Les installations portuaires de Jorf Lasfar (Maroc)

Georges Moguilny

Ingénieur en Chef au Laboratoire Central d'Hydraulique de France

Conditions générales d'exécution des études

Genèse du projet et partition générale des études

Par lettre du 7 Juillet 1973 adressée à Monsieur le Ministre des Travaux Publics et des Communications, Monsieur le Directeur de l'Office Chérifien des Phosphates précisait les objectifs généraux visés à travers la réalisation d'un nouveau port dans la zone centrale du Maroc :

- 1 — Accroissement des exportations de phosphates bruts en cherchant à dégager les ports de Safi et de Casablanca, dont la saturation était prévisible à terme.
- 2 — Installation d'un complexe chimique, en vue de la production pour l'exportation, d'engrais et d'acide phosphorique, et importation des éléments nécessaires à cette industrie.

En ce qui concerne le premier objectif ci-dessus, c'est quelque 20 millions de tonnes de phosphates, issus des centres de production de Khouribga et Youssoufia, qui devaient être exportés en 1973 par les ports de Casablanca et Safi ; et on prévoyait d'en exporter 26 millions de tonnes en 1977. La mise en exploitation prochaine (1977 à 1979) de nouveaux centres de production (Benguerir) destinés à atteindre une capacité de production de 10 millions de tonnes chacun accentuerait encore la progression, permettant d'envisager des exportations de l'ordre de 47 millions de tonnes vers 1987 et de 62 millions de tonnes vers 1992. Dans ces conditions, la saturation des installations actuelles de Casablanca et Safi avec une capacité globale estimée de 30 millions de tonnes de phosphate par an, apparaissait comme effectivement imminente.

En ce qui concerne le second objectif ci-dessus, on

prévoyait d'importer le soufre (nécessaire à la fabrication de l'acide sulfurique, lui-même à la base de la fabrication de l'acide phosphorique) et le chlorure de potassium (base de la fabrication des engrais potassiques) ; toutefois, on envisageait de fabriquer l'ammoniac sur place (par synthèse à partir de l'azote de l'air et de l'hydrogène obtenu par cracking des naphthes contenues dans le pétrole brut). La raffinerie associée à cette industrie aurait une capacité de 10 millions de tonnes de pétrole brut par an.

Enfin, d'autres trafics devaient pouvoir être pris en compte : exportation de pellets de fer et de cuivre (issus du traitement des cendres de pyrothine), exportation de manganèse, de plomb et de zinc, exportation de primeurs. Telles étaient, en gros, les données disponibles à l'époque où le Service des Ports Secondaires lançait les consultations en vue des études d'un nouveau port à vocation industrielle, à créer en site vierge, approximativement dans la région de El-Jadida.

Comme suite à ces consultations, les tâches ont été finalement réparties comme suit :

- il est revenu au B.C.E.O.M. (Bureau Central d'Etudes pour les Equipements d'Outre-Mer), la mission de conception des installations portuaires : études économiques et techniques de définition, esquisses du port, définition des profils types des ouvrages, établissement des coûts estimatifs, constitution du dossier d'appel d'offres aux entreprises ;
- le L.C.H.F. a été fondamentalement chargé des études sur modèles, lui étant également confiées une tâche d'analyse des données naturelles et une reconnaissance sédimentologique des lieux ;
- il était confié au L.P.E.E. (Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes — Maroc) l'exécution des études in situ : hydrographie, courantologie, étude de sol par sismique réflexion (avec la collaboration de la S.E.S.A.M.), reconnaissance des carrières, essentiellement.

Conclusions des études de trafic et des contraintes structurantes — Esquisses de ports

Il convenait de distinguer, d'une part, les trafics assurés ou certains à prévision incertaine, liés aux activités de l'O.C.P., au projet de combinat du B.R.P.M. et à la création d'un hinterland. Ces trafics relèveraient d'un secteur portuaire dit "minéralier".

D'autre part, indépendamment des besoins liés aux installations de l'O.C.P., les besoins internes prévisibles du Maroc en hydrocarbures, et/ou les possibilités offertes par une raffinerie travaillant pour l'exportation, conduisaient à envisager l'édification d'un secteur pétrolier plus ou moins distinct du précédent.

Le tableau I ci-après résume les trafics prévisibles et les besoins en postes à quai correspondants (nombre et tirants d'eau admissibles) en ce qui concerne le port minéralier, à l'horizon 1992.

