- Exécution des travaux.

#### 641. Définition du projet.

En fonction des objectifs définis par le Maître d'ouvrage, les caractéristiques de l'île (dimensions - forme - etc..) sont établies et la zone de localisation sommairement définie.

#### 642. Recherche de la localisation optimale.

Cette localisation, dans la zone d'implantation choisie, est fonction

- des caractéristiques locales de l'environnement marin
- de caractéristiques géographiques influençant la logistique.

Elle ne peut être fixée qu'après une parfaite connaissance du lieu, résultant d'études diverses permettant de capter les données nécessaires à l'établissement du projet, à savoir:

- Données Marines.

Profondeur d'eau (Lévés bathymétriques).

Caractéristiques du fond (Reconnaisances sismiques sommaires).

Marées (Périodicité- Valeur).

Courants (Mesures courantométriques de vitesse et direction).

Houle et Vagues (Hauteur- Amplitude, etc.)

Salinité.

permettant de connaître avec le plus de précision possible la valeur de la force des éléments.

- Données Météorologiques.

Vents ( Force- Directions.).

Températures.

Pluies.

Secousses sismiques.

- Données Topographiques.

Bas-fonds.

Récifs.

Contours côtiers.

Fleuves.

- Données Géologiques.

Etude et analyse du sol par sondage.

Composition du fond.

Classement des couches (Ordre-Epaisseur)

Pourcentage de retenue d'eau.

Etude gravimétrique.

Etude granulométrique.

Essais de compression.

Essais de cisaillement

Taux de tassement des couches.

Etude des tendances sédimentologiques du littoral quand celui-ci est proche.

- Données sur les matériaux.

Etude des sites d'emprunt des matériaux d'origine:

- Terrestre.

- Hydraulique.

( Conditions d'extraction-Transport- Mise en oeuvre - Cout.)



La connaissance de ces données permettra de définir avec précision la localisation optimale de l'île et d'élaborer le projet définitif d'exécution et le devis estimatif des investissements prévisionnels.

### 643. Planning des opérations techniques et logistiques.

Le projet établi et approuvé, il est nécessaire de définir avec précision:

- la succession des opérations techniques à réaliser et leur planification (Pert).
- les moyens à mettre en oeuvre (Hommes-Matériel-Matériels).
- les moyens disponibles.
- le planning logistique.
- la mise en place es chantiers dont le nombre et l'importance seront fonction des moyens disponibles et des délais imposés.
- Le début des opérations doit, si possible, être fixé en fonction des prévisions d'une longue période de calme relatif.
- la vie du chantier.

Les chantiers mettent généralement en oeuvre des moyens extra-ordinaires:

- Dragues de types divers.
- Pontons-bigues.
- Pontons-grues.
- Navires de service et d'avitaillement.
- Navires d'habitat.
- Centrales d'énergies diverses.
- Effectifs humains importants:
  - Equipes des navires.
  - Ouvriers spécialisés.
  - Travailleurs sous la mer.

dont il importe de prévoir le séjour prolongé sur mer et les rotations indispensables; les travaux sur certains chantiers peuvent en effet durer plusieurs années.

Pour mémoire la réalisation d'une des îles de Long Beach a été d'une durée de dix mois pour 2 hectares,5.

Aussi importe-t-il de choisir les matériels les mieux adaptés au chantier et les effectifs maxima afin de réduire la durée des travaux.

De ce choix dépend en effet:

- la rentabilité du chantier.
- la sécurité du matériel et des hommes.
- la rapidité d'exécution.

#### 644. Exécution des Travaux.

Les plannings techniques et logistiques ayant été lis au point de manière à avoir un rythme de développement optimal, les travaux sont exécutés conformément aux techniques des travaux maritimes et peuvent être schématisés comme suit:

- Protection primaire du chantier contre l'action des éléments afin de rendre minimale la durée des arrêts.
- Préparation du site.  
En particulier si le fond est vaseux des travaux de dragage, fascinage ou tapissage du sol seront nécessaires pour éviter les glissements de remblai, les bourrelets ou une pénétration excessive des remblais.
- Remblaiement de la zone limitée ou non par des digues d'encloture.  
Sur les grandes superficies, on remblaie généralement par zone successive afin d'avoir le plus rapidement possible des zones tassées permettant la construction de bâtiments temporaires ou définitifs.

0

#### 65. Considérations Ecologiques.

La vie sous-marine est totalement anéantie sur toute la surface remblayée.

Elle l'est également pour des délais plus ou moins grands

- sur les lieux d'extraction des matériaux hydrauliques par l'action brutale des dragues.
- sur une large zone autour de l'île artificielle par suite de l'importante masse de vase en suspension, qui en se déposant tue le frais et les organismes benthiques.

L'action nuisible des dragages importants a été mise en lumière; ces dragages sont à l'origine d'une forte production d'ions métalliques, nuisibles à l'environnement marin et sont par ailleurs la source de nuisances oléiques, phénoliques des plus dangereuses.

Aussi n'est-il pas étonnant que dans certains pays et en particulier aux Etats-Unis, ces opérations sont particulièrement surveillées et les rejets sévèrement réglementés.

Il n'est pas impensable que dans les zones à dragages fréquents (Chenaux de navigation, etc) on ne conçoive pas

de zones de " décharge de débris contrôlée " réservée à la création de futures îles artificielles, dont l'intérêt aurait été pensé, minimisant ainsi les dommages résultant d'opérations de dragage répétées, aux conséquences des plus néfastes pour l'écologie marine.

On s'est ainsi aperçu en Australie que les travaux de l'extension de la piste de l'aérodrome côtier de KINGSFORD SMITH avaient occasionné, par suite du dragage d'une très grande zone, des dégâts très sérieux aux plages avoisinantes.

L'affouillement important, qui en était résulté, avait en effet modifié le régime habituel des vagues, en leur conférant une hauteur supérieure, augmentant ainsi leur action érosive sur la côte.

Les expériences faites en bassin réduit ont abouti aux conclusions qu'il fallait étendre la surface de dragage parallèlement à la côte afin d'atténuer les effets enregistés.

Ceci souligne toute l'importance d'études préliminaires sérieuses dans l'implantation envisagée d'une île artificielle, afin de déterminer le plus exactement possible les conséquences de cette implantation sur les courants et les éléments marins, dont les régimes naturels peuvent être bouleversés par la main de l'homme.

Dans ces études il est important de savoir que tout obstacle détaché de la côte et en particulier une île créent une zone de calme relatif favorable à la formation de dépôts sablonneux, dont le nombre est multiple s'il y a plusieurs directions de houle dominantes et qui relieront progressivement l'île à la côte.

Ces bancs de sable, dénommés " Tomolos ", se forment dans les conditions les plus favorables lorsque la distance de l'île à la terre est du même ordre de grandeur que la longueur de l'île et que cette distance est multiple simple de la longueur d'onde de la houle.

Les conséquences que ces phénomènes, universellement connus, peuvent entraîner sont des plus graves, en particulier sur la navigation; ils peuvent être à l'origine de contestations délicates, de travaux coûteux et entraîner la disparition de plages préjudiciable à la vie économique d'une région côtière.

## 66. Couts de construction d'une ile artificielle "Remblai".

Le cout d'une telle ile artificielle peut être sommairement schématisé comme la somme des couts

- du remblaiement nécessaire à la réalisation de l'ile.
- de sa protection ( revêtement ou digue )
- de l'engineering et des études préalables.

Il est par ailleurs fonction d'un nombre important de paramètres:

- surface de l'ile.
- profondeur du site marin.
- localisation off-shore.
- environnement marin.
- cout des matériaux et du dispositif logistique.

qui font qu'aucune règle générale ne peut être donnée quant à un prix unitaire.

## 661. Influence de la surface et de la profondeur.

Les couts à l'hectare d'une ile artificielle varient à profondeur égale avec sa superficie.

Dans ce cas le volume du remblaiement croit proportionnellement à la surface de l'ile, alors que le volume de la protection ne croit que proportionnellement à la racine carrée de cette surface.

L'importance relative de ces deux éléments varie donc énormément avec la surface.

A surface égale le remblaiement a son volume qui croit linéairement avec la profondeur d'eau, si ce remblaiement est enclos par une digue d'enclosure ou un rideau de palplanches.

Ceci est moins exact si le remblaiement n'est pas endigué, car la pente du talus décroît rapidement avec la profondeur.

Si cette pente peut être de 1/2 à 1/4 pour 10 mètres de fond, elle peut atteindre rapidement 1/50 à 1/100 pour des profondeurs plus importantes.

Certains techniciens estiment même que par ce fait le cubage du revêtement à mettre en place varie comme le carré de la profondeur.

En fait des calculs sommaires faits pour des îles artificielles circulaires, dont le diamètre varie de 100 à 7.000 mètres, nous ont donné les résultats suivants avec  
 - des pentes de 1/4 à 1/100  
 - des profondeurs de 5 à 25 mètres.

TABLEAU 8.

Volume total du remblaiement endigué.

Diam.	Surface Hect.	Profondeur		
		5 m.	25 m.	50 m.
100 m.	0,785	39.250	196.250	392.500
500	19,6	980.000	4.900.000	9.800.000
1.000	75,86	3.925.000	18.965.000	39.250.000
2.000	314.	15.700.000	78.500.000	157.000.000.
3.000	700.	35.000.000	175.000.000	350.000.000
4.000	1250.	62.250.000	311.250.000	628.000.000
5.000	1961.	98.050.000	490.250.000	980.500.000
6.000	2830.	141.500.000	707.500.000	1.400.000.000
7.000	3850.	192.500.000	962.500.000	1.923.000.000

TABLEAU 9.

Volume total du remblaiement libre  
 (avec une pente constante de 1/4 à toute profondeur)

Diam.	Profondeur		
	5 m.	25 m.	50 m.
100.	47.150	886.250.	4.072.500
500.	1.060.800	7.160.000	19.750.000
1.000.	4.084.400	23.835.000	55.191.000
2.000	16.015.000	86.650.000	195.600.000
3.000	35.475.000	187.040.000	399.300.000
4.000	63.450.000	330.000.000	693.000.000
5.000	98.840.000	510.000.000	1.064.500.000
6.000	140.946.000	723.800.000	1.495.700.000
7.000	193.600.000	989.250.000	2.035.000.000

TABLEAU 10.

Volume total du remblaiement libre m<sup>3</sup>

( avec une pente constante de 1/50 à toute profondeur)

Diam.	Profondeur		
	5 m.	25 m.	50 m.
100.	482.250.	45.596.250	344.392.500
500.	2.286.000.	69.900.000	431.800.000
1.000.	6.205.000.	108.365.000	559.250.000
2.000.	19.950.000.	217.000.000	873.000.000
3.000.	41.210.000.	363.000.000	1.262.000.000
4.000.	70.410.000.	547.750.000	1.808.000.000
5.000.	108.200.000.	776.250.000	2.285.500.000
6.000.	153.600.000.	1.042.500.000	2.900.000.000
7.000.	207.000.000.	1.346.500.000	3.623.000.000

TABLEAU 11.

Volume total du remblaiement libre en m<sup>3</sup>

( avec une pente constante de 1/100 à toute profondeur)

Diam.	Profondeur		
	5 m.	25 m.	50 m.
100	1.739.250.	173.896.250	1.350.392.500
500	4.250.000.	217.400.000	1.509.800.000
1.000	9.140.000.	290.465.000	1.739.250.000
2.000	24.860.000.	438.500.000	2.247.000.000
3.000	48.050.000.	633.000.000	2.830.000.000
4.000	79.225.000.	868.250.000	3.498.000.000
5.000	118.950.000	1.146.250.000	4.245.500.000
6.000	166.300.000	1.459.000.000	4.960.000.000
7.000	221.250.000	1.814.500.000	5.973.000.000

Ramené à l'hectare, le cubage de remblaiement diminue progressivement avec la surface totale de l'île, comme le montre le tableau suivant:

TABLEAU 12.

( Cubature du remblaiement nécessaire pour un hectare en fonction du diamètre, de la hauteur et de la pente) en Mètres cubes.

Diam.	Pente	Profondeur.		
		5 m	25 m.	50 m.
100	1/4	60.000	1.112.500	5.090.000
	1/50	614.400	58.000.000	438.000.000
	1/100	2.220.000	222.500.000	1.780.000.000
500	1/4	54.050	365.000	1.010.000
	1/50	116.750	3.565.000	22.800.000
	1/100	217.000	11.100.000	77.000.000
1.000	1/4	53.800	314.000	730.000
	1/50	81.800	1.425.000	7.375.000
	1/100	125.000	3.825.000	22.800.000
2.000	1/4	51.500	276.000	624.000
	1/50	63.500	692.000	2.775.000
	1/100	79.600	1.395.000	7.160.000
3.000	1/4	50.600	267.500	573.000
	1/50	58.750	516.000	1.792.000
	1/100	68.700	904.000	4.040.000
4.000	1/4	50.600	264.000	554.000
	1/50	56.300	438.000	1.450.000
	1/100	63.400	694.000	2.795.000
5.000	1/4	50.400	260.000	542.000
	1/50	55.200	396.000	1.165.000
	1/100	60.600	584.000	2.162.000
6.000	1/4	50.000	250.700	531.000
	1/50	54.600	370.000	1.030.000
	1/100	59.100	518.000	1.762.000
7.000	1/4	50.000	250.700	528.000
	1/50	53.800	350.000	940.000
	1/100	57.500	473.000	1.550.000

Ce tableau montre l'influence décroissante de l'inclinaison de la pente au fur et à mesure que la surface de l'île croît.

En particulier pour de faibles profondeurs, 5 à 10 mètres on voit que le prix à l'hectare ne variera pas beaucoup à partir de surfaces de l'ordre de 4.000 hectares, soit celle d'un aérodrome.

Ceci est une des raisons qui incitent les Hollandais, en particulier, à développer cette méthode du remblaiement libre.

0

Le cout du revêtement est fonction de sa cubature.

Cette cubature a été calculée dans l'hypothèse d'une île circulaire sur la base d'un revêtement de 1 mètre d'épaisseur; les résultats en sont les suivants:

TABLEAU 13.

Cubature du revêtement en fonction de la profondeur pour une pente de 1/4.

Diam.	Longueur.	Profondeur		
		5 m.	25 m.	50 m.
100	314 m.	7.540	62.800	188.500
500	1.571.	32.700	188.500	440.000
1.000	3.141,	64.000	345.000	754.000
2.000	6.282	127.000	660.000	1.382.000
3.000	9.425	199.000	974.000	2.010.000
4.000	12.560	252.500	1.287.000	2.640.000
5.000	15.700	315.000	1.600.000	3.270.000
6.000	18.850	378.000	1.915.000	3.890.000
7.000	22.000	441.000	2.230.000	4.525.000.

Des tableaux similaires ont été établis pour des pentes de remblai de 1/50 et de 1/100.

Ils ont permis d'établir le tableau suivant donnant la cubature du revêtement rapportée à l'hectare de surface de l'île, pour une hypothèse de revêtement de 1 mètre d'épaisseur.

Si les calculs imposent un revêtement plus épais, il faudra multiplier par le coefficient correspondant à la surépaisseur appliquée.



TABLEAU 14.

Cubature rapportée à l'hectare du revêtement.  
en mètres Cubes.

Diam.	Pente.	Profondeur.		
		5 m	25 m.	50 m.
100	1/4	9.600	80.000	240.000
	1/50	350.000	6.740.000	25.700.000
	1/100	1.200.000	25.950.000	102.000.000
500	1/4	1.675.	9.600	22.450
	1/50	30.000.	351.000	1.253.000
	1/100	80.000.	1.200.000	4.400.000
1.000	1/4	815.	4.395	9.600
	1/50	12.460	112.000	349.500
	1/100	30.200	349.000	1.200.000
2.000	1/4	405	2.105	4.400
	1/50	5.620	40.600	113.400
	1/100	12.550	113.500	350.000
3.000	1/4	284	1.390	2.870
	1/50	3.640	23.800	61.600
	1/100	7.850	61.600	179.500
4.000	1/4	204	1.300	2.110
	1/50	2.675	16.500	40.800
	1/100	5.650	40.750	113.200
5.000	1/4	160	815	1.675
	1/50	2.100	12.500	30.000
	1/100	4.400	30.000	80.000
6.000	1/4	134	675	1.375
	1/50	1.730	10.050	23.550
	1/100	3.620	23.500	61.000
7.000	1/4	114	580	1.175
	1/50	1.450	8.410	19.350
	1/100	3.060	19.350	49.000

La cubature d'une digue d'enclôture peut être également calculée par avance de manière à avoir un ordre de grandeur des volumes nécessaires et du cout approximatif par hectare.

Cependant ce calcul est des plus sommaires car le profil de la digue est essentiellement fonction des éléments agissants et non seulement de la profondeur.

Le tableau suivant a été établi pour une digue d'enclôture de 3 mètres de largeur à son sommet et ayant des pentes uniformes de 1/4 .

TABLEAU 15.

Cubatures approximatives d'une digue d'enclôture .  
( Cubature totale et cubature rapportée à l'hectare )  
en millier de mètres cubes.

Diamètre de en mètre	Profondeur					
	5 m.		25 m.		50 m.	
	Cub.Tot.	Cub/Hec.	C.T	C/H	C.H	C/T
100	36,2	46,1	808	1.030	3.190	4.060
500	181	9,24	4.040	206	15.960	814
1.000	362	4,77	8.080	106,5	31.850	420
2.000	723	2,5	16.180	51,4	63.600	229
3.000	1.085	1,55	24.250	34,7	95.600	137
4.000	1.460	1,17	32.300	25,85	127.500	102
5.000	1.805	0,92	40.350	20,6	159.400	81,3
6.000	2.180	0,77	48.500	17,1	191.000	67,4
7.000	2.560	0,67	56.600	14,7	223.000	58

On voit que le cubage, rapporté à l'hectare se stabilise pour de grandes surfaces à des valeurs qui croissent effectivement comme le carré de la profondeur.

0

D'autres procédés de protection des îles artificielles pourraient être étudiés et utilisés, comme ils le sont dans la construction de quais ( caissons flottants et immergés-etc..).

Un procédé qui semble devoir prendre une certaine extension avec le développement des îles artificielles paraît devoir être celui des murs-rideaux en palplanche métalliques ou en béton.

Son utilisation semble devoir être d'un coût plus élevé que celle des procédés traditionnels, mais dans certaines circonstances cette technique présentera des avantages certains.

Ce coût variera de plus en fonction de la surface à ceinturer et le coût à l'hectare diminuera rapidement avec des îles de très grande superficie.

C'est ainsi que pour quelques centaines de mètres de quai, on peut tabler dans certains ports ce coût à 5.000 francs le mètre linéaire apr des profondeurs de 13 mètres environ.

Or les prix estimés par les techniciens Américains pour des îles de plusieurs hectares ( 5 à 10 hect.) sont les suivants:

- les palplanches étant supposées fichées dans le fond sur une longueur de 3 mètres et émergeant de 5 mètres au dessus de la surface, ce prix est de

1500 francs le mètre lin.	pour un fond de 5 m.
1.600 - - - - -	7,5 m;
1.750 francs - - - - -	- de 10 à 15m.

0

## 662. Influence du coût des matériaux.

Le coût de construction de l'île est certes fonction des cubatures à mettre en oeuvre et calculables aisément à l'aide des tableaux précédents, mais il est également fonction du coût des matériaux utilisés, dont les prix de revient peuvent varier de 1 à 100.

Ces prix sont par ailleurs fonction de la surface de l'île, de la qualité du fond, de la position des sites marins et terrestres d'extraction.

Une importante société de dragage Néerlandaise fait état pour ses travaux exécutés en 1971 dans le monde entier de prix très divers, dont la plupart s'échelonnent entre 1 et 10 francs le mètre cube, avec un maximum de fréquence entre 3 et 4 francs, quelques prix exceptionnels se situant à 60, 90 et 100 francs le mètre cube.

Dans le cadre des travaux du port de FOS-MARSEILLE, le cout du mètre cube a varié entre 1,5 et 2 francs le m<sup>3</sup> pour le sable hydraulique et les limons et entre 3 et 6 francs pour les graviers et galets.

Pour les projets des extensions des pistes des aérodrômes de Nice et de Marseille, les prix se situent entre 4 et 7 frncs le mètre cube.

Le cout du compactage est estimé à 3 francs 50 le mètre carré avec des puissances de 100 tonnes/mètre carré et à 7,50 avec des puissances triples.

Le cout de la vibroflottation peut être estimé, bien qu'il soit très variable, car fonction des déblais et de nombreux autres facteurs, à 2 ou 3 francs le mètre cube.

0

Les couts des déblais terrestres sont également très variables, car ils sont fonction

- du cout des matériaux extraits
- de la distance des carrières d'extraction au port de chargement
- de la distance du trajet maritime.

Ces couts au mètre cube sont de l'ordre de grandeur suivant

- cout du m<sup>3</sup> de sable ou de gravier. 6 à 12 frs.
- transport/camion : 0,50 à 1 francs/kilomètre.
- transport maritime: 4 à 10 francs le mètre cube en prenant pour base le cout d'un remorqueur; et d'un chaland à 6.000 francs/ jour.

0

### 663. Influence de la localisation en mer et de l'environnement marin.

L'influence de ces deux facteurs sur l'aspect logistique de l'opération a déjà été évoquée.

Les transports maritimes sont d'autant plus onéreux que la distance est plus grande et que les conditions de la mer sont plus mauvaises.

Aussi la recherche d'une localisation optimale a-t-elle une grande importance.

Certains emplacements peuvent être plus ou moins bien abrités, en particulier dans certains golfes ou petits bassins de mer et ce choix peut faire varier fortement le coût de la réalisation.

0

664. Coûts comparés.

Les développements précédents montrent toute la diversité qui peut apparaître dans le calcul du coût de réalisation d'une île artificielle-remblai.

Aussi n'est-il extraordinaire que les coûts à l'hectare estimés ou réalisés dans divers projets soient très différents comme le souligne les tableaux suivants :

TABLEAU 15.

Coût à l'hectare de divers projets d'île-remblai.

Localisation	Hrs.		Coût en francs.
	Surface	H/mer	
Copenhague	2.500	2 m.	105.000
Londres	20.000	4	250.000
Boston	720	8	250.000
Hong-Kong (1)	70	8	1.000.000
Bolsa	18	8	10.000.000
Chicago	1.450	10	690.000
Straford.	1.000	15	1.250.000
Long beach	130	16	730.000
"	2	12	4.000.000
Kagoshima	70	30	350.000
Nice (1)	300	20	1.000.000

(1) Extension de pistes cotières.

0

Le Professeur J.F. Hoffman de l'Académie Navale d'Annapolis a donné les coûts comparés de deux îles artificielles de 2 hectares, 5 et de 5 hectares émergents de 4 mètres 50 au dessus du niveau de la mer dont la profondeur varie de 5 à 15 mètres.

Le remblaiement a été réalisé avec des matériaux hydrauliques, dragués sur place, à un coût unitaire de 3 francs environ le mètre cube.

La comparaison porte en outre sur 2 types différents d'île par la différence de leur protection:

- Type A. Île en remblai libre, dont les pentes du remblaiement ( $p=0,25$ ) ont été revêtues sur toute leur surface d'un revêtement en pierres et blocs de densité 2,65 d'une épaisseur moyenne de 1,50 mètres et dont la porosité est de 30 %.
- Type B. Île en remblai réalisée dans une enceinte en palplanches métalliques, enfoncées de 3 m. dans le fond marin et émergeant de la même hauteur que l'île, soit 4 m,50.

Le cout de l'île de type A se situe entre 7 millions de frs. sur un fond de 6 mètres et 12 millions sur un fond de 12 mètres pour une île de 2 hectares,5

et entre:

10 millions sur un fond de 6 mètres et 18 millions sur un fond de 12 mètres pour une île de 5 hectares.

Le cout de l'île de type B se situe entre:

14 millions sur un fond de 6 m. et 17 millions sur un fond de 12 mètres pour une île de 2,5 hectares

et entre:

21 millions sur un fond de 6 m. et 26 millions sur un fond de 12 mètres pour une île de 5 hectares.

Le tableau suivant résume ces prix:

TABLEAU 16.

Surf.	Fond	6 m.	10 m.	12 m
2has,5	A	7 millions	10 m.	12 m.
	B	14 m.	16 m.	17 m.
5 has.	A	10 m.	14 m.	18 m.
	B	21 m.	24 m.	26 m.

On voit que le cout des îles du type B croit proportionnellement moins vite que celui du type A, dont le prix est cependant moins élevé.

La raison en est, comme on l'a déjà montré que dans le type B à palplanches le volume des matériaux perdus est nul alors qu'il croit rapidement avec la profondeur dans le remblaiement libre.

L'emploi des palplanches est signalé comme intéressant dans les sites marins où dominent de forts courants.

Les palplanches sont cependant attaquées par la corrosion marine et l'abrasion des particules sablonneuses en suspension dans les forts courants marins, pour les métalliques.

Leur fiabilité est inférieure à celles construites en béton.

0

665. Devis estimatif.

Le devis estimatif de construction d'une île artificielle ne peut être établi qu'avec une fourchette des plus larges

Il peut cependant être schématisé par le tableau suivant:

TABLEAU 17

Devis estimatif de construction  
d'une île remblai.

Opérations	Qtités	P.U.	Total.
Avant-projet : Etudes et recherches sommaires.			
Etudes du site. Installation du chantier. Préparation du fond. Travaux accessoires. Digues d'encloture: Matériaux A - B			
Remblaiement: Matériaux A Matériaux B Matériaux C Compactage Protection de l'île. Drainage. Honoraires engineering.			
Total.			

Un exemple sommaire peut être donné par l'estimation du coût d'une île artificielle pour l'installation d'une centrale nucléaire par un bureau d'études Américain: île de 4hectares par 18 mètres de fond.

Honoraires Engineering  
et études diverses .....2.570.000 francs

Digue de protection/:

-135.000 tons.de blocs  
de 10 tonnes à 35 F./ton.

-275.000 tons. de blocs  
de 1 à 10 t. à 25 F./T.

- 265.000 de caillasse  
à 21 f. la tonne.

soit .....17.200.000 francs

Remblaiement:

1.000.000. de m<sup>3</sup> de remblai  
à 8 francs 50 le mètre cube 8.500.000 francs

---

Total.....28.270.000 francs

Taxes..... 848.100 francs

---

Total des investissements  
à prévoir.....29.118.100 francs

ce qui situe l'île aux environs de 750.000 francs l'hectare.

