Cités marines

Réalisations et projets à Monaco

René Bouchet

Conseiller Technique auprès du Département des Travaux Publics et des Affaires Sociales

Patrice Cellario

Directeur du Service des Travaux Publics

I ■ FONTVIEILLE ■

Plus petit pays du monde, après l'Etat du Vatican, la Principauté de Monaco, pour faire face à sa croissance, a dû à diverses reprises gagner du terrain sur la mer.

Son territoire s'est ainsi progressivement accru, de 150 ha au XIX^e siècle, à 160 ha avant la première guerre mondiale, puis à 175 ha en 1965, et enfin à près de 200 ha en 1971.

En raison de la pente rapide des fonds marins, Monaco a souvent dû innover en ce domaine.

Alors qu'aujourd'hui encore, la quasi-totalité des extensions maritimes et des îles artificielles, exception faite des plates-formes de recherche et de production pétrolières, se situe à des profondeurs de moins de 20 m, Monaco s'engageait, dès l'année 1966, dans la création du terre-plein de Fontvieille de 23 ha de superficie par des fonds atteignant 30 à 35 m, à l'abri d'une digue de 1 000 m de longueur comptant à l'époque parmi les plus profondes du monde.

Cette digue, de type mixte, est constituée de caissons en béton armé de $16,5 \times 15 \times 27$ mm, reposant, à la cote - 15 sur un remblai sous-marin en enrochements (fig. 1).

Les caissons étaient préfabriqués à Gênes, remorqués, puis ballastés et mis en place à Monaco.

1. Digue en béton armé reposant sur un remblai sous-marin en enrochement.

Monaco realizations and projects

To cope with its growth, Principality of Monaco has had, at many times, to reclaim land from the sea. As the waterdepth increases quickly off the shore, Monaco often innovated in that field.

The last reclamation: Fontvieille, was completed in 1971 at a waterdepth reaching 35 to 40 m. The urbanisation of this area being over, many projects have been studied at still more important depths, with metallic or concrete structures, without spilling spoil earth. For these types of structures, many technical, juridical and financial problems are to be solved. Taking into account all these elements, the design of a new ocean city, called Fontvieille 2, set at depths ranging from 40 to 80 m, is in process. Technics and methods are derived from the offshore petroleum ones.

Leur couronnement, coulé en place, avait fait l'objet d'études sur modèle réduit de façon à pouvoir limiter à 6 m la cote de l'arase supérieure de la digue, la hauteur maximale des houles de projet ayant été estimée à 7 m.

Les remblais provenaient en majeure partie du port de Marseille-Fos dont on creusait les bassins à cette époque.

En raison des désaccords entre les promoteurs privés, maîtres d'ouvrage de l'opération, et l'Etat de Monaco, sur le parti d'urbanisation des terres-pleins, leur urbanisation ne commença qu'à la fin des années 1970, l'Etat de Monaco ayant racheté entre-temps une partie des terrains endigués.

Aujourd'hui l'urbanisation de Fontvieille est pratiquement terminée. On y trouve :

- 200 000 m² de logements répartis en 1 950 appartements ;
- 55 000 m² de planchers industriels ;
- 45 000 m² de commerces et bureaux ;
- un complexe sportif comprenant le nouveau stade Louis II de 20 000 places ;
- deux ports de plaisance, l'un à l'Est, l'autre à l'Ouest, bordent le terre-plein.

II ■ NOUVEAUX PROJETS ET DIFFICULTÉS RENCONTRÉES ■

Malgré la réalisation de Fontvieille, la pénurie de terrains et le niveau des prix qui en résultait firent fleurir plusieurs projets de création d'îles flottantes ou fixes, plus ou moins développées. Aucun de ces projets n'a pu jusqu'à maintenant voir le jour.

La réalisation de tels ouvrages, dès lors que la profondeur d'eau ne permet plus de les construire par simple remblaiement, se heurte en effet à un certain nombre de difficultés d'ordre technique, financier, juridique.

Parmi ces difficultés, on peut citer :

- sur le plan technique, la détermination des caractéristiques des houles extrêmes à prendre en compte, la durabilité des structures, les codes de calcul à utiliser ;
- sur le plan financier, l'importance de l'investissement initial ;
- sur le plan juridique, la domanialité des sols créés et la nature des contrats à passer.