Figure 1. — Situation du site de Jorf Lasfar par rapport aux gisements de phosphate

Tableau I — Trafic estimé du port minéralier à l'horizon 1992

Produits	Entrées	Sorties	Nombre de postes	Tirant d'eau minimum
Pétrole brut	10 Mt/an		1	15,0 m
Produits de raffinage		7,3 Mt/an	1	10,0 m
Phosphate brut		10 Mt/an	1	15,0 m
Soufre solide	2 Mt/an		1	12,0 m
Soufre liquide	2 Mt/an		1	12,3 m
(Acide sulfurique éventuellement)	(3 t pour 1 t/souf.)		2	11,0 m
Potasse	0,7 Mt/an			12,0 m
Engrais solides		5 Mt/an	1	12,0 m
Acide phosphorique		2,6 Mt/an	2	11,0 m
Ammoniac liquide		0,11 Mt/an	1	10,0 m
Cendres de pyrothine	450 000 t/an		1	7,0 m
Chlorure de calcium	16 000 t/an			
Divers produits chimiques	20 000 t/an			
Pellet de fer		800 000 t/an	1	12,3 m
Cuivre de traitement		10 000 t/an		
Concentré de zinc		64 000 t/an		
Primeurs		70 000 t/an		
Importations diverses	40 000 t/an		2	10,0 m
Total estimé	15,226 Mt/an	25,954 Mt/an		

En ce qui concerne le port dit "pétrolier" dont on peut estimer la capacité à 10 millions de tonnes de pétrole brut par an, il serait essentiellement caractérisé par l'existence de deux ou trois postes pour pétroliers de 200 000 tdw dont le tirant est de l'ordre de 19 m, plus un ou deux autres postes par fonds moindres.

Le choix du site de Jorf Lasfar, pour la construction du complexe industriel et du port, en même temps que pour l'aboutissement du chemin de fer en provenance des gisements de phosphate, avait été très vite formulé par l'Administration Marocaine (voir figure 1).

Le bien-fondé de ce choix a été confirmé par les études technico-économiques qui ont suivi, et qui ont

donné lieu à l'établissement, par le B.C.E.O.M., en tenant compte des sujétions liées aux navires et des conditions d'utilisation du site maritime et du site terrestre, d'un certain nombre d'esquisses de ports répondant de plus aux hypothèses suivantes :

- port minéralier (*) ouvert vers le Sud,
- port minéralier ouvert vers le Nord,
- ports minéralier et pétrolier intégrés,
- port pétrolier totalement indépendant.

Des exemples d'esquisses de solutions sont présentés sur les figures 2a, 2b et 2c.

(*) Port dit également "phosphatier".

Figure 2a. — Port minéralier ouvert au Sud — Port pétrolier nettement séparé.

Figure 2b. — Port minéralier ouvert au Nord — Port pétrolier nettement séparé.

Figure 2c. — Secteurs minéralier et pétrolier réunis en un même port.

Contribution du L.C.H.F. aux études

Dans la contribution du L.C.H.F. à la mise au point du projet du port de Jorf Lasfar, il apparaît, après regroupements mineurs, quatre grandes phases d'études reprises dans l'exposé qui suit :

Phase A : Analyse des données sur les phénomènes naturels

Phase B : Choix du plan-masse

Phase C : Mise au point de l'implantation des ouvrages

Phase D : Définition des spécifications de construction.

Analyses des données sur les phénomènes naturels

(Phase d'étude A)

Compilation des données disponibles

Aussi bien le régime météorologique de l'Atlantique Nord considéré plus particulièrement du point de vue des conditions de création des états de la mer observables aux abords des côtes du Maroc, que la marée et les courants marins, constituaient une série de sujets à examiner sommairement car ceux-ci correspondaient soit à des phénomènes déjà très convenablement connus, soit à des phénomènes jouant un rôle très limité vis-à-vis des problèmes à résoudre. Nous ne les mentionnerons ici que pour mémoire.

Notre attention devait, en fait, être concentrée sur le phénomène de la houle, paramètre central des recherches qui nous étaient confiées.

Le travail de compilation et de synthèse à réaliser devait finalement permettre d'établir les modalités d'extrapolation, au cas de Jorf Lasfar —site vierge—, les données disponibles concernant la côte marocaine ou le large : observations de houle au niveau des principaux ports marocains depuis plus d'un demi siècle (dont une synthèse est présentée dans les Annales du Service de Physique du Globe et de Météorologie), statistiques présentées dans les Atlas destinés à la navigation, campagnes de mesures spécifiques, etc.

C'est ainsi qu'en premier lieu les informations disponibles tendent à montrer que deux natures de houle doivent être distinguées :

- les houles océaniques, de période plutôt longue, susceptibles de couvrir le secteur NW à WSW,
- l'agitation soulevée par le vent local, de courte période, dont une fraction appréciable proviendrait du secteur W à SW.

Il y a lieu de signaler ici la possibilité de la présence simultanée d'une tempête d'origine océanique du secteur W à NW, et d'un clapot du SW accompagné d'un vent effectivement observé du SW. L'impression pour un observateur non averti peut être qu'il assiste à une houle exceptionnelle du SW. En réalité, ce dernier phénomène ne semble pas pouvoir exister compte tenu du régime météorologique de l'Atlantique Nord et du tracé de la côte d'Afrique.

Lors de la recherche, à partir des données existantes, des lois de corrélation directions-amplitudes-périodes, il est apparu, a posteriori, qu'une voie d'investigation féconde pouvait être empruntée, basée sur les propositions suivantes :

1 — Il existe UN régime de houles du grand large, intéressant une certaine longueur de côte (de Mehdià à Safi, pour la présente étude, par exemple), à partir duquel on peut reconstituer les conditions d'approche de la houle aux abords de points d'observation effective de la houle (ports existants, en particulier) ; ce régime peut être convenablement approché par la considération des "Atlas" ou en "remontant" vers le large à partir des données disponibles à la côte.