0

#### 67. Conclusions sommaires sur les îles en remblai.

L'avantage certain de la réalisation d'une île artificielle en remblai est que cette dernière procède de techniques connues et de réalisations similaires nombreuses dans le domaine côtier, tout au moins par de faibles fonds.

Pour des fonds importants, ces techniques sont plus aléatoires mais les recherches sont poussées pour réaliser des remblais par des fonds de plus de cent mètres, en particulier pour la construction de digues.

Cependant il est certain que le domaine des îles en remblai se situera par des fonds n'excédant pas une trentaine de mètres, d'autres techniques étant alors moins onéreuses.



Les autres avantages découlant d'ailleurs de cette parfaite connaissance technologique sont:

- le cout unitaire à l'hectare assez faible.
- l'expansion aisée de l'île, si besoin était.
- une sécurité maximale à l'action des éléments marins si la protection a été calculée en conséquence, compte-tenu de la valeur des vents, des vagues, même des raz de marée et des courants ainsi que de la hauteur des marées.

Les désavantages d'une île en remblai, déjà énumérés sont:

- la destruction totale de la vie marine sur toute la surface du remblaiement et sur un rayon très grand aux alentours, surtout pendant la période des travaux.
- les changements qu'elle apporte à l'allure des courants, l'action des vagues et de la marée, pouvant amener la transformation complète du littoral et des fonds marins.
- l'importance qui doit être attachée à l'étude du fond sur lequel s'appuiera le remblai.

Sur mauvais fond ou avec de mauvais déblais, des tassements irrémédiables ou excessifs peuvent apparaître.

- sa sensibilité à l'action des tremblements de terre. Des tassements importants et des mouvements des remblais en résultent pour le plus grand dommage des super-structures.
- l'accroissement rapide du cout unitaire avec la profondeur.

0

Cependant en l'état actuel de la technique, il est certain que pour des fonds de 15 à 30 mètres, l'île en remblai sera le plus souvent adoptée.

Déjà dans le domaine pétrolier de nombreuses petites îles artificielles en remblai ont été construites jusqu'à 5 kilomètres des côtes.

Les quatre îles de Long Beach, parfaitement "designées" sont un exemple parfait d'un aménagement nouveau d'un littoral.

Au Japon des îles en remblai d'environ 200 mètres de diamètre ont été réalisées par des fonds de 45 mètres.

0

La faisabilité des îles artificielles en remblai est donc toute celle de nos jours; elle résulte

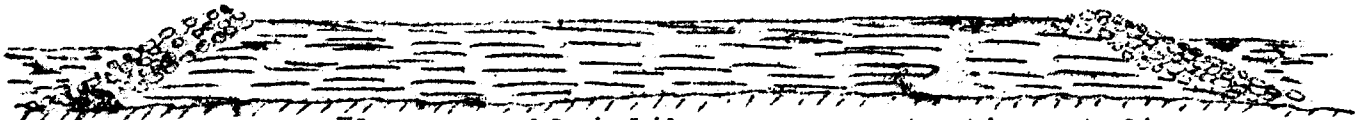
- d'une technique éprouvée
- de méthodes bien établies
- d'équipements conventionnels existants et de grand potentiel de réalisation
- d'une connaissance précise des investissements si les données d'implantation sont connues exactement.

0 0 0 0 0  
0

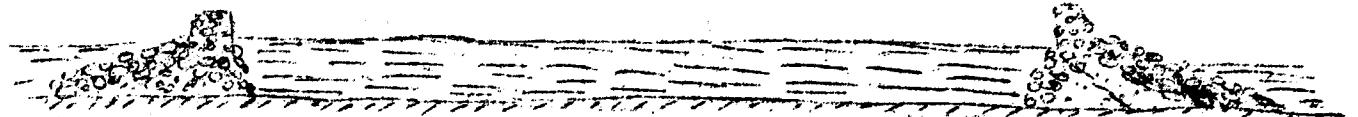
Figure 19.

Profils divers d'île-remblai.

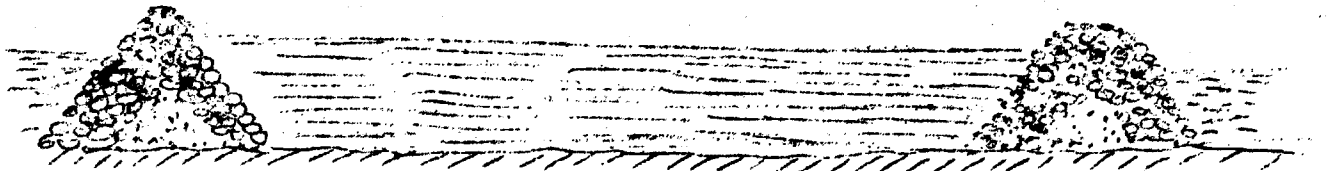
Île en remblaiement libre avec protection.



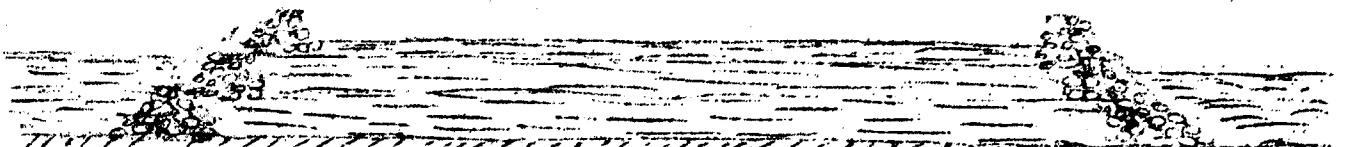
Île en remblai libre avec protection et digue.



Île en remblai endigué avec digue unique.



Île en remblai endigué avec digues superposées.



Île en remblai dans enceinte de palplanches.

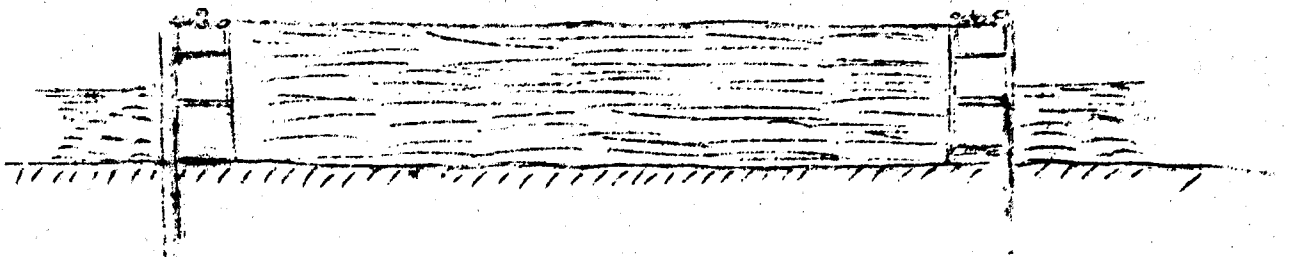
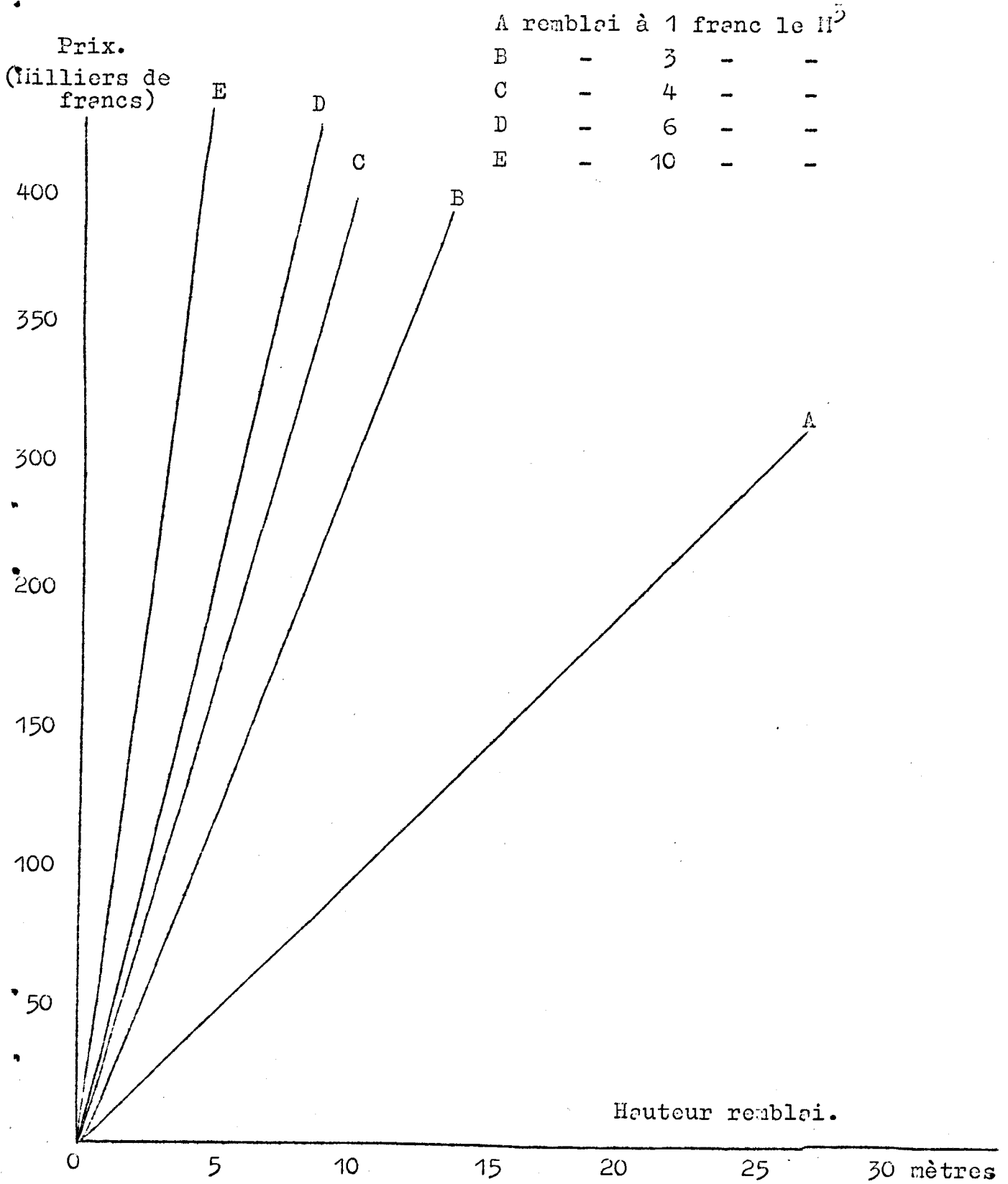


Figure 20



Courbes donnant le cout du remblaiement  
per hectare en milliers de francs  
en fonction de la profondeur et  
du prix du m<sup>3</sup> de déblai.

FIGURE 21.

Cubage de remblai en fonction de la hauteur de remblaiement et du diamètre de l'île artificielle.

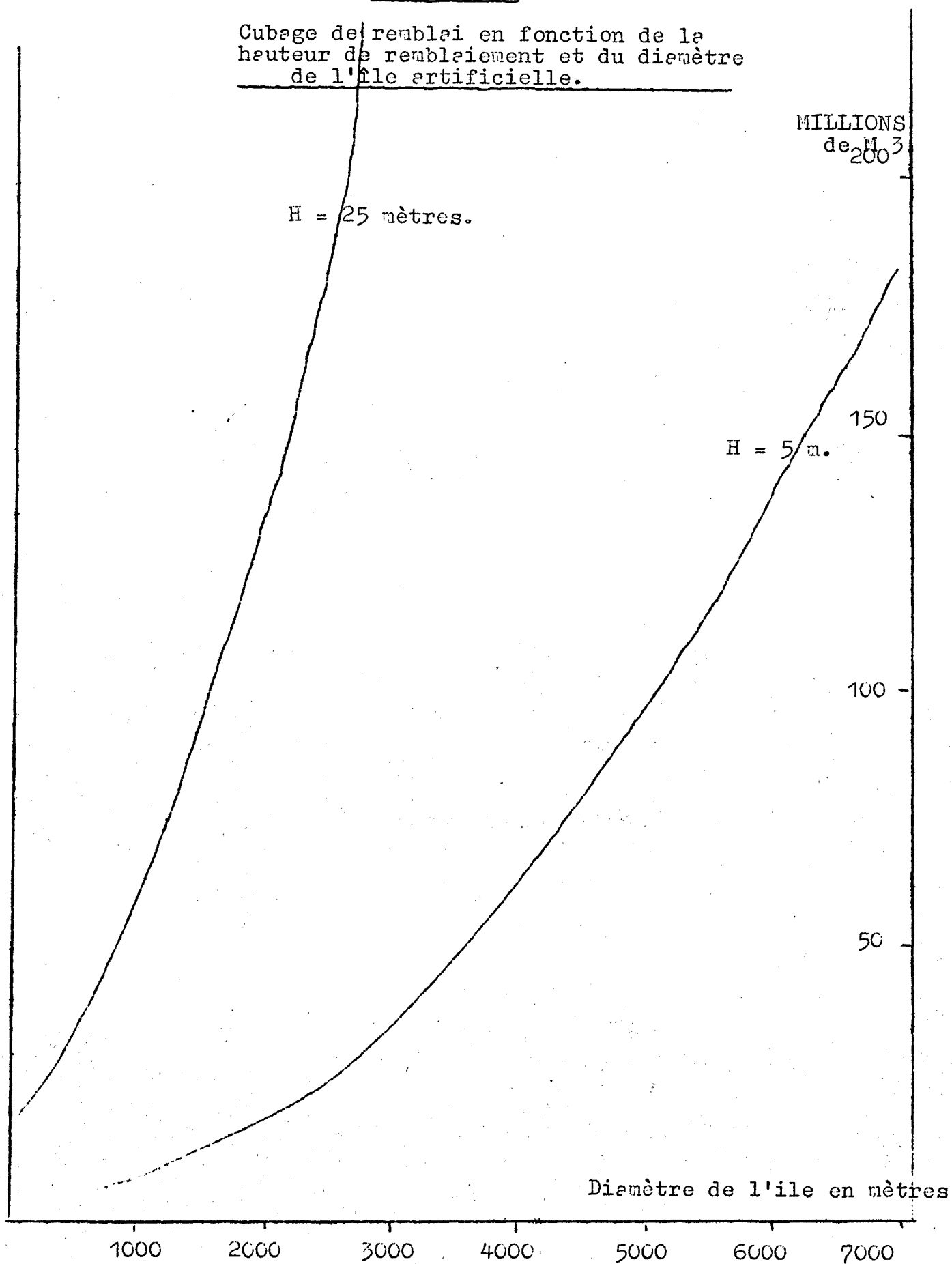
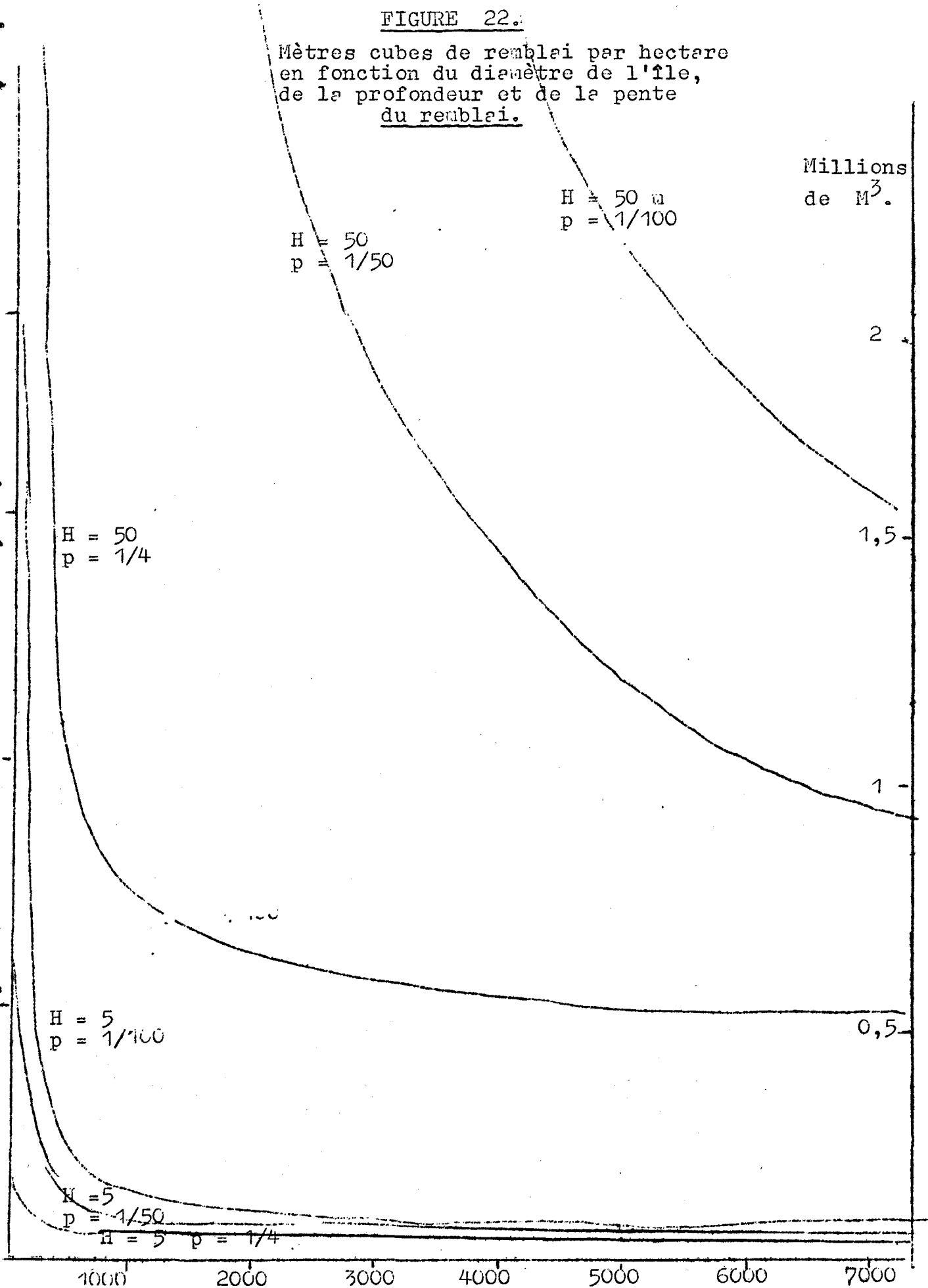


FIGURE 22.

Mètres cubes de remblai par hectare  
en fonction du diamètre de l'île,  
de la profondeur et de la pente  
du remblai.



## VII. LES ILES - POLDERS

Au sens le plus strict du mot et de son origine Néerflandaise, le polder est une surface de terre gagnée sur la mer par la construction d'une digue.

Jusqu'à ce jour les surfaces ainsi gagnées ont été des zones côtières subissant les effets des marées ou des fluctuations diverses du niveau de la mer et leur envahissement temporaire ou permanent par cette dernière.

La technique du polder a atteint son plus haut sommet de développement en Hollande où depuis des siècles des centaines d'hectares sont gagnés sur la mer par édification de digues côtières, drainage et pompage et aussi par remblaiement.

La conception de l'application de la technique du polder à la construction d'une île artificielle est assez récente et ne date que de la dernière décennie.

Elle est née des études menées en vue de la réalisation d'aérodromes en mer; ces derniers pour des impératifs divers doivent être le plus souvent édifiés dans un avenir proche à quelques kilomètres des côtes.

Aucun empêchement technique ne s'élève à la construction d'une digue en mer, close sur elle même et ne prenant donc nullement appui sur le littoral.

Une telle construction a été évoquée dans la réalisation de la digue d'encloture d'une île remblai, mais les deux conceptions, île-remblai et île-polder, diffèrent ensuite par le processus des opérations suivantes:

- remblayage du volume délimité par la digue dans le cas de l'île-remblai.
- évacuation totale du volume liquide dans le cas de l'île polder.

Par ailleurs bien que similaire dans les deux cas, la construction de la digue revêt des aspects fort différents:

- dans l'île-remblai, la pression exercée sur la digue par l'eau de mer est largement contrebalancée par celle du remblai, alors que dans l'île-polder cette pression s'exerce intégralement sur la digue.

- dans l'île-remblai, la digue d'encloture ne joue que le rôle de mur de soutènement et peut être d'une perméabilité relative et même nécessaire.

- dans la conception ile-polder, la digue joue le rôle d'un véritable barrage à toute éventuelle pénétration d'eau de mer.

Aussi la théorie des barrages s'applique-t-elle d'une manière totale à la construction de la digue du périmètre d'une ile-polder; des conditions draconiennes doivent être imposées dans les études portant sur:

- le fond marin
- la construction de la digue.

#### 71. Etude du fond marin.

Les considérations générales déjà données précédemment pour les îles-remblais sont toujours applicables, mais elles revêtent une importance bien plus considérable.

Le fond marin doit offrir:

- un support d'une solidité absolue pour résister aux charges appliquées par la masse de la digue sur le fond.

- une imperméabilité complète afin d'éviter toute infiltration éventuelle de l'eau de la mer par les couches sur lesquelles reposera la digue.

Il faut éviter les tassements importants et durables, les glissements de couches, les affouillements du sol, conséquences des charges extraordinaires dues au poids de la digue et de l'assèchement du fond.

Ces impératifs interdisent absolument la construction de telles digues sur des couches épaisses de vase, de limons, voire de sable et très souvent il faudra aller jusqu'au bedrock pour asseoir solidement la digue.

Aussi une étude détaillée du fond marin doit-elle être menée immédiatement sur toute l'étendue de l'assise de la digue; il faudra en particulier vérifier si des couches d'apparence solide n'ont pas de sous-couches présentant des points faibles (veines vaseuses ou poreuses, etc..)

Les taux de stabilité et de tassement doivent être connus préalablement au démarrage de l'étude.

Une éventualité, certes assez rare, est celle de résurgence de nappes phréatiques, puits artésiens, à l'intérieur du polder; les observations et les études du fond et des eaux devront être également menées dans cette hypothèse.

## 72. Construction de la digue.

Les fondations de la digue exigeront très souvent une préparation du sol minutieuse et un ancrage solide des fondations; le choix des matériaux constituant le noyau de la digue devra être plus sévère que dans le cas d'une digue ordinaire.

Ce noyau doit en effet être d'une imperméabilité absolue et solidement assis sur le fond.

L'utilisation de matériaux artificiels, (nappes plastiques en particulier) est de plus en plus courante pour obtenir une imperméabilité parfaite.

La digue devant résister à toute action ordinaire ou extraordinaire des éléments, il importe que les calculs techniques soient menés sur la base d'informations les plus précises et de valeur maximale; la valeur de la vague centenaire doit seule être utilisée, majorée même de coefficients de sécurité élevés.

En effet la protection du noyau par les méthodes traditionnelles (pierrés-rochers-couches de revêtements, etc; ; ) doivent conférer à la digue une fiabilité totale.

La mise en place de cette protection exige très souvent des méthodes techniques particulières et appropriées afin d'éviter tout affaiblissement local de la digue par l'action des vagues, courants ou marées sur le noyau.

La fermeture complète de la digue posera également des problèmes délicats dans les mers à forte marée et devra faire, comme pour les îles-remblais l'objet de précautions spéciales et de plannings précis.

Aussi par faible profondeur certains techniciens suggèrent de construire une telle digue à sec dans des zones protégées par des murs de palplanches, des coffres immergés ou tout autre procédé, après pompage de l'eau de mer.

Les considérations générales décrites précédemment pour la construction de la digue s'appliquent d'une manière absolue dans le cas du polder:

- aucun déferlement important ne devra être possible par dessus la digue.

- la protection de la face extérieure de la digue sera considérablement renforcée.

- la face intérieure pourra être plus faiblement protégée, mais suffisamment protégée d'une éventuelle érosion par le déferlement exceptionnel des vagues ou des précipitations atmosphériques.



### 73. Aménagement intérieur du polder.

Le fond marin asséché peut être utilisé dans son état naturel s'il est suffisamment horizontal et consistant.

Des aménagements seront cependant très souvent nécessaires en fonction de la destination future du polder, (nivelllement, dérochage, remblaiement de surface, etc..)

le drainage du sol devra être réalisé d'une manière parfaite, car il conditionnera la sécurité de la réalisation, le polder étant un réceptacle naturel pour toutes les précipitations atmosphériques.

Ce drainage relève des techniques connues terrestres; il doit permettre la concentration rapide des eaux de pluie et des infiltrations d'eau de mer occasionnelles et leur évacuation complète.

Cette évacuation sera faite par pompage, les stations de pompage étant une caractéristique absolue des polders.

### 74. Engineering.

Tout ce qui a été dit pour l'engineering et la logistique de la construction d'une ile-remblai est applicable à celle d'une ile-polder, il suffira de s'y rapporter.

### 75. Ecologie

Les conséquences écologiques de la réalisation en mer d'une ile artificielle " polder " sont absolument analogues à celles décrites pour une ile-remblai.

La vie marine est tuée dans des conditions identiques et il en est des conséquences identiques pour l'environnement cotier.

L'action des dragages est cependant moins néfaste et cela peut être un facteur important dans le choix du procédé.

Une ile-poldre peut cependant avoir plus d'influence sur la formation de brouillard qu'une ile-remblai du fait de sa forme en cuvette.

On a même observé la formation de couches d'air très froides dans le fond des polders jusqu'à hauteur du sommet de la digue, très nuisibles dans le cas de l'implantation d'un aérodrôme.

## 76. Coûts de réalisation.

Sommairement le coût de réalisation d'une île-polder est la somme des trois éléments suivants:

- coût de construction de la digue.
- coût du pompage et de l'aménagement du sl.
- frais d'engineering et des études préalables.

De ces trois éléments, celui du coût de construction de la digue est de beaucoup le plus important, environ 70 %

Le coût d'une digue dans une localisation marine donnée est fonction du gabarit de la digue, déterminée par le projet d'exécution et imposé par la valeur des éléments agissants et la profondeur d'eau.

On a vu qu'à section homothétique le coût d'une digue augmente sensiblement comme le carré de sa hauteur.

Le volume du noyau et du revêtement dépendent des valeurs choisies, en particulier de la vague centenaire et du coût des matériaux de construction mis en place et principalement d'origine terrestre.

Aucun coût standard ne peut être donné, mais la tendance moyenne du coût de la digue polder, suivant des documents américains, est approximativement celle donnée par le tableau 19.

0

L'intérêt d'un polder réside dans le fait que son coût unitaire à l'hectare décroît très rapidement avec la surface de l'île à réaliser.