● 2.1 Houles

A partir du moment où les profondeurs d'eau ne limitent plus, par le déferlement qu'elles provoquent, la hauteur des houles susceptibles d'atteindre les ouvrages de protection, la détermination des caractéristiques des houles de projet devient complexe et s'entache d'une marge d'incertitude inévitable.

On confond souvent durée de vie des ouvrages et période de retour des houles à prendre en compte : par exemple houle centennale pour durée de vie de 100 ans.

Or, la probabilité d'avoir, pendant la durée de vie des ouvrages, une houle supérieure à celle de même période de retour, est très élevée, de l'ordre de 70 %.

Si l'on ne veut pas que, pendant la durée de vie de l'ouvrage, la probabilité de dépassement de la houle de projet excède 5 % ou 10 %, il faut retenir, respectivement, des périodes de retour 20 ou 10 fois plus grandes : 2 000 ans ou 1 000 ans pour une durée de vie de 100 ans.

A ce stade, une première remarque évidente doit être faite : personne ne peut affirmer avoir vu des houles centennales et encore plus millennales. Les estimations reposent sur des extrapolations fournies par des lois de répartition appliquées à des échantillons toujours trop pauvres en fortes valeurs.

Ces derniers provenaient essentiellement jusqu'à maintenant :

- d'observations visuelles faites par des bateaux, mais on sait le coefficient de subjectivité qui les affecte ;
- d'enregistrements de houlographes, mais ceux-ci ne fonctionnent pas en permanence et sont souvent placés trop près du rivage, dans des zones où les houles sont déjà déformées ;
- de résultats de calculs faits à partir des champs des vents.

S'y ajoutent depuis peu, les données obtenues par traitement approprié de relevés satellitaires.

Le premier satellite d'observation de la terre, Geosat, a été lancé en 1986. Il a été suivi par ERS1 en 1991, TOPEX en 1992, ERS2 en 1995.

L'analyse des signaux rétrodiffusés permet, entre autres, d'estimer la hauteur significative des vagues, la vitesse du vent au niveau de la mer, les spectres directionnels de houle.

A titre d'exemple, la *figure 2* donne les emprises de la zone locale et de la zone au large à l'intérieur desquelles nous avons recueilli, pour nos projets, ces données satellitaires. La *figure 3* illustre quelques-unes de ces données.

La mise en œuvre de l'ensemble des moyens disponibles y compris l'étude du comportement d'ouvrages anciens exposés à la houle, étude trop rarement mentionnée, doit permettre de réduire à moins de 20 % la marge d'incertitude liée à la détermination des caractéristiques extrêmes des houles à prendre en compte.

L'objectif de 10 % peut être espéré dans le cas où des données fiables sont disponibles sur une très longue période, correspondant au moins au tiers ou à la moitié de la durée de vie des ouvrages.

Comme il s'agit en outre d'ouvrages de grande dimension, il faut souligner l'importance de la répartition directionnelle de l'énergie de la houle.

Les houles dites aléatoires prises en compte par les chercheurs et les ingénieurs sont généralement en effet monodirectionnelles et les spectres utilisés ne donnent que la répartition de l'énergie en fonction des fréquences.

Doivent y être ajoutées, pour des ouvrages de grande dimension, les spectres directionnels dont la prise en compte peut faire varier dans le rapport de 1 à 2 sinon plus, les efforts globaux s'exerçant sur la structure.

Il est souhaitable à cet égard que les observations qui ne portent le plus souvent que sur les hauteurs et les périodes soient étendues aux directions.

D'une façon générale, la précision des formules et la perfection des moyens de calcul informatiques ne doivent jamais faire oublier l'inévitable imprécision des données de base et l'incertitude qui en résulte sur les extrapolations.

Une incertitude de 20 % sur la hauteur de la houle de projet entraîne une incertitude de près de 100 % sur le poids des enrochements d'une digue à talus !!

2. Emprise de la zone locale et de la zone au large où ont été recueillies les données satellitaires.

2.2 Durabilité

Si la corrosion de structures métalliques en milieu marin a fait l'objet d'innombrables observations et études et si les moyens de s'en protéger, au moins pour les parties toujours immergées, sont bien connus, la durabilité du béton armé et du béton précontraint dans un milieu aussi agressif que l'eau de mer continue à demeurer le domaine de quelques spécialistes et à être trop souvent ignorée par nombre de praticiens.