2 — La considération du régime de houles du large, tel que défini ci-dessus, combinée avec un calcul de réfraction convenablement adapté, permet une définition de la houle en un site vierge d'une façon au moins aussi précise que par simple transposition des données disponibles concernant les ports existants plus ou moins voisins.

Finalement, toutes houles confondues, le niveau des amplitudes significatives observables à Jorf Lasfar s'établirait comme suit :

- houle annuelle (probabilité de dépassement : 0,27 %) :
 - hypothèse faible : 5,25 m
 - hypothèse forte : 7,00 m
- houle décennale (probabilité de dépassement : 0,027 %) :
 - hypothèse faible : 7,60 m
 - hypothèse forte : 9,10 m
- houle cinquantennale (probabilité de dépassement : 0,0054 %) :
 - hypothèse faible : 9,30 m
 - hypothèse forte : 10,60 m.

En ce qui concerne le paramètre que constitue la période, toutes houles confondues, sa valeur moyenne serait de l'ordre de 9 s en été, et de 12 s en hiver.

D'après les observations faites à Casablanca, les périodes seraient égales ou supérieures à 17 secondes dans sensiblement 1 % des cas, et supérieures à 18 secondes dans moins de 0,27 % (soit 1 jour/an).

Toutefois, les agitations d'origine locale présenteraient généralement des périodes faibles, de l'ordre de 6 à 8 secondes.

Epures de réfraction

Objectifs et outil de travail

On a essentiellement cherché à connaître les caractéristiques locales de la houle, d'une part dans les zones particulières où il était envisagé de placer une passe d'entrée, d'autre part le long des ouvrages extérieurs à propos desquels se posait un problème de stabilité.

L'étude de la propagation de la houle par des profondeurs variables a été réalisée au moyen du modèle mathématique nommé RETRO (calcul de Réfraction avec TRacé d'Orthogonales). Celui-ci s'appuie sur une théorie limitée à l'approximation "géométrique" (au sens de l'optique géométrique).

Une épure est définie par une grille de profondeurs et une période de houle. Précisons que la profondeur (h) en tout point courant du plan de l'épure est calculée par la méthode des moindres carrés appliquée aux 4 (ou 9) points connus les plus proches.

Il peut être associé à RETRO un programme particulier destiné à prendre en compte les phénomènes de diffraction lorsque les orthogonales se rapprochent excessivement ou se croisent (focales, caustiques).

Résultats de l'étude

Les cas traités dans les limites de notre étude, au nombre de 12, convraient toute la gamme des circonstances à considérer dans la pratique.

Le résultat essentiel de cette étude réside en la mise en évidence d'un effet de réfraction —chiffré— d'autant plus appréciable que la houle est plus longue.

L'existence des houles de vent —courtes— du Sud-Ouest constituerait à cet égard, un facteur défavorable aux solutions de port ouvert au Sud-Ouest.

Par ailleurs, il a été obtenu une confirmation de l'absence d'effets notables de focalisation ou d'expansion de la houle du secteur Ouest à Nord-Ouest, liés à des accidents plus ou moins visibles du relief.

Reconnaissance sédimentologique

Au Nord d'El-Jadida, il a été trouvé des sables ayant un taux de calcaire moyen de 37 % et contenant des minéraux opaques abondants, ainsi que de l'andalousite et des grenats. Au Sud, on n'a trouvé que des sables presque entièrement coquilliers avec des teneurs en calcaire supérieures à 99 %. Cette situation dénie l'existence d'un transit littoral appréciable entre les deux secteurs considérés et limite les possibilités d'atterrissement dans le port de Jorf Lasfar, de sables provenant de l'Oued Oum-Er-Rbia. Dans l'ensemble, tous les sables de la région du futur port de Jorf Lasfar (et éventuellement du port pétrolier) sont des sables très fins d'une centaine de microns de diamètre moyen. Cet état de choses exclut leur transport par les courants marins seuls et une approche théorique de l'action de la houle sur les fonds montre que les sédiments de fond seront stables la majeure partie du temps.

Finalement, les risques d'ensablement du futur port semblent réduits (quelque 100 000 tonnes/an que nous ne citons que pour montrer les ordres de grandeur en cause).

Par contre, des risques d'envasement appréciables peuvent être attachés au rejet de boues provenant de la laverie de phosphate projetée, les prévisions à ce sujet atteignant 15 millions de tonnes par an.

Choix du plan-masse Utilisation du modèle mathématique de diffraction (Phase d'étude B)

Objectifs et outil de travail

A ce stade des études, il se posait essentiellement le problème du choix de l'orientation de la passe d'entrée

du port phosphatier d'une part, et le problème de l'influence de la présence du port phosphatier sur l'agitation ressentie dans le port pétrolier d'autre part.