Le volume total de la digue-polder croît en effet comme le diamètre de l'île, car il est proportionnel à sa longueur donc au diamètre dans le cas d'une île circulaire.

Comme la surface de l'île croît comme le carré de ce diamètre, le volume unitaire de la digue, donc le coût unitaire est inversement proportionnel au diamètre de l'île, donc à la racine carrée de la surface.

Le prix des matériaux peut varier du simple au décuple; on voit donc que la fourchette des coûts est des plus larges et on ne peut raisonner que sur des cas précis.

Un cas précis peut justement être donné par une étude faite par la société d'engineering Américaine HARZA sur la réalisation d'un aérodrome-polder dans le lac Michigan à une dizaine de kilomètres au large de Chicago.

Sur la localisation choisie la profondeur du lac varie de 10 à 15 mètres.

Le projet prévoit une digue constituée comme suit:

- un noyau imperméable en argile et sable, clapeté sur place.
- une couche intermédiaire de cailloutis et de roches d'une épaisseur de 4 mètres.
- un revêtement de protection classique en blocs et roches diverses d'un poids variant de 10 à 20 tonnes, calculé pour une hauteur de vague théorique de 7 mètres.

La digue serait réalisée dans sa totalité par clapetage des matériaux dans leur totalité, de manière à avoir des glacis à faible pente, ce qui est d'ailleurs imposé par la faible portance de la couche d'argile constituant le fond du lac.

Sur le noyau de sable argileux sont clapetés les sables grevilloneux et le cailloutis et enfin le revêtement de gros blocs.

Un drainage général est prévu avec un collecteur circulaire au pied de la digue et une évacuation permanente par pompage.

Une ile-polder de 6.400 mètres de diamètre représente une surface d'environ 3.200 hectares, soit une surface utile de 3.000 hectares environ, déduction faite du canal circulaire de drainage et de la digue.

Le devis estimatif est sommairement le suivant:

- Digue.....	892.950.000	francs.
Drainage.....	27.300.000	-
Divers.....	138.037.500	-
Engineering...	105.000.000	-
	<hr/>	
Total.....	1.163.287.500	francs.

soit un cout approximatif à l'hecatre de 353.000 francs.

Le projet donne quelques renseignements intéressants sur :

- la variation du cout en fonction de la surface de l'île, résumée par le tableau suivant :

Diamètre. en mètre.	6.400 m.	6.800	7.200	7.850	9.050
Surface has.	3.200	3.600	4.000	4.800	6.450.
Cout/Har. Millions Frs	1.163	1.235	1.210	1.400	1.685
Cout/hect. Milliers Frs	353	343	328	304	261.

La variation du cout de l'hectare en fonction de la surface de l'île apparait très nettement.

- la variation du cout en fonction de la distance à la côte.

Cette influence joue tant dans le domaine logistique . en cours de construction que dans celui des couts des voies d'accès reliant l'île à la côte.

L'influence dans le seul domaine logistique est résumé comme suit, pour l'île du projet initial, soit une île de 3.200 hectares :

Distance de l'île au rivage	9.000 m	10.500	12.000	13.500
Cout en Millions de francs	1.163	1.233	1.258	1.338
Cout/Hectare en Milliers de francs	353	385	394	418

Par ailleurs les couts à l'hectare en fonction de la hauteur de la digue ont été les suivants :

- digue de	5 m.	25.000 frs.	l'hectare
-	10 m.	95.000	-
-	20 m.	375.000	-

## 77. Sécurité et entretien.

Toute atteinte, même légère de la digue-polder peut mettre en danger, à terme plus ou moins long, la totalité de l'île, si la conséquence en est une faille et la rupture.

La menace de la submersion complète de la zone asséchée pèse en permanence sur l'île, comme celle de la rupture d'un barrage sur la zone située en aval..

Aussi l'entretien est-il un souci permanent et impose la mise en place de moyens permanents d'inspection et d'action préventive.

Cet impératif apparaît nettement dans l'histoire des polders hollandais, où un souci constant est apporté d'année en année à l'amélioration de la sécurité des zones poldérisées.

Il est certain que malgré tout cette menace demeurera?

Peut-on doubler les digues, comme cela se pratique en Hollande, où règne encore la hantise de la grande catastrophe de 1953.

Cela ne peut être possible que pour des îles de très grande surface et sur des localisations de faible profondeur.

Aussi conseille-t-on d'y pallier par le remblaiement de l'intérieur du polder jusqu'à un niveau légèrement supérieur au niveau normal de la mer.

Cette sage solution n'est alors qu'un des procédés vus précédemment pour la construction d'une île-remblai, avec remblaiement à sec et non en milieu humide; la digue n'a alors pour rôle principal que d'assurer une protection contre l'action des vagues et de fortes marées.

L'évolution des techniques pourra apporter des solutions offrant une sécurité absolue.

C'est ainsi qu'un projet Australien envisage l'utilisation de charges nucléaires, dont l'effet, équivalent à celui de l'explosion de 1 million de tonnes de trinitro-toluène, créerait un entonnoir d'un diamètre de 1.000 mètres environ, d'une surface de 75 hectares, une profondeur de 60 mètres et un bourrelet de terre circulaire de 60 mètres de largeur.

ce massif bourrelet, stabilisé par des plantations diverses serait un obstacle d'une sécurité totale.

Un autre procédé suggère de construire la digue-polder par le procédé, qui se développe de plus en plus des caissons immergés et dont l'assemblage sur une grande échelle serait une garantie première de sécurité.

C'est ainsi que le projet Américain du Professeur Odd Albert envisage la construction d'un polder rectangulaire de 6 kilomètres de long et de 600 mètres de large pour la construction d'un aérodrôme.

La digue serait réalisée sur des fonds de 18 mètres par l'immersion de caissons fabriqués à terre, remorqués et immergés en mer puis solidement scellés au fond.

La section transversale de la digue est un trapèze dont la grande base sur le fond serait de 150 mètres et la petite base serait de 30 mètres; la hauteur du trapèze est de 36 mètres.

L'intérieur de la digue serait aménagé pour le logement de plusieurs milliers d'êtres humains avec de nombreux locaux à usage commercial et industriel; en un mot ce serait une ville nouvelle aux conceptions audacieuses.

La sécurité du polder serait assurée par le volume de la digue à la largeur impressionnante et par les multiples dispositifs de sécurité que l'on pourrait techniquement penser et installer dans la multitude des galeries et alvéoles internes.

O

#### 78. Conclusions sommaires sur les îles-polder.

Les avantages des îles-polder sont:

- la connaissance solide des techniques de construction des polders terrestres et en général des digues marines.

- le fait que dans certaines conditions de faible profondeur et de très grande superficie, le polder peut être la solution la moins onéreuse.

Les inconvénients en sont:

- le doute constant qui pèse sur la fiabilité de la construction, du à la menace permanente de la mer et d'une rupture catastrophique de la digue.

- la destruction totale de la vie marine sur toute la surface de l'île-polder et sur une grande zone périphérique, surtout pendant la période des travaux, au même titre que les îles-remblais.

- l'importance primordiale que joue la valeur des fonds marins, dont la qualité doit être parfaite, ce

qui est très difficile à assurer pour de très grandes superficies du sol marin, à moins de travaux d'aménagement très importants et très coûteux, n'apportant cependant pas l'assurance absolue de la suppression d'éventuels points faibles ou de résurgences liquides lors de l'assèchement.

- la difficulté ou l'impossibilité absolue de procéder à des travaux d'extension éventuels.

- la sensibilité de la digue à des secousses sismiques de très grande force, pouvant l'ébranler et occasionner des failles et une catastrophe totale.

0

FIGURE 26.

Coupe schématique d'une ile-polder en digue-talus.

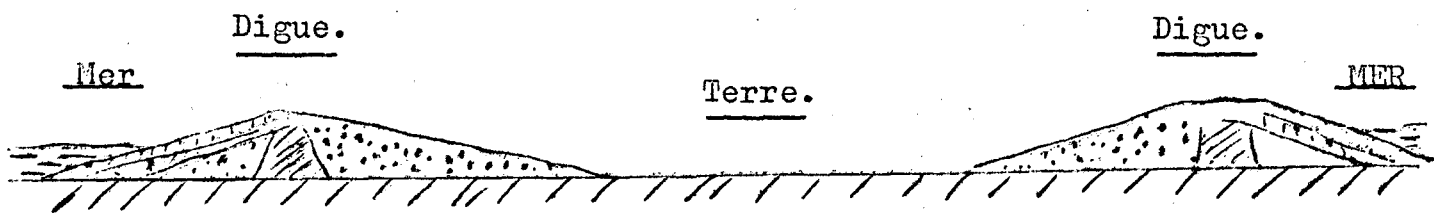


PLANCHE 27

Millions  
de francs.

Courbe donnant le cout kilométrique  
d'une digue-polder en millions  
de francs en fonction du fond.

( Source U.S.A. )

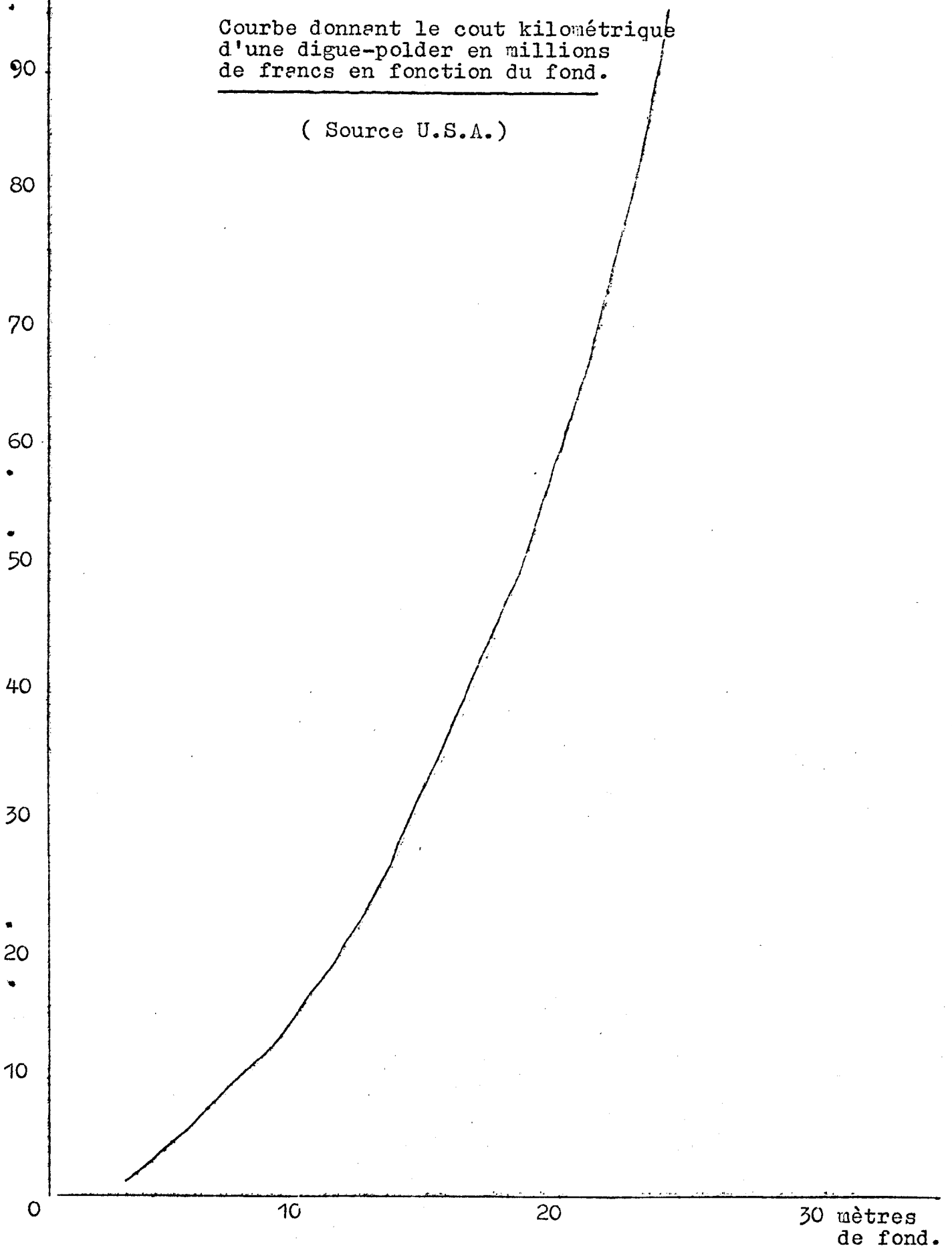




PLANCHE 28.

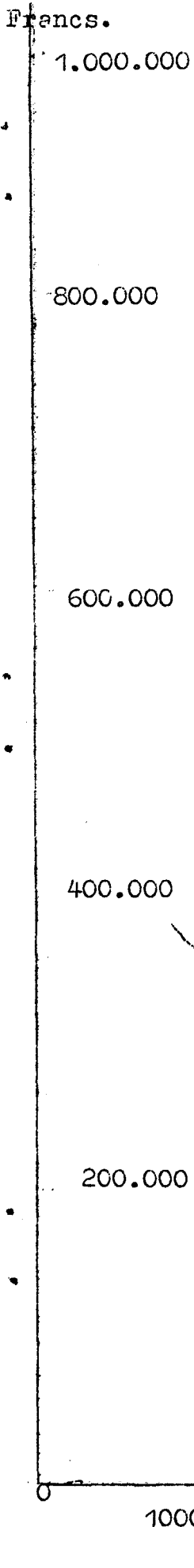
Courbes donnant le cout/hectare  
d'une ile-polder en fonction  
de son diamètre et de la  
hauteur de la digue. (en milliers  
de francs.)

( Source U.S.A. )

de

Hauteur digue  
20 mètres.

Hauteur digue  
10 mètres.



Diamètre en mètres.

### VIII. Iles-Plateforme sur piliers.

Les villages lacustres de la préhistoire, batis sur pilotis sont la représentation historique de ce type d'île artificielle, dont les plateformes modernes de forage off-shore sont la réplique du XX ème siècle.

L'utilisation de piles ou piliers pour supporter des plateformes diverses (ponts-quais, etc..) au dessus de l'eau est donc une technique ancienne et de plus en plus courante dans l'implantation en particulier de structures importantes off-shore.

Aussi n'est-il pas étonnant que l'on ait songé à l'utiliser aux fins de réalisation de très vastes surfaces en mer, en particulier de vastes aérodromes off-shore, là où les îles-remblai ou polder ne répondent pas aux critères imposés de cout ou d'environnement.

Par ailleurs les progrès extraordinaire des techniques et l'utilisation croissante du béton précontraint font que de telles réalisations ne posent aucun problème technique majeur, si ce n'est un problème logistique.

Le processus technique est en effet fort simple: il réside dans l'édification d'une plate-forme à un ou plusieurs niveaux sur des piles, piliers ou caissons s'appuyant sur le fond de la mer, problème déjà résolu pour la construction des ponts.

D'une manière générale la partie inférieure de la plate-forme est située à une hauteur suffisante au dessus de l'eau pour ne pas subir le choc direct des plus puissantes vagues sur les parois verticales de la super-structure.

Les piliers seuls supportent l'action des éléments marins, dont les forces cumulées avec les charges verticales s'exercent en-tête des piliers donnent sur le fond marin, zone d'appui, des pressions considérables doublés de moments importants.

#### 81. Le fond marin.

Aussi la connaissance du fond marin dans cette technique revêt-elle une importance considérable, aussi grande que la connaissance du sol dans les constructions terrestres lourdes.

La recherche du bon sol - généralement le bedrock ou une couche de sable très dense - est une nécessité absolue afin que les piliers reposent sur des assises solides, dont la résistance à la compressibilité doit être connue avec précision afin de pouvoir déterminer les caractéristiques techniques de la structure, celle des piliers en particulier.

Le problème est identique à celui posé par la construction d'un immeuble terrestre sur pieux.

Aussi l'étude du fond marin doit-elle être menée comme celle d'un sol terrestre:

- étude géotechnique générale permettant d'avoir une connaissance complète des couches du fond (formation, qualité, épaisseur, etc.), en particulier celle du bon sol.

- connaissance précise du sol à chaque emplacement des piliers.

En fonction des informations recueillies, on déterminera les sections des piliers, leur degré d'enfoncement dans les couches, comme dans les constructions terrestres.

L'étude du fond marin revêt donc une importance considérable d'autant plus importante que le coût de la construction croît rapidement avec la hauteur des piliers; les localisations optimales seront donc celles où les couches de portance nulle ou faible (vases-limons-sables fins) auront les épaisseurs les plus faibles.

La connaissance du fond marin conditionne la faisabilité technique et financière d'un tel type d'île artificielle.

## 82. Construction de l'île plateforme sur pilier.

La technologie de la construction dérive directement de celle des ponts:

- calcul et détermination des caractéristiques des piliers (section-longueur-nombre) en fonction des charges appliquées et des caractéristiques du sol.

- détermination des éléments de la superstructure reposant sur les piliers (poutres - poutrelles - revêtement etc..)

### 821. Piliers.

Les piliers supportant la superstructure sont soumis en mer à deux actions principales qui sont:

- un effort axial, celui de la charge verticale, due au poids des éléments de la plateforme et celui propre au pilier, compensation faite de la poussée d'Archimède.

- des efforts latéraux dus à l'action des éléments (vagues, tempêtes, tremblements de terre, etc..)

pouvant engendrer des moments de flexion et de torsion importants.

Ces efforts latéraux peuvent être en effet très puissants, bien supérieurs aux efforts axiaux; ceci différencie nettement le calcul des piliers marins des terrestres.

Leur caractère cyclique, du à celui des vagues, est d'ailleurs un élément nouveau, dont il doit être tenu compte dans les calculs d'un système où le facteur de résonance peut jouer fortement.

Les charges verticales sont très souvent très élevées, de l'ordre de plusieurs centaines de tonnes; elles conditionnent la section des piliers et leur nombre, qui peut être de plusieurs centaines par hectare, comme à l'aérodrome de La Guardia.

Le tableau 29 donne graphiquement les charges supportables par des piliers circulaires en béton en fonction de leur diamètre.

L'action des vagues engendre des forces latérales, dues aux chocs périodiques de la masse liquide sur les piliers, aux mouvements tourbillonnaires qui en découlent, surtout quand le nombre de piliers est important et parfois à des phénomènes d'inertie.

On sait calculer la force exercée par la poussée des vagues sur un pilier cylindrique vertical (Méthode Bonnefille).

Les tableaux 30 et 31 donnent la pression moyenne sur un obstacle cylindrique et sa hauteur d'application au dessus du fond, permettant d'obtenir aisément la valeur du moment de renversement.

Les forces dues aux tourbillons sont généralement faibles; elles ne prennent de l'importance que si des phénomènes de résonance se produisent, dus aux périodicités voisines des mouvements tourbillonnaires et de l'oscillation imperceptible mais réelle de la structure entière.

Un tel phénomène peut être rare, mais, comme pour les ponts suspendus, il peut apparaître si la structure est très en hauteur.

Les forces d'inertie dues à l'action des vagues sont des plus délicates et des plus complexes à déterminer, car encore mal connues.

Elles résultent du mouvement de la masse liquide autour des piliers et de son accélération; elles sont sensiblement proportionnelles au produit du volume d'eau déplacé par son accélération.

Compte-tenu des renseignements intéressant le sous-sol marin et les charges exercées sur les piliers, un processus de calculs mis au point permet de déterminer:

- la hauteur d'enfoncement dans les couches marines du fond. Le coefficient de frottement des piliers sur les couches traversées peut d'ailleurs être accru par des procédés techniques divers ( injection de béton, nervures en bout de pilier, etc..)

- la section du pilier, dont l'importance doit être compatible avec:

- la portance du sol; la charge unitaire doit être inférieure à la charge maximale du sol.

- les efforts combinés des forces axiales et latérales.

- la hauteur totale du pilier, où apparaissent l'influence des facteurs de flambage et de forces de tension.

La hauteur effective des piliers influence en effet le calcul de leur section; Comme dans les constructions terrestre le facteur flambage fait classer les piliers en deux catégories " longue " et " courte ".

Un important coefficient de réduction de charge doit être appliqué aux piliers de la catégorie " longue " par rapport à celles supportables par la " courte ".

Le degré d'encastrement du pilier à ses deux extrémités, sa longueur réelle et sa section sont autant de facteurs qui interviennent dans le processus de son calcul.

Aucune règle fixe n'est encore applicable au calcul des dimensions d'un pilier; on procède par approximations successives, méthode facilitée par l'emploi des ordinateurs.

On peut envisager des procédés de renforcement d'un pilier ( frettage- renforcement latéral, etc..) soit pour réduire sa section soit pour s'opposer au flambage qui apparaît pour des piliers:

- rectangulaires quand leur longueur est supérieure à 18 fois le petit côté de la section.
- circulaire, quand cette longueur est supérieure à 15 fois le diamètre.

La construction de plusieurs centaines de plateformes de forage fixes, qui ont été construites en particulier dans le golfe du Mexique, parfois par des fonds supérieurs à 100 mètres et avec des charges verticales par pilier de l'ordre de 3.000 tonnes permet d'affirmer que les plus grands progrès ont été réalisés dans le calcul des piliers.

### 8211. Fixation du pilier sur le fond.

On ne peut concevoir un pilier simplement posé sur le fond, même s'il est de portance suffisante; à la rigueur pourrait-on concevoir une semelle porteuse dont la réalisation et surtout la mise en place à grande profondeur serait délicate.

Le pilier est enfoncé dans les couches marines par des procédés mécaniques ( battage, forage, affoulement, etc..).

La puissance à mettre en oeuvre dans le fichage et le battage des piliers croît avec la dimension du pilier.

L'expérience prouve qu'il faut:

- un marteau de 10 tonnes pour D = 155 cms.
- " " 15 " " D = 180 cms.
- " " 25 " " D = 250 cms.

Dans des fonds durs, le forage sera parfois nécessaire, bien que l'emploi de marteaux lourds à grande cadence de frappe - 50 coups minutes - puisse l'éviter.

Dans le domaine du forage, des progrès techniques extraordinaires ont été réalisés; des macro-foreuses permettent de forer des trous de 3 à 4 mètres de diamètres ( Lac de Maracaïbo - Cotes de Californie etc..)

Les appareils de forage sont installés sur des plateformes auto-élevatrices, disposant d'appareils de levage très puissants, imposés par le tonnage élevé des têtes de forage gigantesques.

Dans ce type de forage, l'évacuation des déblais se fait par l'intérieur de la colonne de forage à l'inverse du forage pétrolier.

Le pilier est ensuite introduit dans le trou de forage réalisé, scelle au besoin par injection ascendante de béton dans l'espace annulaire fond-pilier s'il en a été réalisé un, ou battu à force.

### 8212. Fabrication des piliers.

Bien que l'on puisse concevoir la construction à même le fond marin du pilier, quand la faible profondeur permet de la réaliser à l'intérieur de caisson, comme pour des piles de pont, la méthode la plus générale la construction à terre des piliers, leur amenée à pied d'oeuvre et leur mise en place par battage ou forage.

Un tel processus permettra d'avoir sur une échelle industrielle des piliers ayant:

- un poids relativement faible par utilisation des procédés les plus modernes, précontrainte pour le béton par exemple, permettant une manipulation aisée et leur transport par barge ou par flottaison et remorquage.

- une résistance apte à leur battage.

la possibilité d'un remplissage aisé par coulage de béton armé préalablement, leur assurant la résistance voulue à l'écrasement par les charges supportées.

Divers matériaux et types de piliers peuvent être énumérés:

### I. Piliers tubulaires en acier.

Ce sont de véritables tubes en acier aux parois d'épaisseur suffisante pour leur assurer la résistance au flambage et aux chocs dus au battage, à la houle et aux opérations de manutention.

Les tubes courants du type " Pétrolier " de 90 à 120 centimètres, primitivement utilisés ne présentaient pas de module d'inertie et de section suffisante pour les emplois prévus actuellement.

Aussi s'orienté-t-on de plus en plus vers l'emploi de tubes de 150 à 300, voire 400 centimètres réalisés en chaudronnerie.

une fois fichés au fond ces tubes sont remplis de béton armé ou non; le ferrailage peut être mis en place durant la construction des tubes à terre.

### II. Piliers en béton précontraint.

Les piliers en béton précontraint sont de plus en plus utilisés dans la construction de structures marines à cause des qualités intrinsèques du béton, leur assurant:

- une longue vie dans l'eau de mer par suite de leur résistance à la corrosion marine.
- une bonne tenue à l'écrasement à la flexion, à la tension, d'ailleurs calculable.
- une bonne réaction à l'encastrement au fond.
- un coût bas, surtout avec des productions en grande série.
- une manutention et un transport aisé pour des spécialistes, sans grands risques de bris ou de fissuration.

Leur tenue au battage est très bonne et ils peuvent pénétrer les couches dures.

La technique de construction la plus courante est:

- construction à terre de la paroi extérieure du pilier, dont l'épaisseur la plus grande possible, doit cependant permettre la flottaison du cylindre rendu hermétique par l'obturation de ses deux extrémités.

- mise à l'eau, flottaison et constitution de radeaux prêts au remorquage.

- remorquage.
- immersion verticale sur le lieu de fichage; c'est avec le remorquage, l'opération la plus délicate
- battage ou fichage.

Certes pour des piliers de grand diamètre 5 mètres ou plus, on pourrait concevoir la pose directe sur le fond solide, mais la technique la plus courante sera celle du battage dans les couches molles ou du fichage dans des trous pré-forés.

- remplissage des piliers creux par coulage de béton.

Les piliers de faible diamètre sont construits d'une seule pièce et pleins. Leur manutention pour des piliers de grande longueur impose une technique délicate, mise cependant au point.

La technique du béton précontraint a fait d'énormes progrès surtout en vue de son utilisation dans les structures marines.

Les calculs primitivement très empiriques ont considérablement évolués dans un sens mathématique.

Les piliers en béton précontraint les plus longs à ce jour sont ceux des plateformes du lac Maracaibo d'une longueur de 80 mètres et d'un diamètre de 90 centimètres.

Bien que certains techniciens estiment que pour des profondeurs supérieures à 50 mètres, l'emploi de l'acier soit à conseiller par suite en particulier d'un meilleur coefficient de résistance à la flexion, les progrès réalisés par le béton précontraint font que son emploi s'étend constamment.

Son faible prix de revient en est une raison majeure.