Or, ce problème est déterminant pour la réalisation de structures, difficilement transportables et réparables, auxquelles on demande la même durée de vie que celle prévue pour des ouvrages terrestres.

Il faut se réjouir que « CITES MARINES » ait organisé un tutoriel sur cette importante question.

Les incidents ou accidents, survenus en particulier aux appontements de ports de plaisance, sont là pour rappeler qu'au contact de l'eau de mer, béton armé et béton précontraint sont des matériaux périssables, sauf précautions particulières souvent ignorées par la réglementation actuelle.

Il faut souhaiter que les observations sur ouvrages anciens soient multipliées et que, lors de la recertification de plates-formes en béton, carottages et analyses permettent d'y voir plus clair sur l'évolution des phénomènes, cela

dans les différentes zones : à grande profondeur, dans la zone de marnage soumise à l'assaut des vagues, au-dessus du plan d'eau.

On sait que l'hydratation du ciment produit une solution interstitielle basique, de pH élevé, qui confère une stabilité permanente aux armatures noyées dans le béton.

Deux processus peuvent altérer cette protection :

- la carbonatation du béton à partir du gaz carbonique contenu dans l'air, qui se traduit par une diminution progressive du pH ;
- la pénétration d'agents agressifs, notamment les ions chlore, jusqu'au niveau des armatures.

Pour s'en prémunir, les deux principaux moyens consistent à réduire la perméabilité du béton en augmentant sa compacité et à accroître l'épaisseur d'enrobage.

Sur ce dernier point, il faut signaler les écarts importants existant entre les réglementations nationales : au minimum 50 mm en France, 75 mm aux U.S.A., 40 mm en Italie, 30 mm en Allemagne. Ces écarts paraissent bien supérieurs à ceux que justifieraient les conditions climatiques. Ils illustrent les progrès restant à faire dans ce domaine.

S'ajoutent aux conditions de compacité et d'épaisseur d'enrobage bien d'autres considérations comme l'ouverture maximale des fissures sous certaines combinaisons de charges, la façon de traiter les reprises de bétonnage, les précautions à prendre pour éviter que des inserts métal-

3. Quelques données satellitaires.

liques servent de cheminements privilégiés à la pénétration des ions chlore à l'intérieur des structures, etc...

C'est en partant de la réglementation française et des standards norvégiens qui nous ont paru traiter le mieux cette question, que nous avons, avec le Bureau Veritas Monaco, établi nos propres spécifications de façon à garantir à nos ouvrages une durée de vie d'au moins 100 ans.

Pour en rester à l'essentiel, signalons que cet objectif est atteint par des épaisseurs d'enrobage importantes adaptées au degré d'exposition à la mer des différentes parties d'ouvrage, par l'emploi de bétons à haute performance, par une protection cathodique de l'ensemble des armatures et des inserts métalliques dont la continuité électrique doit être assurée.

2.3 Codes de calcul

Dans le cas des ouvrages terrestres, bâtiments privés, publics, industriels, ponts, etc... — une cité marine construite sur un terrain remblayé rentre dans ce cas —, les textes réglementaires tels que, en France, les BAEL et BPEL 91 définissent clairement les différentes combinaisons, de charges permanentes, de charges variables, et de charges accidentelles, à prendre en compte afin de vérifier que, pour chacune de ces combinaisons les sollicitations cor-

respondantes demeurent inférieures aux valeurs admissibles pour les états limites de service (ELS) et les états limites ultimes (ELU).

En matière d'ouvrages maritimes en béton, en acier ou en tout autre matériau, rien de semblable, à notre connaissance, n'existe.

En effet, bien que le cas des ouvrages exposés à la mer ne soit pas explicitement exclu du domaine d'application des règles BAEL ou BPEL, il faut reconnaître que ces règles ne disent rien des actions et combinaisons d'actions d'origine hydrodynamique, et que les considérations relatives à la justification aux états limites de fatigue restent peu développées, au moins dans les textes français.

Pour leurs ouvrages en mer, les pétroliers, eux, font normalement référence :

- pour les plates-formes métalliques et leurs fondations sur pieux (Jacket) aux recommandations de l'American Petroleum Institute (API), recommandations issues d'une pratique qui a fait ses preuves depuis de longues années, et qui sont périodiquement remises à jour et complétées ;
- pour les plates-formes en béton et leurs fondations gravitaires, aux standards norvégiens et aux spécifications du Det Norske Veritas (DNV).