Le modèle mathématique spécifique —nommé DIFF 5— mis en œuvre pour répondre à ces questions de principe utilise une méthode classique de calcul de la diffraction d'ondes monochromatiques de surface, au moyen des fonctions de Green.

Dans la pratique, le plan d'eau est divisé en bassins polygonaux convexes, dont les limites correspondent à des contours de quais ou à des "passes" ; les amplitudes de l'agitation sont calculées le long de ces limites, et éventuellement le long de lignes supplémentaires introduites soit pour des raisons d'ordre topologique, soit pour améliorer la connaissance de l'agitation.

Le programme DIFF 5 permet de tenir compte des pouvoirs réfléchissants de toutes les limites des bassins composant le port étudié ; il permet de tenir compte des variations de profondeur, ces dernières étant, en fait, schématisées par la définition de zones de profondeur constante raccordées par des "marches d'escalier" ; il permet aussi de reproduire les phénomènes de réflexion totale.

En ce qui concerne la présentation matérielle des résultats, chaque "essai" donne lieu au tracé automatique d'un graphique sur lequel figurent les indications voulues.

Résultats de l'étude

Etude du port phosphatier

Les schémas de port comportant une passe d'entrée orientée au SW se sont révélés satisfaisants pour tous les cas de houle du secteur Ouest à Nord, et, pour les houles de WSW, dans le cas des houles longues seulement. La

Figure 3. — Agitation dans le port minéralier en présence d'une houle de 8 s.

situation est apparue généralement moins favorable avec les houles courtes du WSW, et non exempte d'inconvénients, encore que très localement, dans le cas des clapots provenant du WSW au SW.

Plusieurs variantes ont été définies dans le cadre de l'optimisation des dispositions du port ou telle ou telle zone du port. Les essais ont en particulier mis en évidence la grande sensibilité de la tranquillité générale du plan d'eau vis-à-vis de la longueur de la jetée.

Les schémas de port comportant une passe orientée vers le Nord ont conduit à des résultats très généralement plus favorables que les précédents (voir figure 3).

Ainsi, en s'en tenant au seul critère de l'agitation soulevée dans le port par les houles susceptibles d'y pénétrer, le classement de l'ensemble des dispositions testées semblait conduire à placer en premier la variante correspondant à une passe d'entrée orientée au Nord. Cette solution aurait, toutefois, présenté des inconvénients parmi lesquels nous citerons :

- difficulté d'extension ultérieure d'un tel port, de par la proximité du port pétrolier devant sa passe d'entrée,
- risque de création de seiches entre les deux secteurs portuaires —phosphatier et pétrolier—,
- danger lié au croisement des navires entrant ou sortant simultanément des deux secteurs portuaires.

Finalement, c'est avec l'hypothèse d'une passe orientée au Sud que les études ont été poursuivies.

Etude du port pétrolier

Il était important de savoir dans quelle mesure la

Figure 4. — Agitation dans le port pétrolier en présence d'une houle de 8 s du WSW (248°)

grande jetée du port phosphatier risquait de donner lieu à des réflexions qui, combinées aux houles incidentes, pourraient engendrer une agitation résultante d'un niveau susceptible de soulever des problèmes. Dans ce but, il a été réalisé quelques essais, en insistant sur les directions de houle incidente précisément défavorables (en particulier la houle Ouest + 5° de 12 s), et en envisageant plusieurs hypothèses sur le pouvoir réfléchissant de la face extérieure de la jetée en cause (voir figure 4).

Les résultats obtenus ont finalement montré que la présence de la grande jetée du port phosphatier ne se traduisait que par un accroissement très modéré, en moyenne, de l'agitation attachée à la houle incidente directe, déjà notablement atténuée par effet de diffraction. Compte tenu du tonnage des navires appelés à fréquenter ce port, les cas d'agitation gênante seraient donc certainement très rares.

L'étude du port pétrolier n'a pas été poursuivie sur modèle physique, du fait que sa réalisation n'était pas encore définitivement décidée, à cette époque.

Mise au point sur modèle physique de l'implantation des ouvrages (Phase d'étude C)

Objectifs et moyens d'étude

La phase d'études C consistait principalement en la mise au point fine de l'implantation des ouvrages —extérieurs et intérieurs— du port, ainsi qu'en la détermination des natures de quais les mieux adaptées aux conditions du projet précédemment dégrossi, en s'en tenant au secteur minéralier.

Elle concernait aussi les conditions d'exposition de la contre-jetée aux tempêtes de la région. L'analyse de l'agitation observable dans le port, à différentes étapes de sa construction, qui faisait partie du programme d'études, n'est citée ici que pour mémoire.

Les études dites "d'agitation" ont été exécutées sur un modèle physique construit à l'échelle géométrique de 1/200, sans distorsion, muni de fonds fixes.

La génération de la houle était assurée au moyen d'un volet-batteur à axe réel, mû par un moteur dont la vitesse de rotation peut faire l'objet de deux variations :

- une modulation couvrant une dizaine de vagues par le truchement de laquelle il est opéré une modulation de l'amplitude de la houle (génération de trains de vagues),
- une lente variation (de l'ordre de 1 % d'un train à l'autre pour fixer les idées), à l'intérieur d'intervalles de valeurs plus ou moins larges —9,5 à 10,5 s, par exemple— mais préétablis en début d'essai, pour étudier le cas d'une houle de période moyenne donnée —10 s dans l'exemple envisagé ici—.