Les piliers en béton précontraints actuels de faible diamètre consomment 6 fois moins de fers que le béton ordinaire armé; bien que le prix de ce ferrailage soit le double de celui du béton armé, cela fait un coût inférieur de 2/3.

### III. Caissons préfabriqués.

On peut très bien concevoir des piliers de très grande dimension composés par des caissons de grand diamètre immergés et superposés jusqu'à émergence complète.

Ces caissons peuvent être simplement posés sur le fond et nécessitent alors son nivellement parfait.



A cette technique peut s'ajouter en phase terminale l'utilisation de panneaux coulissants pour porter le pilier à sa hauteur finale.

0

la construction des piliers d'une structure importante impose la mise en oeuvre de travailleurs et plongeurs, ce qui conditionne la profondeur à laquelle on peut prétendre travailler.

Aussi la mise en place des telles structures-plateformes sur pilier par des fonds de plus de 100 mètres apparaît bien problématique.

### 822. Plateforme.

Sur les piliers fichés au fond, sera édiflée la plateforme par lancement de poutres principales, reposant sur les chapiteaux et qui permettront de réaliser l'ossature de poutres et poutrelles qui permettront la pose d'un plancher, métallique ou en béton coulé et post contraint.

Généralement cette plateforme sera à un seul niveau. Ce sera le cas si l'île artificielle à pour destination le support des pistes d'un aéroport ou d'exploitations diverses ne nécessitent pas d'infrastructures importantes.

Mais on peut concevoir des plateformes à plusieurs niveaux. De nombreux projets d'aéroports en mer font état de plateformes à 2 ou 3 niveaux aux affectations précises - pistes-hangars-services administratifs etc..

Cette conception n'est pas utopique; mais la réalisation soulève des complications techniques très grandes, étant donné les charges très fortes que les piliers auront à supporter.

De nombreux projets Américains et Japonais étudient cependant de telles réalisations.

Le calcul des éléments de la plateforme est des plus traditionnels; il tient compte des charges mortes et vives de la plateforme et de l'action des éléments, en particulier du vent.

Les dimensions des poutres sont fonction de leur écartement et de celui des piliers.

Les calculs des éléments sont conduits dans l'optique de l'ensemble de la structure complète, piliers et plateforme, aux interactions multiples, permettant de dégager une solution optimale.

### 83. Exemples de réalisations.

Des centaines d'exemples d'ilots artificiels sur piliers sont donnés par les plateformes fixes de forage en haute-mer. Leur extrapolation ne soulèverait aucune difficulté majeure, si ce n'est celui d'un coût élevé.

Une réalisation de grandes dimensions est connue; de nombreux projets sont également étudiés.

Il semble bon de les résumer succinctement.

#### 831. Extension de la piste de l'aérodrome de La Guardia.

L'allongement, rendu nécessaire par l'apparition des jets, des pistes en remblai de l'aérodrome de New-York de La Guardia, a été réalisé par des plateformes en béton reposant sur des piliers de faible diamètre en tubes d'acier par 12 mètres de fond.

Les piliers sont espacés de 7 mètres 50 sous les pistes et tous les 7,50 x 9,50 sous les autres parties; leur diamètre est d'environ 50 cms.

Ils ont été battus et enfoncés, au travers d'une couche de vase de 20 mètres d'épaisseur, dans une couche de sable très dense jusqu'à résistance de 130 tonnes, charge maximale envisagée pour chaque pilier; le bedrock n'a pas été atteint, se trouvant plusieurs mètres plus bas.

Les piliers furent ensuite remplis de béton et les chapiteaux mis en place.

On installa ensuite:

- les poutres principales en béton pré-contraint préfabriquées reposant sur les chapiteaux et l'ensemble fut soigneusement post-contraint.

- les poutres et poutrelles en double T renversé en béton précontraint forment l'ossature de la plateforme.

- les câbles de post-contrainte de la chaussée.

On coula ensuite le béton sur une épaisseur de 50 centimètres et on le post-contraint.

Les extensions faites en 1967 portèrent sur une cinquantaine d'hectares, pour un coût total de 270 millions de francs soit 5,5 millions de francs 1967, soit 7,4 millions de francs 1972.

Il est à noter que l'extension sur pilier bien plus onéreuse que par remblaiement a été imposée par le fait que les conditions de navigation sur l'East River, sur laquelle se fit l'extension, auraient été plus dangereuses par l'obstacle qu'aurait représenté une piste digue

rétrécissant de plus le lit de la rivière, dont le courant aurait surait eu sa vitesse fortement accrue dans le goulet formé; la pollution se serait également accrue dans la partie aval de la piste.

### 832. Aérodrome de Sandy Hook- New Jersey.

Parmi les nombreux projets de création d'aérodromes nouveaux dans la région New-Yorkaise, celui de Sandy Hook se caractérise par une structure plateforme sur pilier à un seul niveau comportant pistes et bâtiments.

La surface serait de 660 hectares; la profondeur d'eau est d'environ 12 mètres et la plateforme serait surélevée de 6 mètres au dessus du niveau de la mer à marée haute.

Les piliers sont en tube d'acier de 120 cms de diamètre; ils seraient espacés de 8 mètres environ, reposant sur le bedrock après traversée de couches de sable dense.

100.000 piliers seraient nécessaires.

Sur ces piliers seraient jetées poutres et poutrelles traditionnelles en acier, le tout recouvert par un plancher de béton de 30 cms d'épaisseur.

Le devis estimatif fait état d'un coût total de 4 à 5 milliards de francs, soit un coût de 6 à 7,5 millions de francs l'hectare.

### 833. Aérodrome d'Orange County.

Ce projet concerne l'aménagement d'un aéroport sur piliers au large de la côte Ouest des Etats-Unis près de la ville de Los Angeles.

La plateforme serait à 2 niveaux, le pont supérieur étant réservé aux pistes et parkings d'avions, l'étage inférieur aux bureaux et entrepôts.

La profondeur de l'Océan est de 15 mètres environ et la plateforme serait à une quinzaine de mètres au dessus du niveau de la mer.

La surface totale de l'île serait de 130 hectares.

Les piliers seraient doubles et espacés de 7,50 mètres.

Leur nombre serait d'environ 23.000 piliers doubles, chacun supportant environ 150 tonnes?

On estime que la construction de l'île artificielle nécessiterait la mise en chantier de 1.000 à 1.500 ouvriers pendant au moins 3 ans.

Le coût de la structure nue coûterait environ 700 millions à 1 milliard de francs soit 5,5 à 7,5 millions l'hectare.

833. Aérodrome de la Nouvelle-Orléans, U.S.A.

Un projet étudie la réalisation d'un nouvel aéroport pour la ville de New Orleans en Floride sur le lac Ponchartrain.

Sa superficie serait de 300 hectares environ.

Bien que la profondeur du lac ne soit que de 5 mètres la structure sur pilier a été retenue afin de ne pas détruire l'environnement du lac, zone importante d'alevinage et complexe touristique important.

Les piliers sont en béton précontraint; ils ont une longueur de 29 mètres et 1.500 mm de diamètre.

Ils supportent une charge de 150 tonnes et sont enfoncés par battage dans une couche d'argile dure valable à 27 mètres au dessous du niveau du lac, après avoir traversé diverses couches molles.

Les piliers sont par groupe de 4, chaque groupe étant espacé de 15 mètres et leur extrémité supérieure est immergée à 3 mètres de profondeur.

Sur ces piliers serait édifiée une plateforme, véritable cube d'une hauteur de 7 à 8 mètres environ.

Ce cube offrirait trois niveaux, un étage inférieur sous l'eau, un étage supérieur et une terrasse réservée aux pistes et parkings.

La construction d'une telle structure, techniquement possible, posera des problèmes logistiques immenses.

On estime qu'il faudra environ 200.000 piliers, préfabriqués à terre, stockés aux fins d'utilisation.

Un chantier local important en débite actuellement au maximum 16.000 par an en 3 postes.

Le cout total estimé est de 1,75 milliards de francs soit 6 millions l'hectare, ce qui paraît faible.

834. Aérodrome de Los Angeles, U.S.A.

Le projet étudie la construction d'un nouvel aéroport pour Los Angeles dans la baie de Santa Monica à une dizaine de kilomètres au large de la côte, par des fonds de 80 mètres.

Sa superficie serait de 1080 hectares.

L'aéroport serait constitué par une plateforme cubique à 3 niveaux posée sur des piliers émergeant à 15 mètres au dessus de l'eau.

Le niveau supérieur, réservé aux pistes et parkings serait à plus de 30 mètres au dessus de l'eau.

Les piliers seraient des piliers-caissons d'une longueur de 105 mètres et d'un diamètre de 15 mètres.

Ces caissons préfabriqués à terre, seraient remorqués, immergés et remplis de béton; leur poids total serait alors de 38.000 tonnes, les asseyant solidement sur le fond où les couches molles n'ont pas plus de 3 mètres d'épaisseur.

Les piliers seraient espacés de 60 mètres environ de centre à centre, ce qui conduirait à un plancher de pistes d'une épaisseur de 2 mètres de béton, des poutres d'une hauteur de 3 mètres et des poutrelles de 50 cms de haut.

On estime qu'il faudrait 3.000 caissons au minimum pour l'infrastructure, ce qui pose des problèmes logistiques extraordinaires.

La mise en place des piliers et la construction de la superstructure soulèveront des problèmes d'engineering inouis, non insurmontables certes, mais à la planification aléatoire.

On peut penser qu'en l'état actuel des choses, l'industrie mondiale aurait difficilement les moyens de mener une telle oeuvre à bien à moins qu'elle ne s'y prépare activement.

Les moyens à mettre en oeuvre ont en effet été estimés comme suit:

- 12 à 15.000 ouvriers pendant 6 à 8 ans.
- 30 millions de mètres cubes de béton
- 2 à 3.000 tonnes de fers à béton
- un matériel de chantier en mer extraordinaire.

Le cout total a été estimé à 41 milliards de francs, soit 38 millions de francs l'hectare.

#### 84. Engineering.

Les techniques de l'ingénierie à mettre en oeuvre ont été décrites dans le chapitre des îles-remblai ( Par.64)

Elles restent valables pour la plupart des opérations mais comme il l'a déjà été dit la reconnaissance géotechnique prend une importance considérable.

Tout ce qui relève de la recherche d'une localisation optimale, de la prise des données océanologiques reste valable, même la recherche des sites d'emprunt des matériaux marins car le sable du béton peut être d'origine marine, le béton étant fait sur place.

Le planning des opérations doit également être établi avec le maximum de précision bien que très aléatoire, dans un milieu hostile.

L'exécution des travaux procédera de la même rigueur, bien que les processus techniques soient tout à fait différents.

En fait les travaux sont identiques à ceux qui seront entrepris à terre dans un chantier identique, avec un matériel encore bien souvent inexistant en mer.

Ce matériel (grues de chantier sur chalands- centrale de béton- etc) peut être aisément mis au point; il sera cependant soumis à l'action constante des éléments hostiles qui enlèveront beaucoup de précision dans la mise en place des poutres et planchers.

On peut penser que les chantiers, plus difficiles à mener que ceux des îles-remblais ou polders mettront en oeuvre des moyens encore peu traditionnels, en nombre important, des moyens logistiques considérables et une main d'oeuvre dense et hautement qualifiée, qui sera difficile à sélectionner et à former.

#### 85. Considérations écologiques.

Il est certain que les travaux de construction perturberont fortement l'environnement marin et que pendant un temps assez long la vie marine sera totalement détruite.

Cependant après cessation complète des travaux, la vie reprendra rapidement; on a même constaté qu'à l'abri des plateformes de forage fixes, le poisson se multiplie rapidement; un exemple en est donné dans le Golfe du Mexique, où dans une zone dense de plateformes fixes le rendement de la pêche a décuplé, paraît-il.

Par ailleurs les structures sur piliers n'exercent aucune influence néfaste sur la courantomologie; il s'ensuit qu'aucune des conséquences décrites pour les deux premiers types d'îles artificielles n'est à craindre (création de tomolos-attaque des plages, des falaises par des courants détournés etc..)

Si l'île artificielle n'est pas source nouvelle de pollution, on n'a nullement à craindre une aggravation de la pollution dans certaines zones de condensation nouvelle.

Cette considération sera très souvent prise en faveur de l'adoption d'une structure sur pilier, malgré son cout élevé, comme l'exemple en a été donné à l'aérodrome de La Guardia.

#### 86. Couts de construction.

A ce jour l'extension de la piste de l'aérodrome de La Guardia est le seul exemple connu d'une plateforme de grande superficie construite sur pilier dans l'eau.

Le cout en apparaît à priori élevé; ce cout qui était de 5,5 millions l'hectare en 1967 est estimé de nos jours à 7,4 millions.

Ce cout serait certainement doublé en haute mer pour la même profondeur; il croîtrait d'ailleurs très rapidement avec la profondeur.

Le Graphique 32 donne un aperçu de cette croissance avec la profondeur.

Rappelons que les couts approximatifs des projets précités sont :

Sandy Hook- 1 niveau	7,4 millions l'hectare.
Orange Couty 2 niveaux	10 - -
Lac Ponchartrain 3	- 6 millions -
( en fait on peut l'estimer à 15 millions)	
Los Angelès 3 niveaux	27,5 millions l'hect.

Le cout des îles artificielles-plateformes sur piliers est donc nettement plus élevé que celui des îles-remblais ou polders et dans nombre de ces cas ces deux derniers types prévaudront.

Cependant deux cas peuvent imposer leur choix:

1°/ Des impératifs absolus peuvent s'opposer à la réalisation d'îles-remblai ou polder:

- interdiction de modifier l'environnement marin.
- interdiction de draguer ou de remblayer.
- danger d'ensablement de chenaux marins d'accès à des ports, de cotes etc..
- danger d'érosion de la côte, disparition de plages ou éboulement de falaises.

2°/ Pour des îles de très petite dimension inférieure en surface à 1 hectare, le cout du remblainement peut être très élevé et le cout de la plateforme devient concurrentiel.

C'est ce qui explique que des centaines de plateformes fixes de forage sont construites par l'industrie pétrolière.

87. Conclusions sommaires sur les îles artificielles sur piliers.

La construction d'île artificielle sur piliers met en jeu des techniques nouvelles et délicates, dont la technologie cependant s'améliore sans cesse tant par les progrès accomplis dans la réalisation des structures portuaires en eau profonde que dans celles du domaine du forage pétrolier off-shore.

Ces techniques, par suite des progrès accomplis dans le domaine de la manutention en mer de charges lourdes et dans celui du forage de pieux de grands diamètres, peuvent s'appliquer par des fonds de l'ordre de 100 mètres, très difficilement de 150 à 200 mètres.

Les travaux de construction ne perturbent pas à vie l'environnement marin.

De plus les structures sur piliers exigent un fond d'une portance fixée et d'un tassement nul; s'il faut chercher les couches solides ou le bedrock à des profondeurs trop grandes, le coût augmente très rapidement et rend bien improbable toute construction.

L'extension de la surface d'une telle île ne pose pas de problèmes majeurs, puisqu'ils ont été résolus lors de la construction; ces derniers sont même facilités puisqu'ils peuvent être entrepris à partir d'une surface stable déjà existante.

Une telle structure sur piliers peut être très exposée à l'action des secousses sismiques, bien qu'on puisse y parer au prix d'investissements très élevés.

Figure 32.

Vue d'une île artificielle sur piliers.

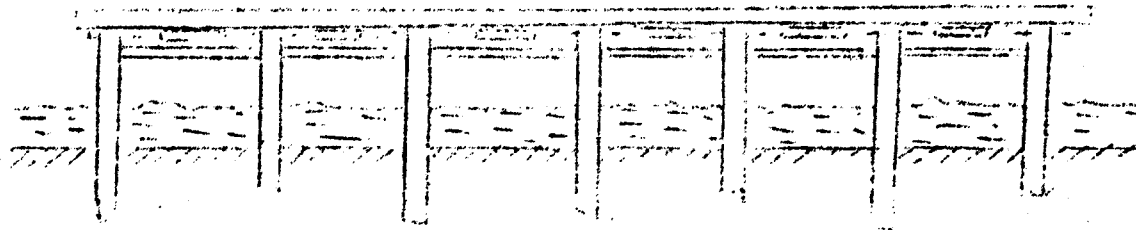
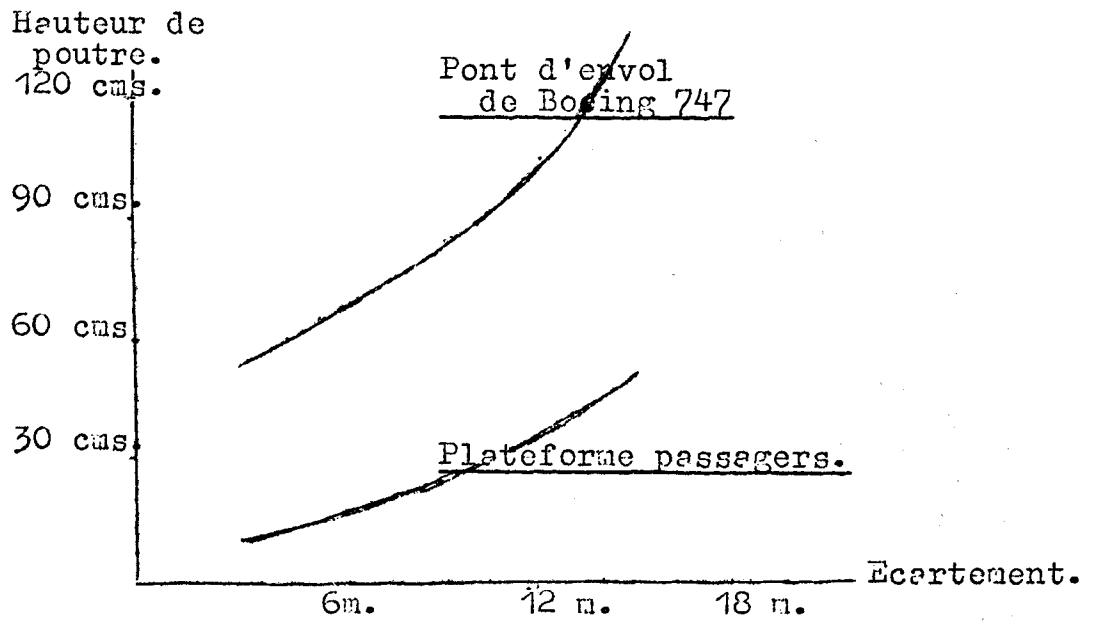




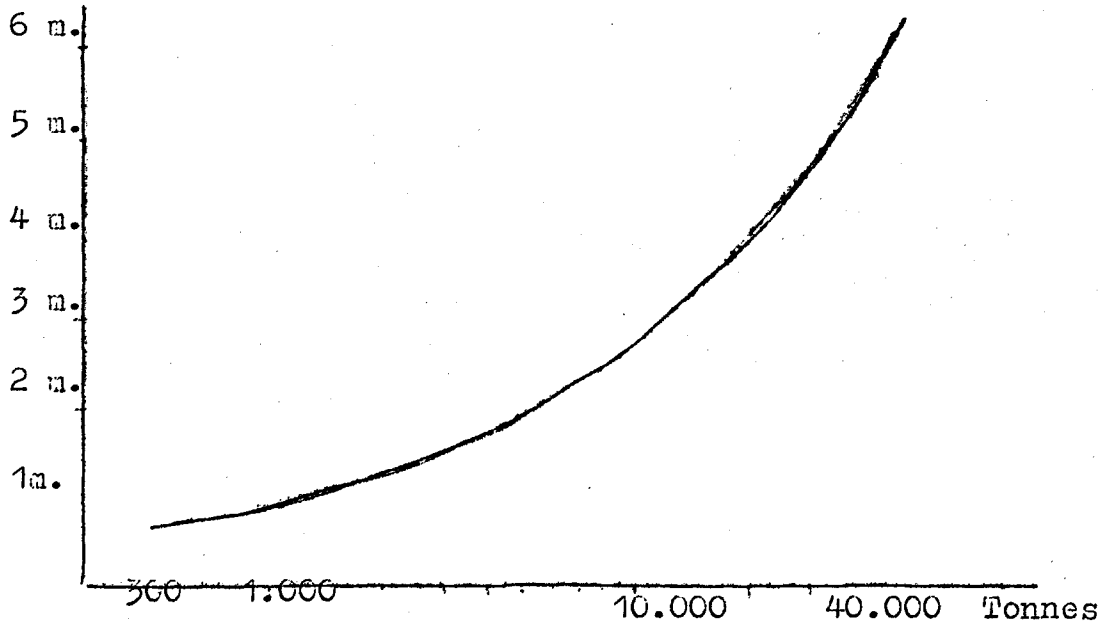
FIGURE 29



Épaisseur des poutres de plancher en fonction de l'écartement des piliers.

Diamètre pilier.

FIGURE 29 bis.



Charges maximales de piliers en fonction de leur diamètre.

FIGURE 30.

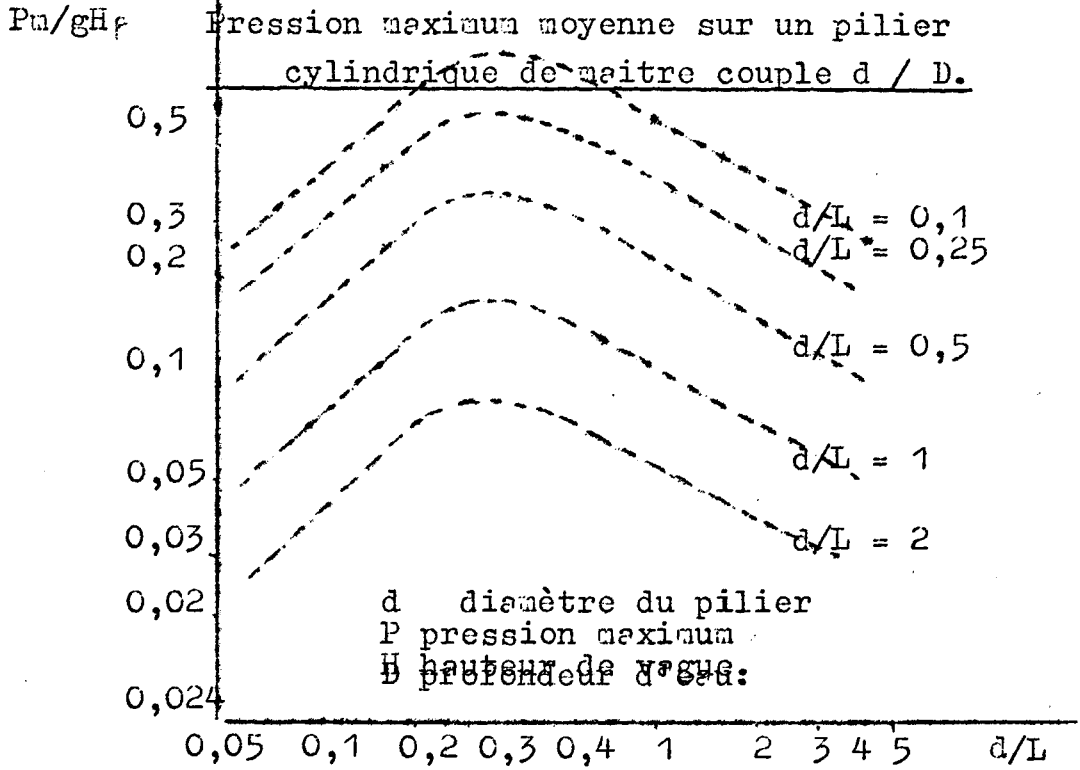


FIGURE 31.

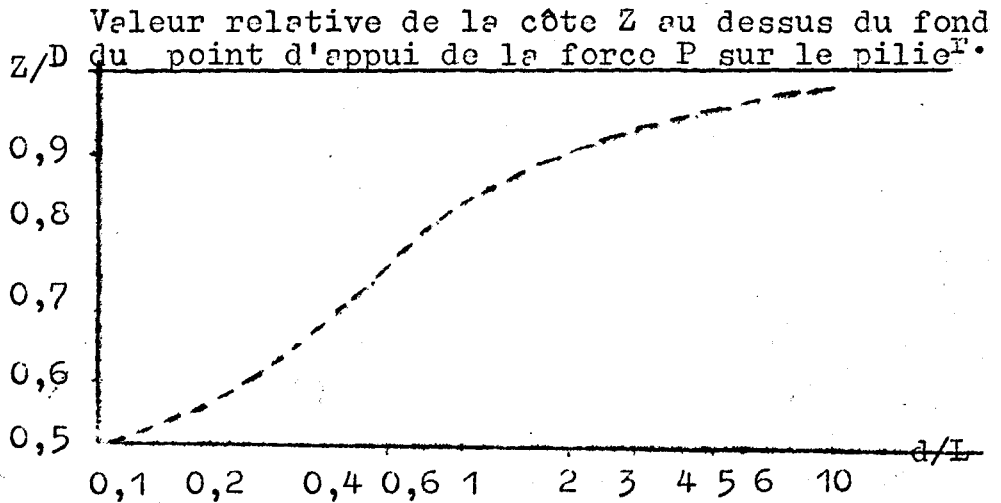
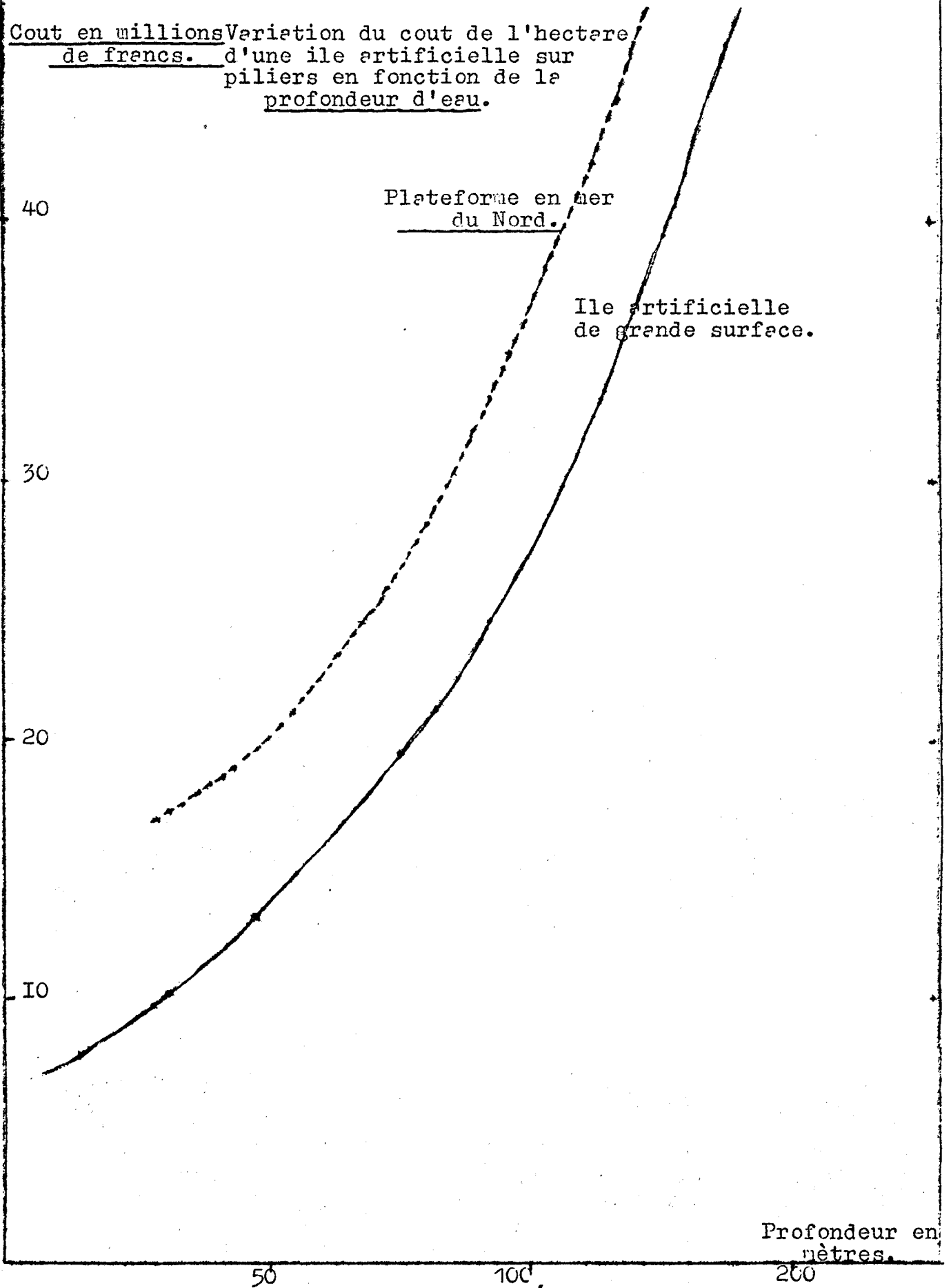


FIGURE 35.