Mais d'une part les pétroliers ne demandent à leurs ouvrages que des durées de vie limitées (généralement

30 ans). D'autre part, le niveau de sécurité admis pour des plates-formes pétrolières ne saurait être retenu pour des ouvrages civils.

Les conditions d'exploitation d'une plate-forme pétrolière et celles d'une cité marine, flottante ou fixe, diffèrent de manière fondamentale. A titre d'exemple, le personnel des plates-formes est spécialement entraîné à une évacuation rapide en cas d'accident. En outre, les critères de confort (vibrations, tassements différentiels, etc...) sont moins stricts, voire inexistantes.

Aussi est-il indispensable, à partir de l'expérience pétrolière offshore, et dans le cadre de l'approche semi-probabiliste qui est celle actuellement adoptée par la quasi-totalité des règlements et codes internationaux, d'élaborer une réglementation spécifique s'appliquant aux cités marines et permettant d'atteindre les objectifs de durée de vie, de sécurité et de confort des ouvrages.

Ce travail a été accompli, pour notre compte, par le Bureau Veritas Monaco. Il fait l'objet d'une communication séparée présentée par M. J. L. Isnard, Directeur de ce Bureau.

● 2.4 Aspect financier

Hormis les cas où un développement en mer résulte d'impératifs économiques ou d'aménagement du territoire : activités portuaires — industrielles, dépôts de produits dragués, équipements publics, aéroports, etc..., opérations pour lesquelles des financements publics peuvent être mis en place, l'aménagement d'une cité marine au sens urbain du terme, mobilise une part plus ou moins grande de fonds privés qui ne s'investissent que dans la mesure où une perspective de rentabilité suffisante existe.

La principale difficulté à cet égard, réside dans l'importance de l'investissement minimum initial qu'il faut engager pour réaliser la première phase de l'opération.

Dans le cas d'une île, flottante ou fixe, cette première phase est toujours très lourde.

Elle doit comprendre en effet, les ouvrages de protection contre la houle, les premiers équipements publics indispensables à la vie de la cité, les liaisons avec la terre, qu'il s'agisse de l'amenée des personnes, des marchandises, de l'eau potable, les réseaux divers, l'évacuation ou le traitement des eaux usées, des ordures ménagères, etc...

Une île flottante doit en outre avoir dès le début, des dimensions suffisantes en rapport avec les longueurs d'onde des houles de projet.

Face à des dépenses certaines, ne se trouvent que des recettes aléatoires, la commercialisation ne se développant qu'au fur et à mesure que la nouvelle cité prend corps et vie.

Une juste appréciation du rythme de commercialisation des premiers programmes est aussi difficile qu'indispensable. Le risque que la marge nette des recettes ne rattrape jamais le cumul des charges financières demeurera souvent élevé.

La faisabilité financière d'une telle opération sera souvent subordonnée à une contribution publique initiale importante.

Aussi, la solution d'une presqu'île raccordée à un quartier ayant déjà sa vie propre, et pouvant se développer et s'étendre progressivement au rythme de la demande, constituera-t-elle souvent la seule solution réaliste.

C'est celle qui a été retenue à Monaco.

● 2.5 Aspect juridique

Le niveau des recettes dépend au plus haut point de la nature des contrats susceptibles d'être passés par les promoteurs. Il sera très différent suivant qu'il s'agit de contrats de vente ou de contrats de location, même de longue durée.

Partout dans le monde, la mer fait partie du domaine public. La possibilité de déclasser une partie au moins de l'emprise de la cité marine, sera souvent déterminante pour sa réalisation. A titre d'exemple, depuis le vote de la loi sur la mer en France maintenant dans le domaine public les terrains endigués, aucune marina n'a été réalisée.

Les difficultés rencontrées par les aménageurs de la ZAC de Cap-d'Ail, au voisinage immédiat de la zone de Fontvieille illustrent cette situation. Dans la première, située en France, seuls des baux emphytéotiques peuvent être conclus. Dans la seconde, située à Monaco, des ventes en pleine propriété sont autorisées.