Les mesures de houles étaient faites au moyen d'une vingtaine de sondes résistives fixes captant les variations rapides du niveau de l'eau en présence de houle.

L'équipement incluait, par ailleurs, une partie digitale comprenant un multiplexeur assurant l'échantillonnage

des mesures (jusqu'à 60 000 par seconde) et dont l'élément central était un ordinateur PDP 11 effectuant le traitement des mesures en temps réel.

A partir de l'échantillonnage des dénivellations d'eau, était déterminée la valeur moyenne quadratique de la dénivellation propre à chaque poste de mesure, étant précisé que la moyenne était calculée sur un intervalle de temps au cours duquel la période aura eu lentement varié (de 9,5 à 10,5 s dans le présent exemple) autour de la période étudiée (10 s, ici).

De la dénivellation quadratique moyenne, Z_m , était obtenue la valeur de l'amplitude significative de la houle analysée, H_s , par la relation approximative connue : $H_s = 4 Z_m$.

Après l'analyse de la houle effectuée pour un intervalle de périodes quelconque (par exemple 9,5 à 10,5), le programme d'ordinateur assurait, d'une part, à la demande expresse de l'opérateur, l'impression d'un tableau de valeurs comme celui figurant ci-après.

Tableau II — Exemple de résultats partiels d'étude d'agitation				
	6.50	7.50	8.50	9.50
N	A	A	A	A
	7.50	8.50	9.50	10.5
1	3.25	3.25	3.25	3.25
2	2.85	3.37	3.56	3.38
3	3.05	3.31	3.44	3.30
4	2.95	3.26	3.34	3.07
5	3.19	3.30	3.57	3.61
6	3.18	2.88	2.62	2.50
7	2.50	2.42	2.58	2.35
8	3.18	2.95	2.75	2.40
9	2.72	3.29	3.41	3.19
10	1.81	2.30	2.51	2.51
11	1.81	2.37	2.75	2.81

Le programme d'ordinateur assurait, d'autre part, à la demande de l'opérateur, le stockage des données ci-dessus sur un support approprié, en vue de leur impression ultérieure, sans ou avec traitement préalable, dans le but, par exemple, de confectionner des tableaux de synthèse des résultats.

Résultats de l'étude

En ce qui concerne les agitations maximales supportables, elles varient en fait en fonction de la taille du

navire, des conditions d'amarrage, de l'obliquité de la houle et des opérations en cours, entre autres.

Pour apprécier l'efficacité des dispositions étudiées, on pouvait se reporter aux ordres de grandeurs d'amplitudes significatives limites rappelés dans le tableau III

Etudes de l'agitation dans le port achevé

Le programme d'essais mené à bien a porté sur une trentaine de variantes d'ouvrages (repérées par une lettre : de A à R, éventuellement indicée) soumises à une ou plusieurs houles choisies parmi 8 cas de tempête prédéfinis. Un total d'un millier d'essais a ainsi été réalisé (1 essai correspondant à 1 variante, 1 direction de houle, 1 amplitude de houle, 1 période moyenne, 1 niveau d'eau).

Dès le projet initial (voir figure 5), les conditions nautiques à l'abri des jetées se sont révélées acceptables, pour pratiquement toute classe de navire, aussi bien dans la passe d'entrée et la zone d'évitage, d'une part, qu'en la majorité des postes d'accostage, d'autre part, en présence des houles océaniques de la classe annuelle ($H_s \sim 5,50$ m) et les clapots sensiblement annuels ($H_s \sim 3,25$ m) du SW.

Figure 5. — Esquisse initiale du port minéralier soumise aux essais.

Tableau III — Limites d'agitation admissibles		
Opérations	Tonnage des navires	
	30 à 100 000 tdw	200 000 tdw
Utilisation de remorqueurs	2,0 m	2,0 m
Maintien du navire à poste	3,0 m	4,0 m
Chargement des pondéreux en vrac	2,0 m	
Déchargement des pondéreux	1,0 m	
Chargement et déchargement des liquides	1,0 à 1,5 m	2,5 m

Tableau IV — Amplitudes des houles sollicitant la contre-jetée.

Direction aux abords du port	Périodes (en s)	Amplitude extérieure	Amplitude max. à la contre-jetée
255° (WSW)	9,5 < T < 10,5	5,50 m	7,10 m
265° (W)	11,5 < T < 12,5	6,50 m	6,90 m
292°,5 (WNW)	15,5 < T < 16,5	8,00 m	6,40 m

Toutefois, on a relevé les points faibles suivants :

- Hs variait entre 1 m et 1,25 m en quelques postes avec les clapots exceptionnels ($H_s \sim 3,25$ m) du SW,
- Un quai particulier, prévu pour des postes Ro-Ro, était systématiquement le siège d'une agitation forte (cas des houles océaniques) à très forte (cas des clapots du SW) représentant sensiblement 20 % et 40 % de l'agitation extérieure.