Cout en millions de francs. Variation du cout de l'hectere d'une ile artificielle sur piliers en fonction de la profondeur d'eau.



Plateforme en mer du Nord.

Ile artificielle de grande surface.

Profondeur en mètres.

## IX. Les îles flottantes.

Les trois types d'îles artificielles précédents ont pour caractéristique commune de prendre appui sur le fond marin.

La mer étant également un élément porteur, il était tout naturel que l'on ait songé à l'utiliser comme support de structure artificielle en mer, qui serait alors flottante.

Les navires ont une origine millénaire, mais le premier projet d'aérodrome flottant ne date que de 1922.

L'ingénieur Américain E.H. ARMSTRONG l'avait conçu pour permettre une liaison aérienne transatlantique aisée; ce projet ne fut jamais réalisé, cependant le Ministère de la Défense des États Unis en reprit l'étude en 1945 et établit un projet détaillé d'exécution, reconnu parfaitement valable.

L'évolution des événements n'en imposa pas la construction.

Durant la dernière décennie de très nombreux projets d'aérodromes flottants ont été étudiés en Grande-Bretagne, au Japon et aux États-Unis.

Leur faisabilité ne fait aucun doute, d'autant plus que depuis 1939, des structures flottantes de grandes dimensions, les ponts flottants de l'état de Washington, ont été réalisés aux États-Unis d'Amérique et ont démontré une fiabilité totale.

Ces ponts, au nombre de trois, ont une longueur moyenne de plus de 2 kilomètres; ils ont été construits en 1940, 1961 et 1963 et sont tous en service.

### 91. Importance du fond marin.

L'île étant flottante, il semble au premier abord que le fond marin n'influence pas sa localisation.

Cela est exact si l'île artificielle n'a aucune attache avec ce dernier, mais ne l'est plus si l'île est ancrée au fond.

Dans la réalisation d'un ancrage, les caractéristiques du fond influencent le choix du système d'ancrage.

Les fonds vaseux ou limoneux ont des pouvoirs de tenue d'ancrage très variables. Ils imposent souvent l'emploi de pieux enfoncés profondément.

Les fonds de sable ou de gravier ont par contre un excellent pouvoir de tenue si l'ancre est accrochée d'une manière correcte.

Le pouvoir de tenue d'un fond rocheux n'est pas excellent et ces fonds nécessitent très souvent le forage de pieux importants, après emploi de charges explosives.

Ces pieux sont fixés solidement par coulage de béton.

Bien que l'étude du fond ne revête pas la même importance que dans les autres types d'îles artificielles, une étude du fond doit être menée afin de :

- connaître sa nature
- la nécessité de l'utilisation de pieux;
- l'ancrage approprié.

Par ailleurs la profondeur influence rapidement le coût de l'ancrage; une étude d'optimisation de l'emplacement sera très souvent rentable.

## 92. Conception de la structure.

A l'exemple d'un navire, la structure flottante doit avoir:

- une flottabilité suffisante pour supporter toutes les charges mortes ou vives de la superstructure, ainsi que son poids propre.

- une hauteur hors d'eau ou une protection suffisante pour éviter le déferlement de la mer sur la plateforme.

- une stabilité indépendante des éléments ou des surcharges occasionnelles.

Cette structure flottante sera toujours constituée par l'assemblage d'un grand nombre de cellules élémentaires réunies en nombre suffisant pour réaliser la surface requise.

Deux conceptions légèrement différentes se font jour dans sa réalisation:

- conception d'une plateforme type " Radeau "
- conception type " Support immergé "

### 921. Plateforme type " Radeau ".

Le support flottant est un véritable radeau de grandes dimensions, réalisé par l'assemblage de pontons flottants élémentaires dont les dimensions sont fonction de nombreux paramètres:

- dimensions du chantier de construction.
- flottabilité recherchée.
- matériau employé.

Ces pontons peuvent être  
- de faible hauteur et la structure est dite " pelliculaire ".  
- d'une hauteur relative et la structure est dite " volumétrique ".

Ils peuvent être en:  
- acier.  
- béton, généralement précontraint.  
- matériaux nouveaux, plastiques ou mélanges divers, plastiques- bétons, ferro-ciments, etc.

A ce jour le béton précontraint semble devoir être le matériau le mieux adapté à cette réalisation.

#### 9211. Ponton pelliculaire.

Le prototype en est la plateforme flottante " Seadrone" conçue par la firme britannique " Harris & Sutherland".

Les éléments modulaires sont des cubes ayant une section carrée de 30 mètres de côté et une hauteur d'environ 1 mètre.

Ces éléments reliés et assemblés par des câbles d'acier post-tendus peuvent constituer des surfaces flottantes de plusieurs kilomètres carrés.

#### 9212. Ponton volumétrique.

Ces pontons ont une hauteur relativement importante de l'ordre de 5 à 20 mètres, suivant les objectifs de l'île.

C'est ainsi que les dimensions suivantes sont données :

- Élément flottant des ponts du lac de Washington:  
 $L = 120$  mètres  $l = 20$  m.  $h = 5$ .
- Ponton élémentaire du projet Américain de la Triton City:  
 $L = 220$  m.  $l = 40$  m.  $h = 10$  m.
- Ponton de centrale nucléaire flottante:  
 $L = 130$  m.  $l = 25$  m.  $h = 10$  m.

#### 922. Plateforme sur support flottant immergé.

Afin de diminuer l'action des éléments marins sur les parois verticales du radéau, action qui peut développer des forces considérables étant donné les grandes surfaces d'attaque, la conception de supports flottants immergés prend de plus en plus corps, à l'exemple des plateformes de forage off-shore semi-immergées.

L'élément porteur flottant est immergé à une profondeur suffisante pour minimiser l'action des éléments marins. et supporte par le biais de colonnes verticales, dont le faible diamètre au voisinage d'émergence minimise l'action des vagues et des courants, une plateforme située à une hauteur suffisante au dessus des flots pour la mettre à l'abri des vagues les plus puissantes.

Ces flotteurs peuvent être horizontaux, verticaux ou circulaires, voire tétraédriques.

### 923. Stabilité de la plateforme.

Sous l'action des éléments ou de variations de charge sur la superstructure, une île artificielle flottante peut prendre un gîte nuisible.

L'étude de la stabilité d'une telle structure, résolue dans les îlots artificiels que sont les plateformes de forage, doit faire l'objet d'études très poussées, étant donnée la superficie considérable qu'elle peut avoir.

Une pente de 1% en effet correspond pour une plateforme de 1 kilomètre de long à un abaissement de 5 mètres d'un côté et un relèvement égal de l'autre, ce qui peut provoquer un sentiment d'insécurité.

Afin de minimiser la hauteur de la superstructure, la puissance du choc des vagues et le gîte en découlant, il est important de prévoir une protection contre l'action directe des éléments.

Cette protection sera assurée d'une manière générale par

- un dispositif de brise-ames flottants
- des digues périmétriques à orifices multiples, type Jarlan.
- ou tout autre procédé précédemment décrit.

### 93. Techniques de construction.

La construction de structures flottantes relève de techniques simples, déjà appliquées avec succès dans la réalisation d'éléments isolés ou d'ouvrages importants comme les ponts flottants de l'état de Washington.

On peut distinguer deux phases principales:

- une phase terrestre de la construction des éléments modulaires.
- une phase marine d'assemblage et de finition.

### 931. Chantier de construction terrestre.

Ce chantier de construction doit être en bordure d'eau, - fleuve ou mer, permettant ainsi une mise en flottaison immédiate et des transports par flottaison et remorquage aisés.

Ce chantier se situe le plus généralement

- soit dans une forme de construction navale, ayant une libre communication avec la mer.

- soit une souille creusée à une profondeur suffisante et séparée de la mer par une digue à ouverture commandée par une porte ou par un remblai de terre, aisé à démolir lors de la mise en eau de la souille.

Pour des éléments de grande hauteur, l'utilisation de bassins successifs peut jouer: le soubassement de la structure est construit dans un bassin peu profond, puis après mise en eau, l'élément est déplacé dans des bassins de plus en plus profonds; la terminaison de l'élément peut même être entreprise en mer abritée.

### 9311. Description sommaire d'un chantier.

Pour construire une île flottante de grande dimension, il faut un nombre élevé d'éléments modulaires.

La construction d'un aérodrome flottant de 300 hectares peut exiger de 1.000 à 3.000 éléments suivant leur dimension.

Une méthode artisanale exigerait des dizaines d'années.

Un chantier adapté à une production en grande série comprendra:

- A. - Les aires de construction des pontons.

Ces aires de construction peuvent être réalisées comme suit:

- le long du rivage on creuse une souille de 2 à 3 kilomètres de longueur, compartimentée en souilles secondaires, communiquant toutes avec la mer, l'ouverture étant munie d'une porte ou close par un dispositif gonflable à l'étanchéité parfaite.

Le fond de la souille est constitué par une base cimentée de forte porosité.

- B. - Des stations de pompage permettant le vidage rapide des bassins mis en eau.



- C. - Un atelier de préfabrication des armatures métalliques du béton.
- D. - Une centrale à béton à fort débit (400 à 800 tonnes/heure) alimentant directement sous pression les aires de construction.
- E. - Une centrale à air comprimé.
- F. - Un réseau de manutention (grues, portiques et portiques.)
- G. - Des aires de stockage diverses des matières premières.
- H. - Des bâtiments administratifs.
- I. - Des aires de stockage sur l'eau des pontons semi-finis.
- J. - Une zone de finition sur l'eau de ces pontons.
- K. - Une zone de stockage des pontons finis.
- L. - Les moyens de halage, remorquage etc..

#### 9512. Construction d'un ponton.

L'élément ponton peut être construit d'un seul bloc, ce qui sera le cas général, mais également en plusieurs tronçons préfabriqués, puis solidement assemblés.

Les phases de sa construction sont schématiquement les suivantes :

- 1<sup>ère</sup> phase. Étendre sur le sol de la souille une feuille de plastique de 20 à 30/100 ( ou tout autre produit: cire - graisse..) empêchant le collage du béton sur le fond.
- 2<sup>ème</sup> phase. Mise en place du ferrailage, des câbles de précontrainte, des réservations pour les câbles de post-contrainte et des coffrages.
- 3<sup>ème</sup> phase. Bétonnage de la dalle inférieure
- 4<sup>ème</sup> phase. Bétonnage des côtés.
- 5<sup>ème</sup> phase. Bétonnage des abouts
- 6<sup>ème</sup> phase. Bétonnage total ou partiel des abouts. Ce travail peut en effet être réalisé hors du bassin.
- 7<sup>ème</sup> phase. Mise en précontrainte.
- 8<sup>ème</sup> phase. Evacuation des caissons par halage et remorquage, mise en stock.
- 9<sup>ème</sup> phase. Finition des pontons.

L'emploi de blocs de polystyrène expansé donne une sécurité accrue à la flottaison et permet la suppression des coffrages intérieurs; les coffrages extérieurs peuvent également être remplacés par de minces panneaux en béton prémoulé, demeurant solidaire du ponton à sa mise à l'eau.

### 932. Chantier marin.

L'installation de grandes surfaces flottantes exige des calculs très précis de stabilité et de positionnement à toutes les phases de l'opération, qui doit être soigneusement planifiée.

Quand tous les travaux d'approche et de préparation en mer sont terminés, quand tous les matériaux et pontons sont à pied d'oeuvre sur les chantiers terrestres, le chantier marin peut être ouvert.

Le planning des travaux doit tenir compte de prévisions météorologiques optimales, surtout au début des travaux.

Schématiquement le processus des opérations est le suivant:

- A/ Mise en place d'une protection sommaire contre l'action des éléments.
- B/ Mise en place des ancrages nécessaires en début des travaux.
- C/ Assemblage des pontons élémentaires en mer ou mieux préassemblage partiel à terre.
- D/ Mise en post-contrainte successive des assemblages réalisés après préparation des joints.
- E/ Ancrage définitif.

### 9321. Logistique.

Les moyens maritimes à mettre en place sont considérables:

- Remorqueurs.
- Bateaux de service
- Grues flottantes.
- Centrale à béton.
- Ateliers de post-tension.
- Personnel spécialisé.

Le cout des travaux en mer influence fortement le cout total de l'opération; aussi a-t-on intérêt à réaliser le maximum des assemblages, voire leur totalité sur les chantiers terrestres et remorquer l'ensemble si d cela est possible sur la localisation définitive choisie.

#### 94. Positionnement en mer de la plateforme.

Le positionnement en mer d'îles flottantes de grande dimension pose toujours des problèmes délicats à étudier et à résoudre.

Cependant les approches de l'étude sont connues et aucun obstacle majeur ne s'oppose à une réalisation correcte tant sur le plan théorique que pratique.

Deux facteurs importants conditionnent la solution:

- la profondeur de l'ancrage.
- la tolérance du déplacement horizontal autorisé.

##### 941. Faibles fonds ( jusqu'à 100 ou 200 mètres)

On peut envisager un positionnement fixe dans le plan horizontal:

- par des tours glissières empêchant tout mouvement latéral, mais autorisant un mouvement vertical; imposé par une variation de niveau ou de charge de la superstructure.

- un amarrage à liens souples à tension constante à des ancres immergées, à des puits forés ou à des points fixes de la côte.

On peut également tolérer un faible déplacement horizontal par l'utilisation de liens souples, pouvant jouer librement ( câbles ou bras télescopiques.)

Lorsque le positionnement rend possible un grand déplacement horizontal, on peut envisager l'amarrage en un seul point, autour duquel la structure flottante peut tourner librement.

##### 942. Fonds moyens.

On peut envisager:

- un positionnement fixe ou semi-fixe par ancrage traditionnel à des ancres immergées  
ou
- un auto-positionnement dynamique, décrit ci-après.

##### 943. Grands fonds. ( au dessus de 500 mètres.)

Bien qu'un amarrage par liens souples à des ancres immergées soit toujours possible, ce qui pose techniquement de grandes difficultés d'entretien et de réparation, un auto-positionnement dynamique prévaudra.

Dans cette solution l'action des éléments sur la structure est compensée par des actions de sens inverse d'hélices ou de tuyères à réaction.

son application se rencontre de plus en plus dans la recherche d'un positionnement précis des navires ou des plateformes semi-submersibles de forage en mer.

La coordination des poussées et leur précision sont commandées par un ordinateur.

L'auto-positionnement de grandes surfaces flottantes met en jeu des poussées importantes.

La force de poussée peut être calculée d'une manière précise en fonction des éléments agissant sur la structure dans l'eau et hors de l'eau.

Une formule suffisamment approchée pour calculer l'action du vent sur une structure lui offrant une surface  $S$  est

$$F \text{ kgs} = 0,1155 \times S \times V^2$$

où  $S$  est en Mètres carrés et  $V$  en kilomètres.

Ceci représente une poussée de 17.300 tonnes pour une île de 1 kilomètre de côté, d'un franc-bord de 20 mètres et un vent de 100 kilomètres/heure.

L'implantation des centres de poussée doit être déterminée avec précision et la résistance de la structure calculée en conséquence.

Dans ce domaine, l'imagination des ingénieurs peut se donner libre cours:

- salles de machine en infrastructures.
- hélices traditionnelles
- tuyères à réaction.
- Vis hélicoidales.
- poussées par remorqueurs sous marins
- récupération de l'énergie des vents ou de la houle comme force motrice.

Quelles qu'elles soient les solutions adoptées, on devra donner à la structure flottante les meilleurs profils aéro et hydrodynamique.

## 95. Considérations écologiques.

Les travaux d'aménagement d'une île artificielle flottante n'amènent pas en principe de sérieuses perturbations à la vie marine pendant toute la période de l'activité du chantier, si ce n'est pendant la période des forages nécessaires à la bonne tenue des ancrages.

De tous les types d'îles artificielles déjà décrits, l'île flottante est celle qui apporte le moins d'agressivité à l'environnement marin.

Elle apporte cependant un déséquilibre à l'interface mer-air aux conséquences déjà décrites.

Les formes "radeau pelliculaire" ou "semi-immersée" n'exercent pas une grande influence sur la courantologie locale, en particulier sur les courants profonds.

Le cas n'est pas le même pour le type "radeau-plateforme" ayant de fort tirant d'eau, 10 mètres ou plus, mais les effets en seraient moindres que pour les îles-remblai ou polder.

Dans ce dernier cas, la déviation certaine de courants superficiels pourrait être un élément sérieux de perturbation local de la vie et de l'environnement marin tant dans l'élévation des taux de pollution que de l'attaque des côtes.

## 96. Coûts.

Il est très difficile dans le cadre d'une étude prospective de traiter du coût de réalisation d'une île flottante.

Dans un domaine aussi nouveau, il serait nécessaire d'établir un projet poussé et de faire un devis estimatif en procédant à de véritables consultations d'entreprises.

Les coûts qui en découleraient seraient d'ailleurs fort illusoires, car aucune entreprise française n'est à ce jour outillée valablement pour réaliser de grandes structures flottantes de l'ordre de plusieurs dizaines d'hectares et les extrapolations qui pourraient être faites à partir des plateformes de forage seraient des plus dangereuses.

Les couts indiqués par différents projets chiffrés Américains ou Britanniques sont des plus variables; ils sont compris dans une fourchette des plus larges et estimés à plus ou moins 50 %.

Ces couts réels ou estimés sont cependant intéressants à connaître car ils permettent une première approche du problème.

0

961. Le seul renseignement précis du cout d'une structure flottante de petite superficie mais de dimensions intéressant le cadre de cette étude est fourni par les réalisations existantes des ponts du lac Washington.

Le cout du pont sur le canal Hood réalisé en 1961 avait été estimé à 80 millions de francs nouveaux.

Du fait de certaines modifications, le cout réel a été de 100 millions de francs.

Ce cout intéressait:

- la partie flottante.
- l'installation mobile permettant le passage des navires.
- l'ancrage.
- la chaussée en viaduc-passrelle.

Le cout des pontons flottants, leur assemblage et leur ancrage peut être estimé à 65 millions de francs, soit 22,5 millions l'hectare ou 500 francs le mètre cube de support flottant.

Le cout du 2<sup>ème</sup> pont sur le lac Washington réalisé en 1963 a été de 57,5 millions de francs, soit 17 millions l'hectare ou 380 francs le mètre cube.

Ce cout est de 25 % inférieur au précédent.

La raison en est une connaissance plus approfondie des techniques de réalisation, un amortissement valable des chantiers de construction des pontons et le fait que l'amélioration des techniques a permis d'éviter de sérieux incidents survenus lors des premiers chantiers.

0

Les nombreux projets d'aérodromes flottants étudiés le monde entier sont intéressants à étudier car ils donnent des prix estimatifs, certes variables, mais permettent une première estimation.

Ces prix sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau 36:

Coûts estimés de structures flottantes.

N°	Désignation	Surf. Has.	Hauteur Ponton.	Prix/francs Hectare.	Prix N°.
1	Pont Hood.	2,9	4,5 m.	22.500.000	500 frs.
2	- lac Wash.	3,4	4,5	17.000.000	380 -
3	Aér.Osaka.	308.	10.	7.500.000	75 -
4	Aér.Rudgers.	7,5	6.	5.650.000	94 -
5	Aér. Tokyo.	135.	15.	12.800.000	80 -
6	Aér. Boeing.	85.	12.	16.000.000	133 -
7	Aér. Toronto	600.	12.	19.000.000	159 -
8	Seadrome.	420.	1,2	2.100.000	175 -
9	Triton City.	1,75	10.	13.000.000	130. -

La variation des coûts à l'hectare est importante.

Une des raisons en est la différence des hauteurs de ponton; aussi est-il intéressant de ramener ces prix au mètre cube du volume du ponton; on voit que ce coût varie dans une fourchette assez faible de 75 à 175 francs.

Le graphique 37 donne la variation du coût de l'hectare en fonction de la hauteur du ponton.

962. Coût de l'ancrage.

Le coût de l'ancrage ne peut être fixé qu'après une étude minutieuse et une connaissance parfaite de l'environnement marin.

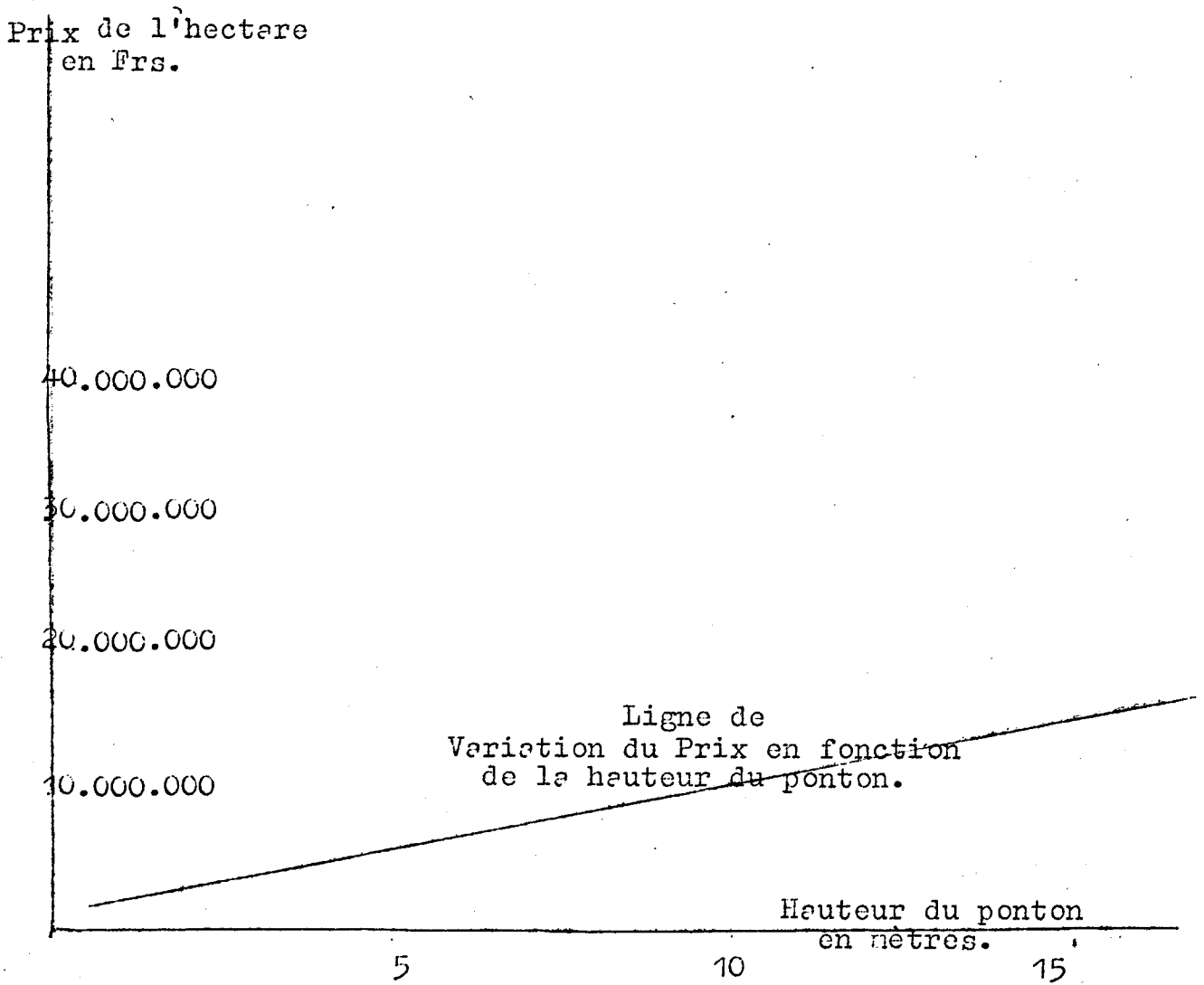
Il ne peut d'ailleurs l'être que d'une manière approximative tant le coût d'un ancrage est variable et dépend de la nature du fond; le coût d'un ancrage de 500 tonnes par pieu peut varier de 500.000 à 1.500.000 de francs.

Les élingues d'acier ont un coût très variable suivant leur diamètre et la nature de l'acier.