Si l'aspect juridique est relativement simple quand il s'agit d'un terrain gagné sur la mer par remblaiement, il n'en va pas de même dans le cas d'une île flottante ou fixe sur appuis ponctuels. Dans ce cas, il sera difficile d'éviter d'avoir sur la même emprise juxtaposition mais aussi superposition d'un domaine privé et d'un domaine public.

L'imagination et la créativité des juristes seront les bienvenues.

La solution prévue à Monaco pour les nouveaux projets d'extension en mer, consiste à déclasser le volume correspondant à celui des programmes immobiliers à vendre, l'infrastructure continuant, elle, à faire partie du domaine public.

III ■ FONTVIEILLE 2 ■

C'est en prenant en compte l'ensemble de ces problèmes avec le souci que Monaco a toujours eu de protéger l'environnement marin, que les Services Techniques de la Principauté ont engagé, avec le concours de Doris Engineering comme bureau d'études, et le Cabinet d'architecture François Spoerry, l'étude de Fontvieille 2 qui a pour objet de créer au large de Fontvieille, par des profondeurs allant de 40 à 80 m, une nouvelle cité marine.

L'urbanisation de Fontvieille étant, comme on l'a vu, terminée, comment continuer à s'étendre sur la mer tout en la préservant, en renonçant donc à y déverser des déblais ?

Pour répondre à cette question, les Services Techniques de la Principauté ont étudié et mis au point deux nouveaux types d'ouvrages écologiques et économiques eu égard aux grandes profondeurs que l'on trouve à proximité immédiate du littoral, dont la particularité consiste à opposer à la houle des obstacles essentiellement horizontaux, faiblement immergés.

L'un, à base de plaques horizontales, est un atténuateur de houle : c'est le mur d'eau oscillant, l'autre un brise-houle, c'est le mur d'eau fixe.

● 3.1 Mur d'eau oscillant et mur d'eau fixe

Le mur d'eau oscillant met en œuvre une plaque horizontale, faiblement immergée, rigidement fixée aux fonds marins (fig. 4). Excitée par la houle du large, la masse d'eau située sous la plaque oscille et génère, en aval, une onde qui, en fonction de la largeur et de l'immersion de

la plaque, peut être égale et opposée à l'onde passant au-dessus. A ce phénomène s'ajoute, au-delà d'une certaine cambrure, le déferlement de la houle sur la plaque. Dans une gamme relativement étendue de périodes, il est possible de diviser par 2 et plus, la hauteur de la houle incidente.

4. Mur d'eau oscillant mettant en œuvre une plaque horizontale faiblement immergée.

Le mur d'eau fixe mobilise lui l'inertie de cette même masse d'eau, la plaque étant remplacée par un caisson à fond plat, avec une partie émergée. L'inertie de cette masse d'eau et son excitation par la houle doivent être telles qu'elles réfléchissent la houle incidente.

On sait que lorsque la houle frappe la face verticale d'un caisson, et s'y réfléchit, l'amplitude du clapotis qui se forme est deux fois supérieure à celle de la houle du large. Ce sont les variations correspondantes de pression, qui excitent la masse d'eau située sous le caisson (fig. 5).

5. Houle frappant la face verticale d'un caisson.

Comment les réduire ?

Tout simplement en prolongeant le fond du caisson pour situer la face amont de cette masse d'eau, non plus au droit d'un ventre, mais au voisinage d'un nœud du clapotis (fig. 6).

6. Réduction de l'effet de la houle par prolongation du fond du caisson.

Nous avons étudié longuement avec l'Institut technique Chalmers de Goteborg, sur modèle mathématique et sur modèle hydraulique, l'influence du prolongement vers le large, par une plaque, du fond des caissons. Le graphique présenté (fig. 7) montre, sur la base d'études sur modèle mathématique, l'influence de la largeur de la plaque sur le coefficient de transmission, en fonction de la période de la houle incidente, l'efficacité étant pratiquement indépendante de la cambrure. Il confirme le caractère ondulatoire du phénomène.

7. Influence de la largeur de la plaque sur le coefficient de transmission.

Dans la nature, les phénomènes ne sont évidemment pas aussi simples. Les essais en canal confirment l'allure du phénomène, mais sans qu'il y ait, sur les courbes indiquant le coefficient de transmission en fonction de la période, un point de rebroussement à $t = 0$.

En revanche, au-delà les coefficients de transmission mesurés sont inférieurs à ceux donnés par le modèle mathématique.