L'optimisation des ouvrages a conduit à faire varier la longueur de la digue, à étudier un tenon, à faire varier l'orientation et les positions relatives des quais intérieurs.

L'étude de quelques autres variantes a montré que la réalisation d'aménagements à quais multiples obligerait à recourir à des dispositions absorbant la houle (comme les quais sur perrés), pour assurer un degré de tranquillité générale convenable.

En fait, l'existence d'une agitation appréciable dans le fond du port est apparue liée à la grande directivité des houles courtes, dans l'axe de propagation desquelles se trouve précisément la zone en question, d'une part. Elle est également apparue liée à un effet de "miroir convexe" produit sur la face interne de la digue entre les PM 1 000 et 2 000 par l'attaque de ces ondes, joint à un effet de réflexion sur les ouvrages du fond.

Finalement, en plus de l'adoption de dispositions susceptibles de réduire cette agitation effectivement notable, il a semblé qu'il fallait parallèlement prévoir de veiller à une fréquentation rationnelle des postes en cause.

Etude des conditions d'exposition de la contre-jetée

Le projet de la contre-digue devait tenir compte de ce que, avant d'attaquer cet ouvrage, les houles venant du large rencontreront d'abord l'obstacle que constituera la digue principale, et en subiront un effet de diffraction.

Les valeurs maximales relevées sur le modèle, dans le cas des tempêtes vingtennales, en fonction de la direction de provenance locale, s'établissent comme indiqué dans le tableau IV.

Définition des spécifications de construction du brise-lames principal du port minéralier

(Phase d'étude D)

Objectifs et moyens d'étude

Afin de permettre au projeteur d'arrêter le dimensionnement des éléments constitutifs de l'ouvrage, deux

phases d'étude ont été réalisées :

- la première, s'appuyant sur des essais de stabilité bidimensionnels de la section courante en eau profonde, réalisés en canal vitré (à l'échelle de 1/63),
- la seconde, comportant des essais de stabilité tridimensionnels centrés sur la tenue du musoir et réalisés en cuve à houle (à l'échelle de 1/74).

Précisons qu'entre les différents modes de travail utilisés à l'heure actuelle dans le domaine des essais de stabilité —houle régulière, houle "irrégulière organisée" en trains d'ondes, houle pseudo aléatoire— le L.C.H.F. s'en tient présentement, dans la majorité des cas, à la houle en trains d'ondes.

Pour ce faire, le générateur de houle est du type à volet-batteur à axe virtuel, muni d'un régulateur de vitesse électronique et d'une commande de réglage à distance des élongations supérieure et inférieure du mouvement du volet. La principale particularité de ce générateur réside dans l'existence d'un dispositif de modulation de la période du mouvement oscillatoire permettant la reproduction de trains d'ondes de n lames ($n = 10$ généralement), mais un fonctionnement à période constante reste toujours possible.

Canal et cuve à houle sont, par ailleurs, équipés d'un générateur de marée simplifié, engendrant une loi de niveau, soit en "dents de scie", soit sinusoïdale.

Signalons que la distribution des niveaux d'eau "en dents de scie" correspond assez bien à celle qui résulte du jeu des marées au cours d'une ou plusieurs années moyennes. Cette méthode est notamment favorable pour représenter globalement le vieillissement d'un ouvrage sous l'action des houles survenant au fil des ans, ainsi que l'altitude aléatoire de la pleine-mer lors des tempêtes.

Le capteur destiné à la mesure de la houle est une sonde résistante animée d'un déplacement automatique, permettant de recouvrir un échantillon représentatif du clapotis formé devant l'ouvrage.

La houle étudiée peut-être caractérisée par son amplitude significative $H_{i,s}$ déduite de l'amplitude maximale moyenne $H_{i,M}$ par la relation :

$$H_{i,s} = H_{i,M}/1,15$$

(la valeur 1,15 telle que mesurée en moyenne sur les enregistrements de houle/modèle est à comparer à la valeur du rapport/nature $H_{1/10}/H_{1/3}$ et non pas $H_{Max}/H_{1/3}$, compte tenu du mode de génération des trains de houles en laboratoire).

Résultats de l'étude

Il a été admis que l'ouvrage ne devrait subir qu'un

minimum de dégradations sous l'action de la houle de la classe décennale (amplitude significative égale, dans l'hypothèse pessimiste, à quelque 8,50 à 9,0 m).

Il a été estimé que des dégâts devraient être acceptés après l'action de houles supérieures à celles de classe décennale, mais on se fixait l'objectif d'écarter le risque d'une ruine de l'ouvrage sous l'effet d'une houle exceptionnelle d'amplitude significative égale à quelque 9,50 à 10 m.

Etude bidimensionnelle de la section courante en eau profonde

Le profil type initial comportait essentiellement l'utilisation de tétrapodes de 16 m^3 en béton de $2,4 \text{ t/m}^3$. La carapace constituée de ces éléments s'est révélée inapte à résister à de courtes séquences de houle déferlant devant l'ouvrage (période ≈ 2 heures/nature) venant à la suite d'une série de tempêtes de force plus modérée.