C'est ainsi qu'un câble d'acier de 56 mm pesant 12 kgs/m<sup>2</sup> peut coûter de 36 à 200 francs le mètre linéaire.

Figure 37.

Cout estimatif de l'hectare d'une ile artificielle  
flottante en fonction de la hauteur du ponton.





Un projet avait été étudié par la Société Boeing; le cout de l'ancrage pour une structure flottante de dimensions 4.500 x 175 mètres avait été estimé à 18 millions de francs.

Le nombre total d'ancres étant de 78, soit environ un ancrage par hectare, le cout de l'ancrage à l'hectare était de 230.000 francs.

Le projet de l'Aquadrome Rudgers prévoit le positionnement de la surface flottante de 7,5 hectares par 16 amarres soit 2 par hectare.

Le cout total de l'ancrage a été estimé à 955.000 francs soit 125.000 francs l'hectare.

Le cout total de l'ancrage du projet Triton City a été estimé à 5.000.000 de francs soit 2.850.000 francs l'hectare.

#### 963. Cout de l'entretien.

A l'instar des coques de navires, il est nécessaire de prévoir un entretien des infrastructures flottantes pour empêcher toute corrosion et une surcharge anormal due au fouling.

Ce problème se pose d'ailleurs pour les piliers du type d'île artificielle plateforme sur piliers.

Pour l'entretien des structures flottantes on peut estimer les couts d'entretien suivants pour les structures métalliques:

- 1 % du prix de l'ouvrage pour la protection cathodique.
- 4 % de ce prix pour la protection par application de peinture.

Le cout de l'entretien annuel d'un pont flottant du lac Washington a varié depuis sa mise en service entre 400.000 et 500.000 francs; l'entretien bi-annuel du système d'ancrage entre pour une part importante dans ce cout.

Un calcul estimatif sommaire, basé sur l'emploi permanent d'équipes de travailleurs sous-marins chargés de l'entretien préventif ( brassage et peinture ) et de l'inspection permanente des coques et du système d'amarrage donne un cout annuel approximatif de 40.000 francs par hectare pour une île d'une superficie de 100 hectares environ.

Le projet de la Triton City a été élaboré à la demande du Ministère de l'Équipement des États-Unis, désireux de connaître le prix d'une communauté flottante.

L'étude financière menée dans ce projet aboutit à un coût par tête d'habitant de 40.000 francs pour une cité de 5.000 habitants environ; ce chiffre inclut la construction de la structure flottante, de la superstructure habitable avec ses logements, rues et magasins ainsi que tous les aménagements collectifs de vie commune.

Les coûts terrestres sont:

- 37.500 francs par habitant dans le cadre de l'extension d'une cité.

- 55.000 francs par habitant dans le cadre d'une rénovation de la ville

La comparaison est donc en faveur de la cité flottante, d'autant plus que les coûts terrestres ne comprennent pas certains aménagements ultra-modernes prévus dans le projet de la Triton City.

Si on appliquait les bases financières de la Triton City à une "marina" flottante de 1.000 familles de 5 personnes et pourvuë d'un plan d'eau intérieur pouvant abriter 1.000 bateaux de plaisance, le coût par famille du logement et du poste à quai pourrait se situer à:

- 200.000 francs dans l'hypothèse où la marina serait une véritable ville disosant de mairie, écoles, hopitaux, etc..

- 175.000 francs, dans l'hypothèse où la marina, ne jouant que le rôle d'une communauté de résidence secondaire, n'aurait nullement besoin des équipements collectifs nécessaires à une ville.

Certes ces éléments financiers ne donnent qu'un ordre de grandeur de prix futurs, mais ils permettent dès aujourd'hui d'établir des comparaisons avec les coûts terrestres.

## 97. Considérations générales.

Le problèmes des îlots artificiels flottants, que sont les plateformes de forage semi-submersibles, a été résolu rapidement par une connaissance sans cesse améliorée des informations océanologiques et une mise au point satisfaisante de programmes sur ordinateurs.

Les plateformes actuelles calculées avec précision pour un environnement déterminé, ont une fiabilité totale, une excellente stabilité et leur problème de positionnement sont résolus même par ancrage à grande profondeur.

Construites jusqu'à ce jour en acier, elles peuvent l'être bientôt en béton précontraint, les flotteurs tout au moins, d'importantes études étant actuellement en cours aux Etats-Unis.

Si dans le domaine de ces plateformes, les techniques de construction semblent donc devoir être au point, il ne semble pas de même en être pour les grandes îles flottantes de plusieurs dizaines ou centaines d'hectares.

Cependant les ponts de l'état de Washington sont des prototypes qui prouvent la faisabilité de grandes surfaces flottantes rectilignes; les principes de construction, qui ont permis la réalisation de véritables poutres flottantes de 1.500 mètres de long, doivent pouvoir s'appliquer dans l'assemblage de plusieurs poutres identiques, réalisant rapidement des surfaces de plusieurs centaines d'hectares.

Peut-être même la solidité de grandes structures à section horizontale carrée sera supérieure à celle d'éléments longilignes, par l'inter-réaction des éléments la composent et une meilleure tenue à la houle.

Dans ce domaine des études constantes sont menées et il est bon de souligner la part prépondérante prise par la Fédération Internationale de la Pré-contrainte dans les progrès réalisés dans le monde dans ce domaine.

0

Les structures flottantes possèdent sur les autres types d'îles artificielles des avantages certains dans de nombreux domaines, à savoir:

- La nobilité.

Une île flottante n'est pas liée à demeure au fond marin; elle peut être déplacée aisément par remorquage après désamarrage.

- La faible atteinte portée à l'environnement.

Aucune atteinte sérieuse à la vie marine n'est apportée par une île flottante, si elle n'est pas elle-même source nouvelle de pollution; seuls les ancrages, pendant leur mise en place, bouleversent ponctuellement une faible partie du fond.

Au contraire la vie marine se développe intensément sous les plateformes marines, surtout si le rayonnement solaire peut être réfléchi par des tubes conducteurs sous ces dernières.

L'île flottante ne fait pas un obstacle sérieux aux courants marins, qui peuvent s'écouler aisément sous la plateforme.

- La faible dépendance du fond marin.

La qualité du fond n'importe que pour l'ancrage; quelque soit le fond, un positionnement d'une précision plus ou moins grande peut être résolu.

- L'agrandissement superficiel.

La structure flottante étant construite par juxtaposition et assemblage indéformable d'éléments modulaires, aucune impossibilité technique ne joue contre une extension indéfinie, si toutes les réservations ont été faites au préalable.

- La sécurité devant les secousses sismiques.

La mer est domaine où les ondes sismiques se propagent d'une manière remarquable, engendrant tsunamis et raz de marée.

Son pouvoir porteur n'est nullement bouleversé après le passage du phénomène, qui à terre peut bouleverser le sol et détruire les fondations les plus solides.

On a pensé cependant aux Etats-Unis, où l'on envisage de créer des centrales nucléaires flottantes sur la côte Ouest, sujette aux tremblements de terre, que les vibrations, transmises par l'océan, pourraient mettre en danger la structure flottante.

On a étudié le moyen d'amortir le choc vibratoire en faisant reposer la plateforme, non plus directement sur l'eau, mais sur un coussin d'air, emprisonné dans des compartiments sans fond, situés à sa base. ( Fig.39)

Les calculs et expériences en bassin ont montré qu'un coussin d'air même très faible est un véritable absorbeur des chocs sismiques les plus violents.

Bien que coûteuse, la solution " coussin d'air " donne une sécurité anti-sismique très grande.

Elle peut également contribuer à une meilleure protection de la structure flottante contre l'action des éléments, car en faisant varier la pression de l'air emprisonné dans les caissons sans fond, on peut faire monter la plateforme sur l'eau.

On peut cependant penser que pendant la durée des secousses sismiques et le déferlement du tsunamis, les tensions internes développées peuvent croître énormément; la structure doit être calculée en conséquence.

X. Iles artificielles flottantes ,reposant sur le fond.

On peut très bien concevoir le positionnement d'une ile flottante réalisé par la repose sur le fond de la structure entière.

Cette conception, nouvelle forme d'ancrage, a donné naissance à un nouveau type d'ile artificielle, qui bien qu'identique dans sa phase construction à celui d'une ile flottante, en diffère en bien des points.

Aussi justifie-t-elle un classement particulier.

Les différences les plus importantes sont les suivantes:

- La hauteur des pontons ou caissons à assembler est commandée par la profondeur du site; elle doit en effet être égale à cette profondeur augmentée de la hauteur d'émergence de la plateforme.

Les caisson modulaires peuvent avoir cette hauteur totale ou être composé de plusieurs éléments superposés.

- Un effort d'arrachement très grand du fond peut s'exercer sur la structure.

Aussi sa masse doit-elle être calculée pour résister aux forces verticales résultant de la gravité et de la poussée hydrostatique, ainsi qu'aux forces horizontales, nées de l'action des éléments marins.

Il est aisé de calculer ces forces et les réactions de la masse, sur le fond marin en particulier, ce qui permet de décider s'il faut ou non une fixation solide par ancrage par pieux forés ou tout autre moyen.

Quelques exemples illustrent cette nouvelle technique, qui semble appelée à de grands développements dans l'engineering off-shore.

101. L'ile artificielle DORIS en Mer du Nord.

La solution au problème de stockage de l'huile brute extraite du gisement off-shore d'Ekofisk en Mer du Nord, exploité par la société Philips a été donnée par la C.G.DORIS en utilisant cette conception nouvelle.

L'unité de stockage est un réservoir en béton, vertical, de 90 mètres de hauteur et de 53 mètres de côté, dont le sommet est situé à 7 mètres environ au dessus du niveau de la mer.

Ce réservoir est divisé en 9 compartiments cylindriques verticaux; il est entouré par un caisson en béton, aux parois perforées, de 92 x 96 mètres de côté.

Les parois ont une épaisseur de plus de 1 mètre 50 et vont du fond jusqu'à 12 mètres au dessus du niveau de la mer, soit une hauteur totale de 82 mètres.

Ce caisson joue le rôle d'une digue périphérique du type Jarlan; il transforme l'énergie potentielle des vagues en énergie cinétique, se dissipent entre ses deux parois verticales et réduisent ainsi la poussée qui s'exerce sur l'important pilier que constitue la structure entière.

Le sommet du réservoir est aménagé pour l'habitat d'une trentaine de personnes, les installations techniques, centrales de pompage en particulier, l'héliport, etc...

Aucun ancrage par pieu n'est nécessaire pour le positionnement fixe de la structure sur le fond: tous les calculs et essais sur modèles réduits, réalisés en bassin ont prouvé que la "tour", dont les cylindres verticaux sont constamment remplis de liquide (huile brute ou eau de mer de densités fort différentes;) reste en place quelque soient les conditions météorologiques en mer du Nord, même les plus mauvaises depuis un siècle.

On a calculé les forces horizontales s'exerçant sur la tour, les poussées verticales de soulèvement et le moment de renversement, déterminant les caractéristiques et coefficients de sécurité à donner à la construction afin d'éviter tout glissement ou tout renversement de la structure.

Les efforts internes s'exercent sur tous les éléments de la structure sous l'effet de ces forces ont été déterminés par un programme spécial, exploité sur ordinateur, qui donnait les dimensions des poutres, poutrelles et parois, en conformité avec les règles et standards internationaux ( Société Américaine d'essais des matériaux - Institut Américain du Béton - Institut Norvégien du Béton - Comité Européen du Béton - Fédération Internationale de la Précontrainte.)

Le fond relativement plat de la Mer du Nord ne doit offrir aucune difficulté majeure pour la repose de l'unité de stockage.

La construction de la structure se fait en 2 étapes distinctes:

- construction de la dalle du fond.
- construction de la superstructure.

La dalle du fond a été fabriquée dans une souille à sec de 7 mètres de profondeur, réalisée près de Stavanger, sur la côte Norvégienne, par assemblage et post-contrainte d'éléments caissons préfabriqués.

La dalle terminée a 6 mètres de haut et la digue circulaire Jerlén, dont les perforations ont été bouchées, a près de 9 mètres de hauteur.

La dalle, véritable plateforme flottante a été ensuite remorquée et ancrée dans une baie relativement protégée d'une profondeur de 30 mètres.

La construction s'est ainsi poursuivie à flot, les perçoirs montant progressivement alors que la plateforme s'enfonçait progressivement dans les flots.

Les techniques des coffrages glissants et des éléments préfabriqués sont utilisées sur une grande échelle dans cette construction.

Durant cette étape, la stabilité de l'ensemble est assurée par un équilibrage permanent par ballastage des caissons creux de la plateforme de la base, assurant une émergence suffisante de l'ensemble pour la poursuite en toute sécurité des travaux.

L'ensemble terminé a un tirant d'eau de 62 mètres.

Le remorquage, dont le cheminement a été soigneusement étudié, se fera avec les perforations de la digue extérieure ouvertes, la structure flottant grâce à ses caissons verticaux internes.

Les forces nécessaires au remorquage ont été estimées à

- 175 tonnes à 1,5 nœuds
- 300 tonnes à 2 -

Quand l'unité sera sur le site, le caisson sera progressivement immergé par pompage d'eau de mer dans les réservoirs verticaux; la hauteur d'immersion n'étant que de 8 mètres, l'opération, très délicate prendra 36 heures.

La construction et la mise en place sur le site ont été estimées devoir durer un an et demi.

le coût total sera de 125 millions de francs.

De sévères précautions ont été prises pour empêcher toute pollution marine, surtout lors du remplissage des réservoirs par l'huile brute, l'eau de mer évacuée passant par une station de traitement.

## 102. L'île artificielle CITRA.

L'assise d'une plateforme immergée requiert un fond d'une grande horizontalité, critère de moins en moins facile à respecter au fur et à mesure que les dimensions de la base croissent

Certes un nivellement du fond est possible, surtout avec le développement des matériels sous-marins tels que bulldozers ou bennes sous-marines; c'est cependant une opération délicate, dont le rendement est fonction de la nature du fond et dont le coût croît avec la profondeur et la superficie.

Une nouvelle technique a pris naissance; elle réside dans la construction de l'île artificielle par empilement de caissons; immergés successivement et solidement assemblés entre eux.

Le nivellement du fond, ne portant peut-être que sur des éléments de surface du fond est ainsi rendu plus aisé

Une telle technique a été signalée dans la construction de l'île-polder du Professeur Albert.

Un autre exemple en est donné par le projet de l'île artificielle Citra.

Cette île est composée de grands caissons en béton précontraints, construits à terre, remorqués sur le site et empilés les uns sur les autres par immersions successives, après remplissage d'eau de mer.

La partie supérieure de l'île est portée à la hauteur d'émergence voulue par le simple jeu de l'empilement de caissons ou par construction sur l'empilement réalisé hors d'eau de la superstructure nécessaire.

Les caissons peuvent aisément être cimentés entre eux et reliés par des câbles de post-contrainte, assurant une rigidité complète de l'ensemble.

Etant donné leurs dimensions importantes, leur masse, surtout s'ils sont remplis d'eau, de sable ou de béton, ces moyens ne sont pas toujours nécessaires: le poids des caissons suffit à assurer la stabilité parfaite de l'ensemble.



L'île artificielle Citra, construite pour le stockage de 450.0000 mètres cubes de pétrole, est composée de 4 caissons inférieures et de 4 caissons supérieurs, chaque caisson ayant approximativement pour dimensions 110 x 60 x 40 mètres.

Les dimensions hors tout de l'île projetée sont

$$L = 213 \text{ m.} \quad l = 116 \text{ m.} \quad h = 86 \text{ m.}$$

pour une profondeur de 73 mètres.

### 103. L'île artificielle NODEC.

Le port de Marmabo, près de Goa (Indes) assure l'exportation de 10 millions de tonnes de minerai de fer dont 8 millions vont au Japon.

Le piéage du port n'est que de 8 mètres, ce qui interdit son accès aux navires de plus de 10.000 tonnes et en particulier aux modernes ore-carriers de 100.000 tonnes de plus en plus utilisés par les Japonais, tant les taux de fret sont intéressants.

Pour garder leur clientèle Japonaise, les exportateurs indous ont fait réaliser par la société Japonaise NODEC (Mitsui Engineering) un terminal artificiel à 5 kilomètres au large de la côte, obtenu par immersion sur le fond de 15 mètres d'une structure flottante du type plateforme semi-submersible catamaran.

Les deux flotteurs longitudinaux ont environ 110 mètres de long, 10 m. de large et 5 m. de haut.

La plateforme d'une largeur de 32 mètres et d'une longueur de 110 mètres est supportée par 14 piliers de section 5 m. x 10 m. et de 16 mètres de hauteur; elle est donc à 21 mètres au dessus du fond et à 5 mètres au dessus du niveau de la mer à marée haute.

L'aménagement de cette plateforme lui permet de stocker 20.000 tonnes de minerai; elle abrite 30 personnes et dispose de tout l'appareillage de maintenance nécessaire.

La structure flottante, remorquée à partir du Japon, fut immergée sur le site, préalablement aménagé en partie, par remplissage des flotteurs, remplissage variant avec le tonnage du minerai stocké sur la plateforme afin de limiter la pression sur le fond.

La stabilité de la plateforme s'est avérée excellente par des vents de 180 kilomètres/heure, des vagues de

6 mètres de haut, une hauteur de marée de 2 mètres et un courant de 2 noeuds.

Cette structure, réalisée en acier bien qu'elle ait pu l'être en béton, a l'avantage de pouvoir être remise rapidement à flot et remorquée vers des mouillages plus surs, si besoin était.

#### 104. Iles à piliers émergents.

Des caissons en acier ou en béton précontraint d'un volume pouvant atteindre 150.000 mètres cubes, sont construits à terre, mis à flot, remorqués et immergés sur le site jusqu'à repose totale sur le fond; une colonne axiale en acier ou en béton précontraint de la longueur nécessaire émerge des flots à hauteur voulue pour soustraire la plateforme de l'emprise des vagues.

C'est ainsi que dans le golfe Persique, au large de Dubaï une cuve de stockage en acier de 75.000 mètres cubes a été immergée sur le fond; 2 autres cuves sont en cours de réalisations.

Ces caissons héli-sphériques ont un diamètre hors tout de 82 mètres et une hauteur de 33 m; ils sont fixés au fond par 30 pieux de 90 centimètres de diamètre.

La colonne d'un diamètre de 9 mètres et d'une longueur totale de 30 m. s'élève à 14m. au dessus du niveau de la mer.

Un système identique de stockage a été réalisé par la Sea Tank Company en béton armé.

Il est évident que dans les mers très mauvaises une telle conception peut s'appliquer à la réalisation d'iles artificielles.

On peut en effet concevoir une colonne émergente de plusieurs dizaines de mètres de diamètres, servant de support à des activités humaines, se prolongeant dans les profondeurs de l'océan à l'intérieur des caissons héli-sphériques dont les diamètres peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres.

Cette conception peut également s'appliquer à la construction des piliers porteurs de très grandes dimensions pour le support de plateformes d'iles artificielles hors d'eau précédemment décrites.

Les caissons britanniques, support des phares du type de Kish Bank, en sont une préfiguration intéressante.

Ces caissons sont construits avec des colonnes axiales télescopiques, qui se développent verticalement par simple flottation et par l'action de l'air comprimé, lors de leur immersion, par l'eau de mer pénétrant à l'intérieur.

L'ensemble peut ensuite être rempli par du béton, projeté sous pression ou par tout autre matériau, sable par exemple.

On peut très bien concevoir avec de tels procédés la construction de plateformes hors d'eau à très grandes travées, de plusieurs dizaines de mètres de portée, à l'exemple des grands ponts modernes.

#### 106. Considérations générales.

Les exemples précédents démontrent que la technique des caissons flottants, à immersion totale et dépose sur le fond, peut s'appliquer à la réalisation de tous les types d'îles artificielles:

- île-remblai: ex. Ile artificielle Citra.
- île-polder : ex. Ile artificielle du Professeur Albert du type polder.
- île sur piliers: ex. île artificielle de Goa.
- île flottante: avant leur immersion.

Aussi n'est-il pas étonnant que ce procédé, très intéressant par les facilités de la construction des éléments modulaires à terre se développe rapidement dans l'engineering off-shore à des fins multiples:

- Caissons-jetée ( Gênes, Monaco, Fos)
- Nouvelle écluse du port de Boulogne.
- Usines maréotrices sur la mer Blanche.

L'utilisation de caissons creux à des fins d'activités humaines - habitat, activités industrielles etc. est de plus en plus envisagée.

Toutes les considérations générales développées dans les précédents chapitres et intéressant le fond, l'environnement, l'engineering, peuvent être développées de manière identique.

Il y a cependant à souligner l'importance que joue dans une telle conception le nivellement parfait du fond marin, toute déféctuosité dans ce travail pouvant être à l'origine de tensions internes importantes de la structure, pouvant conduire au bris de la plateforme.

Un fond souple (sable ou vase à portance élevée) pourrait être la solution idéale, car sans nivellement il permettrait d'asseoir, dans la souille faite par la pose au fond la structure dont on pourrait commander le taux de pression par simple ballastage.

FIGURE 39.

Coupe verticale de la tour de stockage  
d'EKOFISK en Mer du Nord.

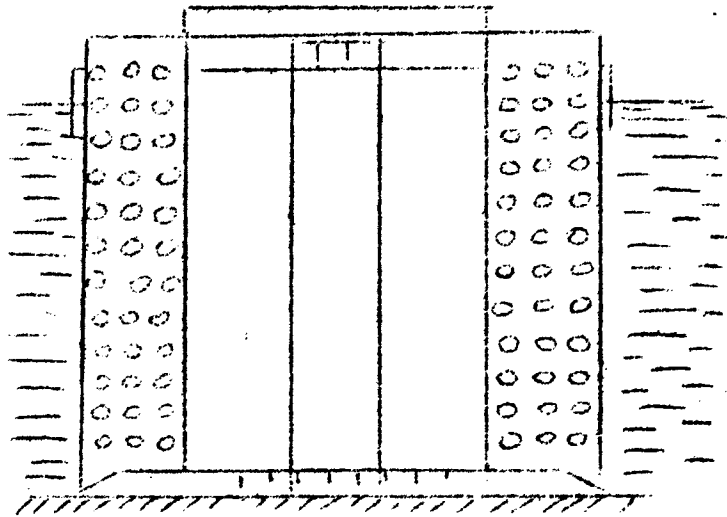


FIGURE 40

Coupe horizontale de la tour.

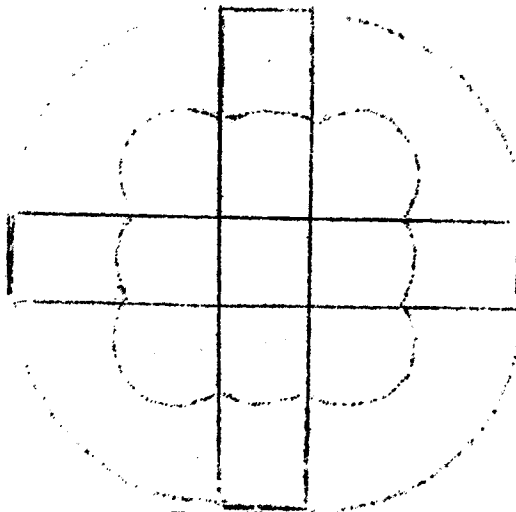
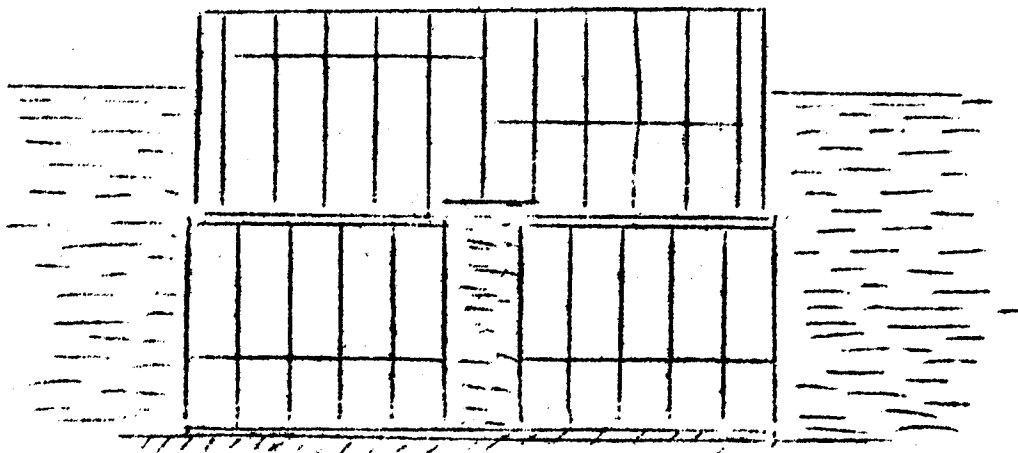


FIGURE 41.

Ile Artificielle CITRA.  
Cou



III ème PARTIE.

ELEMENTS COMPARTIFS ET COMMUNS AUX DIVERS TYPES  
D'ILES ARTIFICIELLES.