Cette première dimension de tétrapodes a donné lieu à une contre-épreuve, sur un profil très légèrement modifié (arase de sa carapace portée de la cote + 13,50 m à la cote + 15 m, l'idée étant que l'agressivité des houles pourrait être réduite par suite de la réduction de l'énergie réfléchie sur le mur de garde).

Le résultat des essais ne satisfaisant pas aux critères de stabilité adoptés, l'idée d'utiliser des tétrapodes de 16 m^3 a été finalement abandonnée, au profit d'une solution utilisant les tétrapodes de 20 m^3 (voir figure 6).

Les résultats de la dernière série d'essais concernant cette solution ont été résumés, comme suit, par l'expérimentateur :

"L'ouvrage fut successivement soumis, sans réparations intermédiaires, à des houles déferlantes de 12 s, 11 s, 13 s, 14 s, 15 s, 16 s et 18 s (pendant une marée de 12 h pour chaque période), puis encore à une marée avec la période de 13 s pour laquelle les franchissements avaient occasionné les plus fortes dépradations du talus intérieur et, pour finir, à une marée avec la période de 15 s qui est apparue la plus dure pour la carapace.

Les pertes totales n'atteignirent pas 3 % des éléments en place, et n'atteignirent jamais 1 % par cas de houle considéré".

Par contre, des conditions sévères de travail du talus intérieur, en cas de franchissements, furent mises en évidence. Ainsi, des éléments de 4 à 6 t ayant une densité de 2,2 se révélèrent insuffisants en tête de ce talus (utilisation de blocs cubiques de 6,6 tonnes de densité égale à 2,4, testés ultérieurement en cuve à houle).

Etude tridimensionnelle du musoir

Le projet initial du musoir et du raccordement avec le profil courant, tel qu'il a été établi par le B.C.E.O.M. pour une implantation par fonds de -16 m sous le zéro hydrographique, s'inspire directement du profil type précédent.

Sans entrer dans le détail de la constitution de cet ouvrage, précisons que la principale disposition prise au musoir consiste en l'utilisation de tétrapodes de 20 m^3 dont la densité est portée à 2,65 dans la zone où se produisent généralement les dégradations comme indiqué en ombré foncé sur la figure 7.

Soumis à une série de tempêtes ayant comporté quelques houles tout juste décennales, l'ouvrage s'est révélé présenter une tenue insuffisante dans le secteur des tétrapodes alourdis à $2,65 \text{ t/m}^3$.

La principale modification apportée au projet initial pour constituer le projet n° 2 (voir figure 7), réside dans l'emploi de tétrapodes de 20 m^3 /densité 2,9/poids 58 tonnes, conjointement avec des tétrapodes de 20 m^3 /densité 2,65/poids 53 tonnes laissés dans les zones qui sont apparues modérément sollicitées.

Au musoir même (secteur couvert par 381 tétrapodes de densité égale à 2,90, 200 tétrapodes de densité égale à 2,65 et 365 tétrapodes de densité égale à 2,40), une houle d'amplitude $H_s \sim 9 \text{ m}$ sensiblement décennale, agissant pendant la durée d'une marée, n'a donné lieu, pour aucune des périodes envisagées (entre 12 et 16 s), à des chutes représentant plus de 1 % de l'ensemble des éléments en place, et à plus de 3,5 % en considérant chaque catégorie indépendamment.

Cela correspondant à un niveau de dommages tout à fait admissible pour ce genre d'ouvrages.

Par contre la houle d'amplitude sensiblement trentennale ($H_s \sim 9,50 \text{ m}$) s'est montrée susceptible de provoquer des pertes représentant près de 5 % des éléments en place (12 % en considérant la catégorie de tétrapodes en cause, c'est-à-dire ceux de 58 tonnes).

Ces derniers dégâts restent encore admissibles, car ils laissent une situation réparable malgré la rareté de la classe de houle considérée.

D'ailleurs, il est apparu que les dégâts peuvent être moindres sous l'effet d'une houle encore plus sévère (2 % de chute avec $H_s \sim 10,50 \text{ m}$) comme constaté à la fin de la principale série d'essais.

Il a été enfin vérifié que des économies mineures envisageables sur le projet n° 2, devaient être évitées, et qu'en particulier le nombre des tétrapodes alourdis, tel que considéré au cours des essais, devait être respecté.

Figure 6. — Profil type de la digue principale

Figure 7. — Plan schématique du musoir.

Conclusion

Les études qui viennent d'être relatées ont débuté fin 1974 et se sont achevées début 1976.

Elles ont permis de préciser les caractéristiques des ouvrages dont une première définition avait été établie dans le courant de l'étude technico-économique.

Les dossiers de concours étant prêts fin printemps 1976, et les délais nécessaires à la pré-sélection des entreprises, l'établissement des offres et leur dépouillement étant de l'ordre de 10 mois, le marché a pu être

effectivement attribué, fin 1976, à un Groupement d'entreprises dont la majorité est française et une partie marocaine.