XI. AVANTAGES ET DEFAUTS DES DIFFERENTS TYPES  
D'ILES ARTIFICIELLES.

Type.	Avantages	Inconvénients.
<u>REMBLAI</u>	<p>Techniques connues même pour des profondeurs importantes.</p> <p>Protection aisée et efficace contre l'action des éléments.</p> <p>Sécurité maximale sur fonds moyens.</p> <p>Moyens logistiques et matériels existants pour la réalisation de grandes superficies.</p> <p>Peu sensible aux chocs et collisions.</p>	<p>Destruction totale de l'environnement et de la vie marine sur toute la superficie de l'île et sur un grand rayon aux alentours, surtout pendant la période des travaux qui peuvent durer plusieurs années.</p> <p>Modification possible de l'environnement marin sur un grand rayon aux alentours.</p> <p>Moyennement tributaire de la qualité du fond marin; sur de mauvais fonds et avec de mauvais remblais, dégradations sérieuses à craindre par suite de tassements importants et durables.</p> <p>Sensible aux secousses sismiques ( failles et glissement de remblai )</p>
<u>POLDER.</u>	<p>Techniques connues mais encore peu affirmées en mer sur des fonds importants.</p> <p>Moyens logistiques et matériels existants pour la réalisation de grandes superficies.</p>	<p>Destruction totale de la vie marine sur toute sa superficie et sur un grand rayon aux alentours, surtout pendant la période des travaux.</p> <p>Modification possible de l'environnement marin sur un grand rayon aux alentours.</p> <p>Tributaire de la qualité du fond marin, dont l'excellente qualité est nécessaire à la bonne tenue de l'ouvrage.</p>

Type	Avantages	Inconvénients.
<p><u>POLDER.</u> (suite)</p>		<p>Extension quasi-impossible. Fiabilité totale incertaine. Conséquences catastrophiques d'une rupture ou d'une faille de la digue. Très sensible aux secousses sismiques et aux chocs violents.</p>
<p><u>PILIER.</u></p>	<p>Techniques connues pour des fonds peu importants et de faibles surfaces, aisées à mettre au point pour des profondeurs de l'ordre de 100 m.  Extension aisée. Ne modifie pas la courantologie.</p>	<p>Destruction partielle de la vie marine, mais amélioration possible par la suite. Tributaire de la qualité du fond, dont la qualité conditionne la faisabilité et le coût. Sensible aux tremblements de terre et aux chocs. Moyens logistiques à développer pour la réalisation de grandes superficies.</p>
<p><u>FLOTTANT</u></p>	<p>Techniques connues pour des surfaces moyennes, aisées à mettre au point pour de plus grandes. N'influence pas fortement la courantologie. Ne détruit pas la vie marine, surtout si le rayonnement solaire peut être diffusé sous la plateforme. Extension aisée. Peu sensible aux secousses sismiques. Indépendant de la qualité du fond.</p>	<p>Engineering à affirmer dans - la construction des éléments modulaires en grande série. - l'assemblage de grandes superficies. - le positionnement. - la protection contre l'action des éléments.  Mise en oeuvre de moyens logistiques importants à créer. Sensible aux chocs</p>

Type	Avantages	Inconvénients.
<u>CAISSONS.</u>	Techniques connues, à mettre au point pour l'immersion par grands fonds. Extension aisée. Fiabilité importante	Détruit la vie marine sur toute la surface de l'île Modification possible de l'environnement marin sur un grand rayon aux alentours. Tributaire de la qualité du fond dont la portance conditionne la faisabilité et le coût. Engineering à affirmer pour de grandes superficies et des profondeurs importantes. Moyens logistiques à créer pour la réalisation économique de grandes superficies.

## XII. COUTS COMPARES DES DIFFERENTS TYPES D'ILES ARTIFICIELLES.

Il est très délicat de vouloir comparer les coûts de construction d'îles artificielles de types différents car de trop nombreux facteurs interviennent dans le calcul de ces coûts.

Les fourchettes très larges, données par les devis estimatifs des projets étudiés à ce jour le démontrent.

Ces estimations sont en effet les suivantes:

Ile-polder de 25.000 à 375.000 frs. l'hectare.

Ile-remblai de 100.000 à 2.500.000 frs. -

Ile-piliers de 5.000.000 à 25.000.000 frs -

Ile-flottante de 2.500.000 à 50.000.000 frs -

Ile-caisson : trop variable avec la profondeur.

On ne peut rien déduire de ces estimations, car la profondeur et le fond marin sont deux facteurs qui influencent tellement le coût que l'on ne peut comparer des coûts de surface que toutes choses égales d'ailleurs.



121. Prix comparatifs I.I.T.

L'I.I.T. Research Institute de Chicago a fait une étude comparative des couts d'un aéroport à implanter sur le lac Michigan, au large de Chicago, en fonction des diverses conceptions qui ont été envisagées par les Sociétés d'études ayant participé au projet.

Certaines hypothèses de base ont été retenues, à savoir:

- Cout de l'hectare terrestre 50.000 francs.
- Cout de l'hectare flottant 5.500.000 =
- Cout de l'hectare sur pilier 4.650.000 =
- Hauteur de la digue-polder 20 à 30 mètres.
- Hauteur du remblayage 3 mètres.

Le tableau des couts comparatifs se présente comme suit:

Tableau 42. (Millions de francs.)

	Cout Terrain	Cout en mer	Cout études, batiments et parkings et pistes	Total
Aéroport à terre.	200		780	980
Remblai		130	780	910
Polder		1.410	880	2.290
Pilier		1.500	250	1.950
Flottant		1.735	275	2.010

Ce tableau comparatif, voulant comparer des aérodrômes sur un plan fonctionnel, ne compare pas des surfaces égales.

Celles-ci sont en effet de:

- 4.000 hectares pour l'aérodrome terrestre
- 3.200 hectares - - polder
- 320 hectares pour les autres types .

Les éléments de comparaison ont donc été faussés au départ.

En reprenant le même principe de calculs et en ne tenant compte que des coûts réels de construction de la structure nue, sans frais d'engineering, on trouve les coûts suivants:

-	Aéroport terrestre de 3.200 hect.	160 Millions	
-	- polder	- - 1.410	-
-	- remblai	- - 1.300	-
-	- piliers	- 15.000	-
-	- flottant	- - 17.350	-

La variation de ces coûts a été étudiée en fonction de la profondeur du site.

Les résultats en sont matérialisés par le graphique 43.

On voit que la solution remblai n'est intéressante que jusqu'à 6 mètres de fond, la solution polder est la moins coûteuse de 6 à 30 mètres, puis elle est détronée par la solution flottante.

En faisant intervenir le coût de la plateforme Seadmac de Harris et Sutherland on voit tout l'intérêt de la structure flottante de loin la moins coûteuse à partir de 20 mètres de fond; à noter que cette solution est également intéressante pour un coût de terrain terrestre de l'ordre de 250.000 francs l'hectare.

#### 122. Etude comparative de coûts de centrales nucléaires en mer.

Une autre étude comparative a été menée par le Centre Nucléaire d'Oak Ridge pour la construction d'une centrale nucléaire

- à terre
- sur île en remblai
- sur île flottante
- sur caisson solidaire du fond.

Les conclusions de cette étude sont résumées dans le tableau suivant:

PLANCHE 43.

Graphique donnant la variation des couts d'une ile artificielle de 3.200 hectares en fonction du type d'ile et de la profondeur du site.

000000000000

Cout de l'hectare  
en million  
de francs.

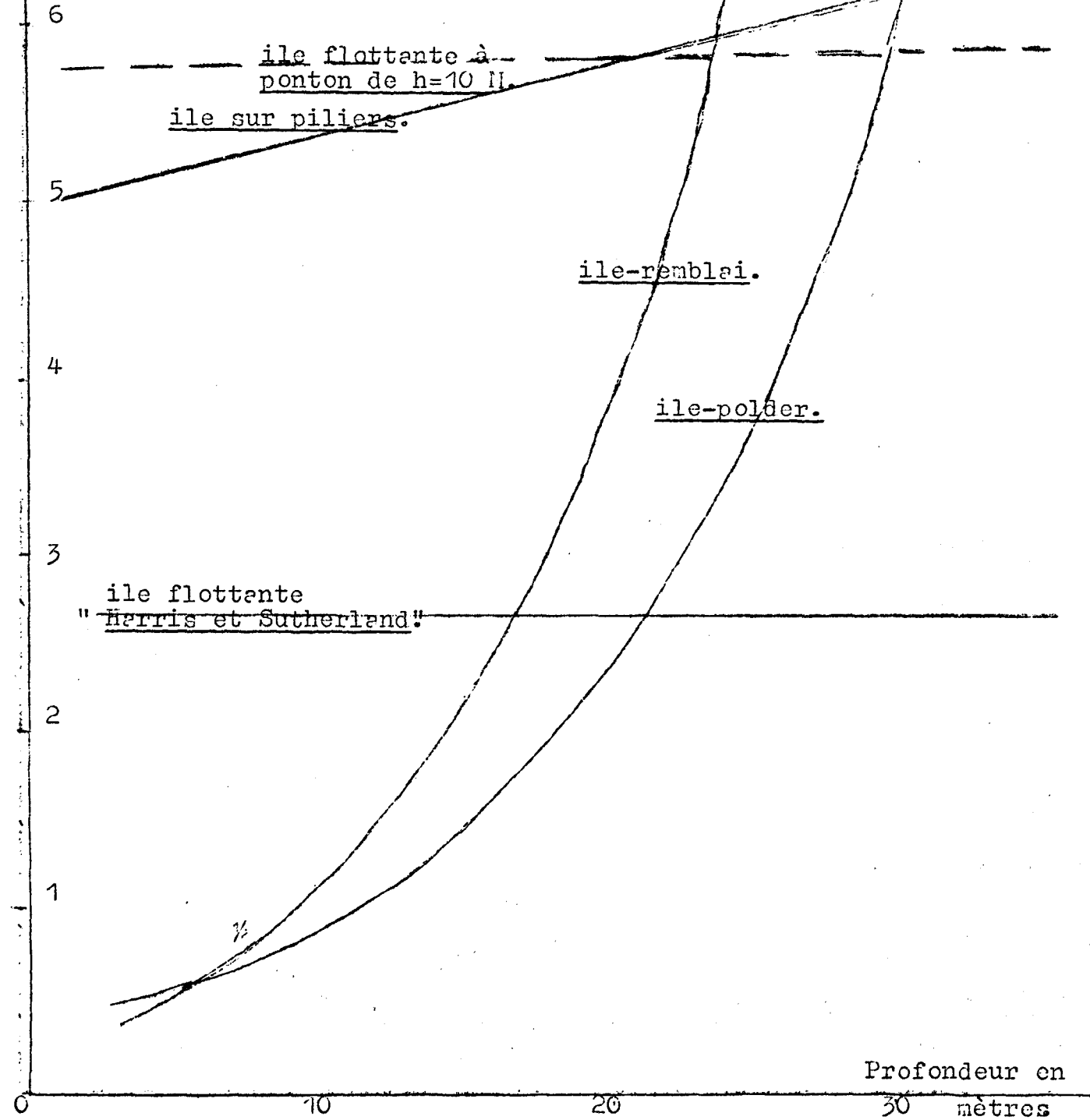


Tableau 4.

Coûts comparés d'une centrale nucléaire ( Millions/francs)

Eléments	Terre	Ile Remblai	Caisson/ 20 m fond	Caisson/ 60m.fond	Ile flottante
Terrain	70	3,5	3,5	3,5	3,5
Préparation sol.	53,5	29	-	-	-
Construct. Réacteur et Centrale.	27,5	24	130	153	76,5
Prise eau de mer	38	5,5	5,5	5,5	5,5
Canalisat. eau.		12,	12,5	15	15
Conduite de force électrique		17,5	17,5	17,5	17,5
Ancrage					25,5
Travaux en mer		85	75	75	75
<b>Total</b>	<b>189</b>	<b>177</b>	<b>244</b>	<b>269,5</b>	<b>218,5</b>

Ce tableau montre que des 4 solutions en mer:

- la solution en remblai sur un fond de 20 mètres est plus économique que la solution terrestre et que toutes les autres solutions off-shore.

- la solution ile flottante, la seule possible sur un site de grande profondeur, devient moins coûteuse que la solution terrestre, si le coût de 1 hectare terrestre augmente de 40 % et a l'avantage d'assurer une protection anti-sismique.

123. Comparaison des coûts de l'aérodrome de Londres.

Pour la réalisation du futur troisième Aéroport International de Londres quatre projets avaient été étudiés, deux terrestres, un en remblai et un flottant

Les seuls coûts d'aménagement du sol pour les trois premiers projets étaient de

420 - 750 - 900 millions de francs.

Le coût de la structure flottante Seadrone, prête à l'emploi comme pistes et taxiways, n'était que de 890 millions de francs.



ETUDES.

- 12. Avant-Projet.
- 13. Projet définitif.
- 14. Etude Financière.
- + 15. Programmation de la réalisation. - *délais* -

Informations intéressant la technique.

- + 16. Sources de remblais terrestre et hydraulique.
  - + 17. Méthodes d'extraction, de transport et de mise en place des remblais.
  - + 18. Matériaux à prévoir pour la réalisation totale de l'île.
    - Blocs de pierre.
    - Tetrapodes etc..
  - + 19. Transport de ces matériaux.
  - 20. Préconsolidation du fond. Sa localisation.
  - + 21. Protection à prévoir. Son calcul. *digue*
  - 22 Construction d'un polder : la digue.
  - + 23 Charge de la structure.
  - + 24 Consolidation du sol
  - 25 Assèchement.
  - 26 Drainage.
  - + 28 Construction de piliers ou de caissons
  - 29 Charges des piliers .
  - 30 Construction de la super-structure.
- sur un jet .*
- Chantier.
- + 31. Moyens à mettre en place.
  - + 32. Problèmes logistiques à résoudre.

Problèmes divers.

- 32. Positionnement.
- + 33. Protection de l'île contre l'action des éléments
- 34. Extensions à prévoir. *ferme à l'implantation*
- + 35. Stabilité de la structure pendant la construction.
- 36. Paras des tassements.
- + 37. Problèmes de sécurité et d'entretien.
  - Corrosion.
  - Feu.
  - Collision.
  - Explosions.

Phase active de construction.

- 38. Planification et rythme de travail.
- 39. Vie du chantier.
- + 40. Liaisons avec la terre.

— 41. Alimentation de l'île en fluides divers:

- eau douce.
- électricité.
- fuel-oil.
- énergie diverse.

Problèmes écologiques.

- 42. Etat de la pollution de la mer avant toute construction.
- + 43. Effets sur la vie marine.
- 44. Effet sur l'environnement aux diverses phases de la vie de l'île.
- + 45. Esthétique de l'île.

Problèmes juridiques et légaux.

- + 46. Droits de propriété légale.

Problèmes financiers.

*actuelle ←*

- 47. Coût de la construction.
- 48. Coût des études.
- 49. Coûts d'entretien.
- 50. Sources de financement et rentabilité.

Ce check-list non exhaustif de tous les problèmes afférents à la création d'une île artificielle montre toute leur complexité et souligne la nécessité de la désignation d'un maître-d'oeuvre.

XIV. Liaison des îles artificielles avec la terre.

Ce check-list souligne à diverses reprises l'attention qui doit être portée aux problèmes d'accès, de transports et d'alimentation de l'île en produits les plus divers.

Le problème des accès à une île artificielle est un problème majeur; des liaisons aisées conditionnent son existence, la rentabilité de sa construction et des activités futures de l'île.

C'est ainsi que dans le cas d'un aérodrôme en mer, qui est un centre d'activités humaines en étroite liaison avec la région terrestre qu'il dessert, on ne peut concevoir une étude de l'île-support sans celle des moyens de liaison terrestres, maritimes et aériens constants et rapides, permettant aux voyageurs de ne pas perdre un temps précieux avant ou après leur vol.

Certes le problème ne se posera pas de la même manière pour une île artificielle éloignée de la côte, où les activités humaines ne dépendraient pas totalement des terrestres, mais où subsisteraient cependant des problèmes d'importation et d'exportation.

Les liaisons avec une île artificielle peuvent être assurées de la terre par:

- des ponts
- des chaussées sur digue ou structures flottantes.
- des tunnels sous-marins.
- des moyens maritimes :
  - navires traditionnels;
  - navires R-R.
  - bateaux sur coussin d'air hydroptères-hydrofoil.
- des moyens aériens:
  - hélicoptères
  - avions STOL ou VTOL
- des pipe-lines
- des moyens les plus divers:
  - téléphériques
  - monorail suspendu etc..

Les moyens choisis seront fonction des caractéristiques de l'île ( situation géographique - rôle économique etc..) et des impératifs logistiques.

Une connaissance parfaite des caractéristiques des moyens de transport à mettre en oeuvre, de leurs possibilités, de leur coût et de leur rentabilité conditionne bien souvent l'existence d'une île artificielle.

Aussi l'étude approfondie de ces moyens est-elle primordiale.

La connaissance des coûts unitaires des moyens de liaison serait intéressante pour une estimation sommaire du coût total de l'île.

Sous toutes réserves, les éléments suivants peuvent être utilisés:

#### Ponts.

Une statistique intéressante Américaine permet de fixer un ordre de grandeur du coût moyen du mètre carré de pont.

Ce coût varie de :

pont acier	- 1.100 à 1.500 francs
pont béton	900 à 1.300 -
pont précontraint	1.200 à 1.400

pour des hauteurs de pont variant de 10 mètres à 50 m.

Le nouveau pont de Lavera desservant le port de Fos a un coût unitaire de l'ordre de 2.000 francs le mètre carré



Tunnel sous-marin.

Le cout kilométrique d'un tel tunnel est fonction du fond, de la profondeur du site et de la longueur de la liaison.

Au Etats-Unis ce cout varie de:

- 30 à 90 millions de frs. pour un tunnel terrestre
- 120 à 200 millions de francs pour un tunnel ferroviaire.

Au Japon le tunnel de Honshu-Kyushu, construit en 1958 et d'une longueur de 3 kilomètres est revenu à près de 200 millions de francs actuels le kilomètre.

En Europe:

- tunnel sous le Vieux-Port de Marseille:  
100 millions de francs/kilm. ( L = 300 m.)
- tunnel sous l'Escaut à Anvers:  
60 millions Frs/Klm. ( 600 m.)
- tunnel d'Amsterdam  
60 millions/Klm. ( 1 klm.2 )
- tunnel de Ijsel Meer (Hollande)  
70 millions de frs/Klm. ( 2 klm.5 )

Monorail.

6 à 18 millions le kilomètre.

Voie de chemin de fer.

1.500.000 à 7.500.000 de francs le kilomètre

Hovercraft.

Cout unitaire:

- 15 passagers; 1 million de francs
- 500 passagers; 20 millions de francs.

Liaisons aériennes.

Cout horaire d'un avion STOL 250 à 450 francs ( 10 passagers)  
- - - hélicoptère 1.600 frs. ( 25 passagers)

Quels que soient les moyens mis en oeuvre, il est nécessaire de prévoir dans la construction d'une grande île artificielle un port d'accès sûr pour l'accostage aisé des navires par tout temps.

## XV. CONSIDERATIONS ECOLOGIQUES.

Toute réalisation artificielle, créée par l'homme à la surface du globe terrestre, conduit à des bouleversements écologiques, qui modifient d'une manière plus ou moins profonde notre environnement

Quel sera l'impact de telles réalisations en mer sur l'environnement marin et aérien?

Telle est la question que doivent se poser les maîtres d'oeuvre, car le développement des îles artificielles peut avoir des impacts qu'il importe de minimiser.

Ces bouleversements sont de natures diverses et touchent plusieurs domaines, en particulier:

- la pollution.
- l'écologie marine.
- la vie en mer.

### 151. La pollution marine.

La pollution de la mer doit être la hantise des créateurs d'îles artificielles.

C'est déjà aujourd'hui une question angoissante et vitale pour l'humanité, qui depuis des millénaires n'a jamais cessé de déverser tous ses déchets dans la mer, considérée comme une poubelle naturelle.

En attendant qu'un remède soit apporté à cet état de fait, il importe que le développement des îles artificielles n'accroisse le degré de pollution actuelle.

Le seul moyen d'y parvenir est que tous les produits retournant à la mer soient dépollués totalement, ce qui entraîne une conception radicalement nouvelle du traitement des déchets - ordures ménagères, déchets industriels, eaux vannes, eaux industrielles etc...

Terres nouvelles, les îles artificielles peuvent être pensées dès l'élaboration de leur projet pour abriter en leur sein - remblai ou caissons flottants - les centrales de traitement et tous les circuits et canalisations nécessaires à des traitements en véritables circuits fermés, qu'il est impossible de prévoir dans le sol des cités vétustes sans bouleversement du sol et opérations fort coûteuses.

152. La pollution de l'air.

La pollution de l'air dans les grandes cités industrielles modernes sera une des causes majeures de la création d'îles artificielles, support d'industries ou d'aéro-dromes, au large des côtes.

Si aucune précaution et disposition préventive ne sont prises contre la pollution de l'air sur une future île artificielle, il est certain que le problème ne sera que déplacé et que les côtes seront soumises sous l'influence des vents du large à des attaques polluantes dont la nocivité sera certaine.

Aussi le traitement des émissions gazeuse et de vapeurs dans l'air devra-t-il être poussé au même degré que celui des rejets liquides ou solides et dans le même esprit d'un traitement total.

153. La pollution thermique.

La pollution thermique de la mer sera également à étudier de très près car une élévation de quelques degrés de l'eau de mer peut avoir des conséquences néfastes pour sa faune et sa flore.

Déjà on s'inquiète de l'accroissement de la température de l'air et des eaux côtières du à la concentration industrielle en cours sur le littoral.

Par ailleurs quel sera l'influence d'une île artificielle sur l'équilibre thermique de la zone marine où elle sera implantée.

Il est certain que cette création sur de grandes sur-faces peut créer une instabilité thermique par diminution du rayonnement solaire reçu en surface.

Les réajustements hydrostatiques en résultant se traduiront par des mouvements de convection marins nouveaux aux conséquences inconnues.

Y aura-t-il danger mortel pour la vie marine ou fertilisation des eaux superficielles par remontée d'eaux profondes, ce qui peut être le cas sous les îles sur piliers ou flottantes; ces dernières seront en effet créatrices de courants descendants, puisque l'eau de mer sous-jacente, recevant moins de chaleur solaire aura tendance à se refroidir, donc à devenir plus dense que l'eau à même profondeur soumise au rayonnement solaire.

154. La pollution acoustique.

L'élévation dangereuse du niveau sonore dans les cités modernes, dans les complexes industriels et autour des aéroports sera également une incitation au développement des îles artificielles, particulièrement des aéroports en mer ou de cités de repos.

Encore faut-il que ces structures nouvelles soient pensées pour que leur implantation minimise l'intensité des bruits perceptibles par les hommes de la terre et dont elles seront à l'origine.

C'est ainsi qu'un aéroport en mer ne devra pas être situé de telle manière que les grands axes de décollage passent sur les agglomérations terrestres qu'il aura à desservir.

La lutte contre le bruit devra être sérieusement étudiée sur les structures creuses en béton, qui peuvent être de véritables boîtes de résonance.

155. Influence sur l'environnement marin.

1551. Modification des courants.

On a vu que l'implantation d'une île artificielle peut bouleverser la nature des courants et la turbulence naturelle à l'interface air-mer.

La vitesse et la direction des courants peuvent en être influencées.

Les conséquences en peuvent être:

- des dépôts de sable sur des fonds inconnus pouvant être un danger pour la navigation (tomolos sous-marin, engorgement de chenaux, etc.)
- des attaques possibles du rivage en de nouveaux points non protégés et des dégradations importantes (Ex. Plage d'Hyères.)
- la dégradation de la flore marine et comme corollaire la disparition de la faune marine.

1552. Le brouillard.

Le brouillard terrestre est causé par le refroidissement de la terre du au rayonnement thermique par nuits claires et calmes.

Dans des conditions identiques, un brouillard insulaire peut naître sur l'île artificielle soumise à un refroidissement plus rapide que la mer.

Quelle sera l'importance de ce phénomène nouveau?

Quelles seront ses répercussions dans la naissance accélérée des brouillards marins dits de convection, naissant par suite de la rencontre de couches d'air marin humide et froid avec des courants marins d'une température élevée que les couches d'air adjacentes.

L'implantation d'une île artificielle sur certains sites marins peut avoir sans aucun doute une influence sur la formation de brouillards et il importe d'étudier ce phénomène, surtout dans le cas de l'implantation d'un aéroport en mer.

### 1553. La turbulence marine.

Les mécanismes créateurs de turbulence marine sont étudiés dans leur cadre naturel et en laboratoire.

Quelle sera l'action d'une île artificielle dans cette turbulence?

Il est certain que des turbulences nouvelles se créeront comme sur une île naturelle, du fait des courants thermiques nés de l'échauffement plus rapide de la plateforme artificielle par rapport à la mer.

Des turbulences nouvelles naîtront également du fait de l'action des vents et des brises marines sur les superstructures extérieures de l'île.

Des vagues d'air de grande amplitude, fonction de la vitesse du vent, de la taille et de la forme de la superstructure, peuvent se former, créant des courants rebattants en certains points de l'île.

Pour de hautes superstructures entourant une île, il est nécessaire d'étudier leur profil aérodynamique.

Les architectes britanniques de la Sea City ont estimé que pour leur réalisation un profil extérieur en S élimine toute turbulence à l'intérieur de l'île.

Un autre phénomène peut prendre naissance, tout particulièrement sur les îles-polders: les couches d'air froid descendantes créent à l'intérieur du polder un véritable lac d'air froid, dont la masse peut dans certaines circonstances atmosphériques devenir agitée et donner des turbulences nouvelles.

La présence d'une telle couche froide est particulièrement dangereuse pour un aéroport situé dans l'île.

Des chocs assez forts peuvent en effet se produire à l'inter-face des couches d'air froid et tiède lors de l'atterrissage d'un avion et provoquer un déséquilibre dangereux à faible altitude.

#### 156. La navigation maritime.

Une île artificielle, obstacle nouveau à la surface de la mer, peut être un danger supplémentaire pour la navigation maritime par le fait

- de l'obstacle qu'elle représente
- des obstacles supplémentaires qu'elle fait naître ( bancs de sable )
- des courants nouveaux pouvant rendre plus délicat la navigation.

Les conséquences maritimes d'une telle implantation doivent être étudiées avec soin, en bassin expérimental d'abord, puis au fur et à mesure de l'avancement des travaux afin d'être connues avec précision par les navigateurs.

Toutes mesures préventives de sécurité devront être prises ( balises-feux etc..)

Les prévisions faites dans ce domaine, basées sur les données océanologiques anciennes, seront constamment améliorées pendant l'avancement des travaux par le recueil permanent de données nouvelles, qui devront être constamment connues par la suite.

#### 157.

Cette rapide énumération des conséquences de l'implantation d'une île artificielle démontre tout l'intérêt d'une parfaite connaissance de l'environnement marin actuel, de la courantologie, de la topographie des fonds et de la côte, des origines et de la dispersion sous l'action des courants et marées de la pollution de la mer.

Dans un bassin de dimensions moyennes l'implantation d'une île artificielle de grande superficie peut avoir des conséquences graves si elles n'ont pas été prévues.

C'est pour cette raison que le check-list de l'engineering doit inciter le maître d'œuvre à se poser des questions telles que :

- Quels seront les rejets quotidiens dus aux activités nouvelles, nées de la création de l'île?
- Comment devront-ils être traités ou dispersés?

- Comment la présence de l'île affectera-t-elle les courants marins et en conséquence la dispersion des objets côtiers ou insulaires?

etc - etc...

Ce n'est qu'en répondant par avance à de telles questions que l'implantation d'îles artificielles ne causera pas à l'environnement marin et à la topographie des côtes des dégradations sérieuses.

Un problème également très important sera celui de l'esthétique des îles artificielles.