Les travaux de construction des ouvrages maritimes proprement dits, dont on a prévu le début pour courant avril 1977, bénéficieront des résultats d'essais particuliers que le L.C.H.F. aura entrepris à l'époque où aura été prononcée la présente communication : il est assigné à ces essais le but de mettre au point et d'adapter les procédures de constructions en fonction de l'état de la mer, en tenant compte des moyens matériels et de la technologie qui seront effectivement mis en œuvre.

Discussion

Président : M. VALLS

M. le Président remercie M. MOGUILNY pour son exposé sur différents aspects des recherches concernant le grand port phosphatier de Jorf Lasfar et ouvre la discussion.

La loi de distribution des houles étudiées concorde-t-elle avec la "loi" de LARRAS (proportionnalité entre la "hauteur significative" et le logarithme de la période de retour) demande M. BOULARD (D.T.M. Brest).

Les observations disponibles, répond M. MOGUILNY, forment des séries de durée assez courte et sont peu homogènes ; d'autre part, il y a très peu de houles observées dont la hauteur significative dépasse 7 à 8 mètres ; dans ces conditions, il n'est guère possible de procéder à une analyse suffisamment serrée pour vérifier si telle ou telle loi de distribution (du type LARRAS, ou GALTON, ou FRECHET) est plus représentative qu'une autre.

Disons que l'on cherche souvent à ajuster les points expérimentaux à la "loi" de LARRAS, en raison de son caractère commode. C'est ce que nous avons tenté de faire dans le cas de la houle du Maroc, mais nous n'avons pas obtenu des résultats entièrement satisfaisants.

M. BOULARD s'interroge sur la définition de H_s et de H_m .

Le rapport $H_s/H_m = 1,15$ est très différent de celui de l'ordre de 1,4 que donnent certaines études américaines (GAMBER, RESNAIS). Sur quelle durée d'observation (ou d'enregistrement) de la houle a-t-il été calculé ?

M. MOGUILNY précise que le H_{max} correspondant aux mesures de houles sur modèle, représente la moyenne arithmétique des maximums successifs relevés sur des trains de 10 vagues pendant une certaine durée couvrant — pour fixer les idées — une dizaine de trains.

Le H_{max} caractérisant la houle/modèle en question serait donc assez voisin du $H_{1/10}$ de la houle/nature, par comparaison avec l'amplitude dite significative (ou $H_{1/3}$).

On peut ajouter que l'absence de très fortes vagues sur le modèle doit conduire à un rapport $(H_{1/10}/H_s)_{modèle}$ inférieur à ce même rapport relevé en nature ; l'expérience montre que ce dernier est généralement compris entre 1,20 et 1,30. Ce rapport a été de l'ordre de 1,15 au cours des essais relatés. Quant au

rapport $(H_{max}/H_{1/3})_{nature}$, il est effectivement de l'ordre de 1,4 à 1,6 sinon plus.

Dans quelle mesure, demande M. BOULARD, le programme DIFF 5 est-il accessible ? Utilise-t-il les fonctions de MATHIEU en coordonnées elliptiques ?

Le programme DIFF 5, précise, en premier lieu, M. MOGUILNY, est la propriété du Laboratoire Central d'Hydraulique de France, qui l'utilise couramment pour étudier les problèmes qui lui sont soumis par ses clients.

D'autre part, dit-il, vous pouvez prendre connaissance du principe de la méthode dans la communication intitulée : "Calculs de diffraction de la houle", présentée au congrès de l'A.I.R.H. tenu à Dubrovnik. Cette méthode utilise les fonctions de GREEN, et fait usage des fonctions de HANKEL.

M. J. MARCHAL (Service des Constructions Hydrauliques, Université de Liège) pose les deux questions ci-après :

1 — Parlant des essais de stabilité, vous avez laissé sous-entendre l'existence possible d'un modèle mathématique adapté ; qu'entendez-vous par là ?

2 — Quelle théorie de la houle introduisez-vous dans votre modèle mathématique pour l'étude de l'agitation dans les ports ?

Le L.C.H.F., répond M. MOGUILNY, n'envisage pas pour l'instant de procéder au traitement sur modèle mathématique des problèmes de stabilité des digues.

En réalité, précise M. MOGUILNY, j'ai voulu dire que le L.C.H.F. est en train de mettre au point un programme de traitement en temps réel des mesures portant sur le clapotis partiel formé, en canal, devant l'ouvrage soumis à l'épreuve d'essais de stabilité, de façon à en extraire la "houle incidente".

M. MOGUILNY poursuit en indiquant que le modèle mathématique DIFF 5 actuel porte sur des houles monochromatiques sinusoïdales ; une version de ce modèle, actuellement en cours de mise au point, combine un certain nombre de telles houles monochromatiques, de façon à reconstituer, en quelque sorte, un "spectre de raies" prédéfini.

M. le Président remercie les conférenciers et toutes les personnes qui ont animé les discussions et lève la séance à 12 h 30.