La présence d'une île artificielle, visible de la côte, doit contribuer à l'esthétique du paysage, qui fait partie de l'environnement marin.

C'est ce qu'ont très bien compris les créateurs des îles artificielles de Long Beach, dont le caractère esthétique contribue à l'enrichissement du paysage marin visible de la ville.

Il faut souligner que ceci a été réalisé au prix d'investissements supplémentaires fort élevés, 50% du coût de chaque île, coûtant chacune 10 millions de francs.

IV ème PARTIE.

CONCLUSION.



## XVI. Perspectives du développement des îles artificielles.

Les développements des chapitres précédents ne laissent aucun doute sur la faisabilité technique des îles artificielles. Les impératifs économiques ou sociologiques détermineront tôt ou tard leur création.

Il importe d'adopter dès aujourd'hui une attitude prospective basée sur l'existence de telles îles dans dix ou vingt ans.

### 161. Impératifs économiques.

Ils sont de trois ordres:

1°/ Devent l'appauvrissement des ressources terrestres, l'homme a décidé le transfert de nombre de ses activités vers la mer, où savants et ingénieurs oeuvrent pour que ce transfert soit techniquement réalisable.

2°/ Du fait même du rôle de plus en plus important que joue la mer dans le transport des produits pondéreux, la zone côtière devient une aire de transformation de produits actuellement d'origine terrestre, mais qui demain le seront d'origine marine.

3°/ Le progrès incessant des techniques, qui révolutionne les moyens traditionnels jusqu'ici employés par les hommes.

Ces trois faits pousseront au développement des îles artificielles en mer:

- le premier en raison même des lieux d'exploitation et de travail.

Partout où l'homme aura à oeuvrer en mer il n'aura de cesse que de le faire dans les meilleures conditions de production, qui lui imposeront d'être à demeure sur les lieux mêmes de ses activités.

Mr. Cyrus HAMILIN, un des présidents de l'U.S.A. Ocean Research Corporation a dit avec juste raison, voici quelques années:

" Quelles que variées que puissent être les opérations en mer, nées de l'imagination des hommes, un élément commun existe: la base à la surface de la mer à partir de laquelle on pourra opérer"

L'exploitation des gisements pétroliers en mer en offre un premier exemple:

Partant du littoral, l'homme a prospecté systématiquement le fond marin à des distances de plus

en plus grandes et par des profondeurs croissantes.

Dans la phase initiale de la recherche, la plateforme mobile de forage est cette base, aux faibles dimensions.

Le gisement décelé, son exploitation se ramène à de faibles distances de la côte à une exploitation du type terrestre, par le transport des produits extraits par pipe-lines ou tout autres moyens.

Plus on s'éloigne des côtes, plus ce transfert devient difficile et onéreux, d'où les installations en mer, stockages off-shore immergés ou en surface - terminal de chargement de pétroliers etc..

La base en mer va croître d'importance d'année en année, jusqu'à devenir pour de très grandes distances et d'importantes profondeurs une plateforme d'activités humaines multiples couvrant la totalité des opérations - extraction - traitement - utilisation des produits.

Une île artificielle de grandes dimensions où les hommes travailleront et vivront sera alors née.

Les stockages sous-marins du Golfe Persique, le tour de stockage d'Ekofisk, l'utilisation comme îles artificielles de la banquise dans l'Océan Arctique - la cité en mer de Nicphtianye Kanni ( URSS) en donnent la confirmation actuelle, à une échelle encore réduite.

Sur le gisement russe de Nicphtianye Kanni, en mer Caspienne, une cité ouvrière marine de 5.000 personnes s'est édifiée à 100 kilomètres au large de Bakou, préfiguration encore sommaire de ce que sera demain une exploitation pétrolière en mer.

L'extension de l'île de Pulau Bukon à cinq kilomètres au large de Singapour en est un autre exemple: la superficie de cette île a été portée de 60 à 120 hectares, afin de pouvoir y établir plus d'une centaine de réservoirs de stockage de grandes dimensions, une station de traitement des produits et un port pétrolier, permettant l'export annuel de 18 millions de tonnes de produits bruts.

Outre-Rhin, les études de l'Arbeitsgemeinschaft Meerestechnik en vue de créer un ensemble flottant permettant l'extraction et le traitement des nodules déboucheront certainement sur de futures îles artificielles aux dimensions sans cesse croissantes.

L'exploitation des gisements miniers du fond de l'Océan verra un processus identique au processus pétrolier se développer; les bases de travail en mer devront permettre non seulement l'extraction des produits, mais encore leur traitement soit pour des concentrations de minerai, soit pour élaboration de métal pur, d'alliages ou de produits finis.

- L'importance du deuxième fait est soulignée par le rapport de synthèse du thème " Aménagement du Littoral " d'OCEANEXPO 1971, qui rassemble à Bordeaux des centaines d'experts internationaux.

Son rapporteur, Monsieur P. VIANNAY, a bien posé le problème et souligné l'inquiétude commune des congressistes.

" Une première donnée apparaît, la plus fascinante, la plus inquiétante. La zone côtière va devenir, est déjà pour plusieurs pays, le lieu de la vie humaine. Il ne suffit pas de dire que le littoral est un bien rare qu'il convient de ne pas gaspiller, comme on le dirait d'une forêt ou d'une cité historique. Il faut comprendre que sur une bande littorale large de quelques kilomètres, se trouveront dans quelques années, le lieu de travail- service des ports-usines-cultures marines; le lieu d'habitation; les lieux de loisirs; et cela pour beaucoup plus de la moitié de la population. C'est déjà le cas pour l'Amérique, le Japon et l'Europe suit rapidement. Les causes de ce mouvement sont multiples; la cause majeure en paraît être que le lieu des industries de base est désormais la zone portuaire, elle-même lieu d'arrivée des matières à transformer. Si le port n'est rien en soit, il conditionne tout. Quoiqu'il en soit, le mouvement est général, et, autant qu'on puisse le prévoir, irréversible.

.....  
La qualité de la vie elle-même, largement liée aux diverses activités qui permettent la mer et la zone littorale, est très largement menacée en Europe et surtout en France par la priorité donnée aux conditions économiques primaires."

Cette qualité de la vie, si dangereusement menacée est pourtant d'une vitale importance pour les activités de loisir apportées par la mer et pour les conditions de travail, d'habitation et de vie qu'offriront les ensembles nouveaux du littoral..

Aussi le rapporteur concluait-il:

" Le transfert de l'homme vers la mer peut être une chance ou une catastrophe.

Devant cette inquiétude croissante, nombre de voix autorisées estiment que cette nouvelle ceinture côtière surpeuplée et surindustrialisée doit éclater.

Elle doit être reportée à plusieurs kilomètres au delà des côtes.

M. R.P.HAMOND, Directeur du Programme de dessalement nucléaire d'Oak Ridge (USA) en est un des plus ardents défenseurs; il suggère la création d'une ceinture flottante au large des côtes où seraient édifiés tous les complexes agro-industriels, les milliers de centrales nucléaires nécessaires à la production future de l'énergie électrique dans le monde entier, les aérodromes et tous les centres de vie importants.

Nombre de responsables de la distribution de l'énergie électrique aux Etats-Unis s'effrayent également de l'élévation de température qui sera la conséquence sur terre de la construction de centaines de nouvelles centrales électriques.

Pour eux aussi la solution est simple: ces centrales doivent être construites en mer.

Le Gouvernement Japonais devant le manque de ressources foncières et surtout devant l'aggravation de la pollution industrielle dans toutes les îles du Japon, a estimé impérieux d'étudier très sérieusement l'implantation d'îles artificielles, particulièrement flottantes.

Les retombées de la pollution ont en effet atteint au Japon un degré tel que le Gouvernement Japonais, ayant tout d'abord donné priorité absolue à l'industrialisation poussée du Pays, est obligé de s'attaquer à ce problème devant le nombre élevé de cas graves ou mortels, qui ont sensibilisé l'opinion publique Japonaise et mondiale, tout particulièrement lors du Congrès de Stockholm sur l'environnement en Juin 1972.

Aussi est-il vraisemblable que dans la décennie en cours on voit des réalisations matérielles naître en de nombreux points des mers Japonaises.

Un Comité Inter-Ministériel, relevant du Ministère de l'Industrie et du Commerce, composé de personnalités publiques et privées, a été créé fin 1971.

Il doit étudier en particulier cette implantation industrielle sur mer et également la création d'unités énergétiques flottantes utilisant la force motrice des vagues et de la chaleur terrestre.

- Le troisième fait " Le progrès incessant des techniques révolutionnant les moyens traditionnels utilisés jusqu'à ce jour par les hommes " a pour conséquence que bien souvent les surfaces terrestres disponibles ne sont plus à leur échelle.

Des exemples nombreux le démontrent:

Dans le domaine aéronautique:

Depuis une dizaine d'années la congestion des aéro-dromes, déjà existants depuis un demi-siècle, préoccupe les responsables des transports aériens.

Les prévisions de croissance du trafic aérien prouvent que ce dernier croitra de 1970 à 1980 dans dans le rapport 1 à 3 pour les passagers et de 1 à 5 pour le fret lourd.

L'évènement des jets, des super-soniques et des avions géants, rendent de plus en plus inutilisables nombre de grands aérodroes actuels, à moins d'extensions souvent impossibles à réaliser.

Aussi faut-il penser à de nouvelles créations; or un aérodrone international exige au moins 6.000 hectares, surface de plus en plus impossible à trouver à de courtes distances des grandes métropoles.

Seule la mer, encore vierge de toute construction, offre de telles possibilités tout au moins pour les cités portuaires.

Aussi n'est-il pas étonnant que depuis une dizaine d'années, plus d'une centaine de projets d'aérodroes en mer aient été étudiés.

Il n'est, pour en réaliser l'importance que d'énumérer les principaux:

Aérodroes en remblai de New-York ( 4 projets) -  
San Francisco - San Diego - Stratford - Chicago -  
Boston - Cleveland - Oakland - Miami etc...aux USA  
Okinawa - Kagoshima au Japon.  
Foulness - Goodwin en Grande-Bretagne.  
Manille - Sydney - Cam-Ranh - Copenhague - Rio de  
Jeneiro - Toronto - Acapulco - Athènes etc dans le  
reste du monde.

Aérodroes en polder de Chicago - New-york - Rotterdam.

Aérodroes sur piliers de New-York - Chicago - Los  
Angelès - San Diego - New Jersey - San Diego -  
New Orléans - Honolulu etc ..

Aérodromes flottants de New York ( 4 projets ) - San Francisco - Los Angeles - Seattle - Honolulu aux USA. Osaka - Tokyo - Sagami - Haneda - Hiroshima - Setto Nahaï - Misaki - etc au Japon.

Il n'est pas exclu de penser que sous peu un tel aérodrome naîtra en Grande Bretagne d'une part où les études de l'aérodrome remblai de Foulness sont très poussées et aux Etats-Unis où la création d'un aérodrome flottant à New York semble très proche.

#### Dans le domaine maritime:

La conception traditionnelle des installations portuaires est bouleversée par le développement du tonnage des navires qui atteindront et dépasseront 500.000, voire 1.000.000 de tonnes sous peu.

Déjà 2 super-tankers de 480.000 tonnes, construits au Japon, sont mis en service en 1974.

Un super-tanker de 1.000.000 de tonnes est étudié par le Japon et on pense qu'il existera en 1980.

D'aucuns prévoient même des navires de 5.000.000 de tonnes en l'an 2.000.

Les profondeurs moyennes des ports actuels ( 12 à 15 m. ) ne permettent plus l'accès en lourd des navires de 200.000 tonnes; seul le port de FOS-MARSEILLE, avec des fonds de 50 mètres aisément aménageables pourra recevoir les navires de 1.000.000 de tonnes.

Aussi se préoccupe-t-on, surtout aux USA, de repenser totalement les installations portuaires en fonction de ces critères nouveaux; des ports en eau profonde de 50 mètres sont à l'étude.

Les techniques portuaires actuelles valables pour des fonds de 20 à 25 mètres seront d'une application difficile et coûteuse pour des profondeurs supérieures.

Il est vraisemblable que les infrastructures flottantes ou immergées seront alors d'une application courante par des fonds de 50 à 100 mètres.

#### Dans le domaine nucléaire:

Mr. H. P. HAMOND, Directeur du laboratoire de dessalement nucléaire d'Oak Ridge, estime qu'à l'âge nucléaire, qui n'est encore qu'à sa naissance, mais qui durera quand toutes les sources d'énergie terrestres ne seront plus exploitables ou rentables, plusieurs milliers de centrales nucléaires de 4.000 MW. seront implantées dans le monde.

Ces centrales seront construites principalement sur mer ou sur des lacs, par des fonds de 400 mètres environ,

afin de pouvoir disposer aisément d'une eau froide en permanence, garant d'un excellent rendement thermique de l'installation.

Les raisons de sécurité renforceront cette tendance.

Ces idées commencent d'ailleurs à prendre corps:

En Juin 1971, les sociétés Américaines Westinghouse et Tenneco ont développé un projet commun de construction de 4 centrales nucléaires flottantes.

Le cout total des 4 centrales est estimé à 1 milliard de francs.

Ces 4 centrales seront terminées en 1979 et développeront chacune 1.200 MW.

Les plateformes carrées, de 130 mètres de côté, auront un déplacement de 150.000 tonnes, un tirant d'eau de 10 mètres et, complètement achevées et équipées, pourront être remorqués vers tous les états à frontières maritimes, qui auront été acheteurs.

Les responsables estiment que:

- l'étude des marchés en cours donnera le marché potentiel et les sites possibles.

- les délais de construction habituels seront réduits de 1 à 2 ans du fait de la construction en série de 4.

- les dangers des effets thermiques seront moindres en mer que sur terre.

- le cout d'acquisition des terrains ne sera plus un obstacle au développement de plans d'implantations industrielles de grande envergure, qui pourront s'édifier progressivement autour des centrales.

Dans le même ordre d'idée, une Association internationale, groupant tous les savants héliotechniciens mondiaux, la Coopération Méditerranéenne pour l'Exploitation de l'Energie Solaire (COMPLES) a décidé à son congrès annuel de 1969 d'étudier une telle exploitation sur de grandes surfaces flottantes en des localisations océaniques proches de l'équateur.

Ces bases serviraient principalement comme support d'une agriculture intensive en serres.

Le congrès de 1971 a décidé la poursuite de ces études et en a confié le soin à une commission internationale dont le siège a été fixé à Athènes, où sera établi un laboratoire d'études du projet.

162. Impératifs Sociologiques.

Les nécessités foncières et la recherche d'un cadre de qualité acceptable pour la vie humaine dans les zones portuaires surpeuplées ont incité de nombreux architectes et urbanistes à concevoir l'implantation de cités en mer.

Chaque année voit naître de nombreux projets de jeunes architectes passionnés par une telle prospective.

Parmi les plus importants projets connus à ce jour citons:

- le projet d'extension de Tokio sur sa baie, conçu par l'architecte Japonais Kenzo Tange et son équipe.
- le projet de Hartaut Thilmel pour Rio de Janeiro.
- le projet de l'architecte Français E. Hubert pour Tokio.
- le projet 'Hydrobiopolis' de construction d'une ville marine de 20.000 habitants à 1 kilomètre au large de La Haye par les architectes Hollandais E. et L. Hartsuyker.
- le projet Ocean City de la Living Sea Corporation du Commandant Cousteau.
- le projet Novenoah B de Paolo Soleris.
- le projet de Monaco de l'architecte Français P. Maymont.
- le projet Vantansu d'extension de la ville d'Helsinki en Finlande sur la rivière Vantaa.
- le projet Triton City, étudié en 1968 à la demande du Ministère du Logement Américain par B. Fuller et son équipe; ce projet permettrait de créer des villes flottantes de 20 à 30.000 habitants.
- le projet Sea-City étudié en 1970 en Grande Bretagne par le Comité du Développement de la Civilisation du Verre, patronné par Pilkington; ce projet prévoit la construction en mer du Nord de villes, érigées sur piliers, de 20 à 225.000 habitants.



D'autres projets encore plus grandioses sont élaborés:

Les architectes futurologistes Paolo Soleri, Kiyonori Kikutake et Buckminster Fuller pensent que la préservation de l'environnement terrestre ne peut être résolu que par des habitats de très haute densité d'occupation, particulièrement bien étudiés pour satisfaire tous les besoins des habitants.

Aussi envisagent-ils dans les régions côtières un abandon quasi-total des habitations terrestres pour des cités marines où se développerait une vie urbaine et parfaitement reliées à la terre qui trouverait sa mission originelle et naturelle.

Certes leurs projets relèvent du fantastique; les structures flottantes s'étendraient sur des superficies de 200 kilomètres carrés permettant à 10 à 15 millions d'hommes d'y vivre.

Ces cités s'élèveraient à de très grandes hauteurs au dessus de la mer; 3.000 mètres pour la cité de B.Fuller.

Quoique l'on puisse penser ces projets sont peut être une préfiguration du monde de demain qui posera de tels impératifs sociologiques que ces solutions, utopiques de nos jours à bien des hommes, seront demain les seules valables.

En effet l'impossibilité de loger des milliards d'êtres humains à terre, le souci et la nécessité d'améliorer l'environnement terrestre seront alors primordiaux.

Dans de telles structures nouvelles en mer les urbanistes ont toutes libertés pour développer leurs idées les plus modernes sur la vie dans la cité et donner cours à leur riche imagination.

C'est d'ailleurs cette raison qui a présidé à la conception des projets pré-cités où dans des mégapoles marines il était plus facile d'étudier et de réaliser un cadre de vie parfait avec un confort qu'aucun ensemble collectif terrestre ne peut assurer à leurs yeux.

Certains sociologues ont même souligné l'intérêt pour l'homme de la cité en mer.

Il est en effet pour un grand nombre d'humains un plaisir véritable de vivre en bordure de mer dans des habitations agréables les protégeant de tous les défauts de l'environnement marin.

Dans certaines contées ce plaisir ne peut être aujourd'hui que celui d'une classe privilégiée au standing aisé.

En donnant ce plaisir à des classes plus modestes, ces sociologues pensent contribuer à une meilleure joie de vivre de l'humanité.

Certains architectes avancent de plus que les cités flottantes apporteront aux vieilles cités portuaires la solution à leurs problèmes actuels d'urbanisme, impossible à résoudre dans le cadre foncier actuel.

On peut en effet concevoir le relogement de tout un quartier, dont la restructuration complète s'impose, dans une cité flottante, véritable quartier de remplacement pouvant servir en se déplaçant le long de la côte à plusieurs restructurations successives

En contre-partie il est indéniable que les aspects sociologiques de la vie humaine sur de telles structures artificielles en mer devront être étudiés avec soin tant leur incidence sur l'homme pourrait amener des maux communautaires encore plus importants que dans les grands ensembles terrestres.

#### XVII. CONSIDERATIONS JURIDIQUES.

Si le projet sur la Décennie des océans voté par les Nations Unies le 21 Décembre 1968 cherche à embrasser l'ensemble du domaine océanique, il n'en est pas moins vrai que toute l'attention de l'O.N.U. a porté sur le fond des océans, son exploration et son exploitation pour le bien de l'humanité entière ou au profit des Nations riveraines.

Aucune mention n'a encore été faite des îles artificielles qui surgissent au niveau zéro d'une mer, jusqu'ici " Res Nullius " seront encore jusqu'à nouvelle décision propriété de la Nation riveraine à l'intérieur de ses eaux territoriales ou propriété du premier occupant hors de ces eaux.

Il apparaît de plus en plus évident que les îles artificielles surgiront en nombre de plus en plus élevé au large de nombreuses côtes; aussi importe-t-il d'étudier très rapidement ce problème sous ses aspects juridiques et législatifs.

Dans les eaux territoriales

la mer est un domaine maritime public.

Qui aura possibilité de créer une île artificielle?

Qui en sera propriétaire?

Quelles formalités devront être accomplies?

La réponse sera aisée pour des structures artificielles relevant du domaine public: aérodrômes- routes- etc..

Elle le sera moins pour des marinas, îles de loisirs- îles de recherche etc...

Y aura-t-il création de nouvelle commune ou rattachement à une commune riveraine.

Quelle sera cette commune riveraine?

Faudra-t-il prolonger les communes sur mer et délimiter exactement leurs droits?

Les problèmes se poseront en effet fort nombreux; toutes ces créations artificielles seront la base d'activités nouvelles, qui donneront naissance à des taxes et droits divers: impôts locaux, patentes, T.V.A. etc...

Quel sera le département ou la commune qui bénéficiera de ces ressources nouvelles?

A une échelle nationale se poseront les mêmes problèmes qui se posent aux Nations Unies pour l'exploitation du fond des océans.

& Long Beach, le problème semble avoir été résolu par le fait même que la cité de Long Beach est propriétaire et promoteur des gisements pétroliers off-shore.

Hors des eaux territoriales

quels seront les régimes juridiques internationaux qui s'appliqueront aux îles artificielles, nées de la volonté d'hommes qui bien souvent appartiendront à des nations différentes des nations riveraines intéressées.

Si les îles artificielles non-flottantes, peuvent relever de la législation intéressant le plateau continental, auquel elles seront directement attachées, qu'en sera-t-il des îles flottantes: navires ou îles?

L'existence de ces dernières peut remettre en cause la notion de la liberté des mers, de la navigation et du droit maritime.

Tous ces problèmes n'ont encore jamais été posés d'une manière précise; ils demandent à l'être très rapidement, si l'on ne veut pas voir surgir des îles pirates établies à des fins commerciales ou publicitaires.

XVIII. RECOMMANDATIONS EN VUE D'ETUDES DETAILLEES.

Peut-on penser encore que les îles artificielles soient une utopie, alors que l'on assiste à un bouillonnement de plus en plus extraordinaire d'idées nouvelles et que des mini-réalisations laissent prévoir l'éclosion rapide de réalisations importantes dans la décennie actuelle.

Un marché d'avenir d'un potentiel extraordinaire est en train de naître; il se développe très rapidement à une allure telle que les nations qui ne s'y prépareront pas dès aujourd'hui, en seront à jamais écartées.

Des nations forgent déjà les outils indispensables à cette conquête.

Dans les domaines des îles-remblai et des îles-polders, la Hollande développe de plus en plus son potentiel matériel de dragage et ses techniques pour maintenir et développer sa suprématie mondiale actuelle.

Le dragage veut devenir une science; pour la première fois en Hollande, l'Etat et les six plus grandes compagnies de dragage mènent avec le concours du Laboratoire Hydraulique de Delft, des études communes afin de faire avancer cette science.

Le laboratoire de Delft se développe afin de se poser en numéro un mondial.

Déjà des dragues d'un potentiel d'extraction de 2 millions de mètres cubes/ mois sont en action; d'autres encore plus puissantes sont étudiées et prêtes à être construites dès que le besoin s'en fera sentir, en vue surtout de gagner les marchés prochains que seront les aérodrômes internationaux en remblai qui seront créés en bordure de la Mer du Nord:

- l'Aérodrome de Londres à l'embouchure de la Tamise.
- l'aérodrome de Copenhague.
- l'aérodrome de Rotterdam sur la mer du Nord ou d'Amsterdam dans le Zuyder-See.

Les Hollandais veulent par leur maîtrise totale de la connaissance du sous-sol marin et d'une technique des sols marins aussi développée que celle des sols terrestres ainsi que par celle de la construction des ouvrages en mer, montrer qu'ils sont

et seront de plus en plus les grands spécialistes Européens dans ce domaine.

Certes dans le domaine des îles sur piliers, des îles flottantes et des îles caissons, de très nombreux projets ont déjà été étudiés par les Américains, les Britanniques et les Japonais; mais la France peut acquérir une place de premier ordre.

Dans ces domaines, qui relèvent principalement du Génie Civil et des grands travaux maritimes, la technologie est connue et n'est d'ailleurs pas aussi élaborée, spécialisée et délicate que celle de l'engineering pétrolier off-shore; l'Industrie Française et son Ingénierie ont su marquer de leur empreinte nombre de magnifiques réalisations maritimes des plus modernes.

Notre pays n'a aucun retard technique à combler, bien au contraire, que ce soit dans le domaine des plateformes sur piliers métalliques, de stockage immergé ou flottant ou d'îlots-caissons comme le tour d'EKOFISK.

Ces réalisations ne sont cependant qu'à l'échelle de prototypes et notre industrie ne possède pas actuellement le potentiel de matériel nécessaire à la réalisation de structures immenses.

Les Etats-Unis s'y préparent très sérieusement, mais n'ont pas encore le potentiel voulu pour mener à bien la réalisation en mer d'îles de très grandes superficies de ces trois derniers types; du moins ce pays se prépare très fortement à s'équiper dans ce but.

La richesse de leurs bureaux d'études et la sensibilisation faite dans le domaine des structures flottantes en sont un exemple.

Il semblerait souhaitable d'étudier le plus rapidement possible les possibilités d'intervention sur un tel marché, en suivre la gestation et les développements, afin d'être rapidement concurrentiel dans des réalisations d'envergure qui ne toléreront pas l'improvisation, l'emploi de méthodes artisanales et du coup per coup.

Il n'est d'ailleurs pas exclu de penser qu'une telle action pourrait être menée à l'échelle du Marché Commun.

## BIBLIOGRAPHIE.

- J. BLANC. Initiation à la géologie marine.  
CHAPON. Cours de travaux maritimes.  
ROGAN. Comportement des jetées en enrochement vis à vis de la houle.
- SOMMET & VIGNAT. Calcul des efforts de la houle sur une structure semi-immersée.  
HERSENT. Nouveaux types de réservoirs sous-marins immergés.  
TECHNIP. Symposium sur la connaissance de la houle, du vent et des courants pour le calcul des ouvrages pétroliers. Les courants marins.
- J. GONNELLA. La Houille  
Blanche. Les énergies de la mer.  
H. LACOMBE. Cours d'Océanographie Physique.  
Laboratoire  
Hydraulique de Etudes diverses.  
Delft.
- DE BOUSINGEN. Stockages sous-marins.  
H. MARION. Stockage d'Eko Fisk  
HERSENT. Construction de plateforme sur piliers.  
U.S.A. Projets divers de construction d'aérodrômes.
- I I T. Comparaison entre aérodrômes en mer.  
BEN C. GERWICK. Construction of prestressed concrete structures.  
Harris et Sutherland. Seadrome.

### Revue Française, Américaine et Britannique:

Ocean Industry.  
Ocean Engineering.  
Chantiers de France.  
Chimie actualités.  
2.000.  
Build International.  
L'industrie du Pétrole.