Pour réduire les effets de choc sur la face amont du caisson, il est possible de disposer au droit de l'arête

8. Fontvieille 2, à ériger à l'abri d'une digue du type « mur d'eau fixe ».

extérieure de la plaque, une paroi perforée du type Jarlan ou autre. Les essais effectués en canal, à l'Institut Technique Chalmers comme à Sogreah, montrent que l'influence d'une telle paroi perforée sur l'efficacité hydraulique du caisson est négligeable. Diverses configurations ont été essayées, à Océanide, en vue de réduire la composante hydrodynamique des forces agissant sur le caisson.

● 3.2 Edification de Fontvieille 2

C'est à l'abri d'une digue du type « mur d'eau fixe » de 1 800 m de longueur et sur le plan d'eau de 45 ha ainsi protégé que la nouvelle cité marine, dite Fontvieille 2, doit être édifiée (fig. 8).

3.2.1 La première étude de faisabilité

La première étude de faisabilité, conduite en 1990-1991, comportait la création d'environ 200 000 m² de planchers. Les bâtiments étaient construits sur une infrastructure formée de caissons en béton précontraint, partiellement immergés, reposant sur un système de fondations fixes.

S'inspirant des techniques utilisées pour les plates-formes pétrolières, les caissons d'infrastructure avec leurs niveaux de parking, une galerie technique, les ballasts, étaient construits à sec, dans une forme de radoub (fig. 9).

Puis les superstructures des immeubles étaient érigées le long d'un quai (fig. 10).

9. Caissons d'infrastructure dans le 1^{er} projet.

10. Superstructures des immeubles dans le 1^{er} projet.

11. Mise en place des caissons dans le 1^{er} projet.

Après achèvement, chaque caisson avec ses immeubles était remorqué jusqu'à son emplacement définitif où il était posé, par ballastage, sur des appuis préalablement installés.

Les 200 000 m² de planchers prévus au plan masse étaient répartis sur 25 caissons de 40 ou 45 m de largeur. Treize caissons avaient une longueur de 120 m, 22 une longueur de 90 m, 2 une longueur de 6 m (fig. 11).

L'étude des caissons comportant notamment l'examen des conditions de flottabilité et de stabilité lors du remorquage, avait montré que des caissons de 120 m de long et de 40 m de large pouvaient supporter, avec 2 niveaux de parking, 8 500 m² de planchers si leur centre de gravité coïncidait avec celui d'un caisson (fig. 12).

12. Caisson avec deux niveaux de parking.

Cette capacité était portée, dans les mêmes conditions, à 18 000 m² de planchers avec des caissons de 45 m de large comportant 3 niveaux de parking (fig. 13).

13. Autre structure de caisson plus large avec trois niveaux de parking.

Aussi novateur que paraisse un procédé consistant :

- à préfabriquer de véritables quartiers de ville ;
- à les remorquer et à les mettre en place conformément à un plan d'urbanisme approuvé, il faut souligner qu'il ne fait appel qu'à des techniques classiques, parfaitement

connues et maîtrisées, relevant il est vrai, de domaines qui jusque-là s'ignoraient, comme l'offshore pétrolier, la construction navale, le bâtiment, les travaux maritimes.

Outre l'avantage d'une construction urbaine limitant les nuisances de chantier, il faut mentionner :

- le faible report de charges sur le sol, la poussée d'Archimède équilibrant une grande partie du poids de l'ensemble ;
- le respect de l'environnement marin ;
- les possibilités d'accostage des bateaux de plaisance le long des faces extérieures des caissons ;
- la souplesse et le caractère modulable d'une opération qui, la construction du brise-lames mise à part, peut s'adapter à toutes les fluctuations de marché.

3.2.2 La nouvelle étude de faisabilité

De fait, la principale critique soulevée par cette première étude était l'impossibilité de phaser la digue de protection.

L'engagement de l'opération supposait une mise de fonds initiale importante, de l'ordre de 3 milliards de francs, correspondant au coût de la digue.

Pour pallier cette difficulté majeure, les études ont été reprises, en profitant en particulier de tout l'acquis résultant de la mise au point du projet de la digue de la Condamine.

La nouvelle étude de faisabilité diffère principalement de la précédente sur trois points :

- la digue de protection comporte des parties fixes et des parties flottantes de façon à permettre sa réalisation en deux phases ;
- si les caissons d'infrastructure et leurs appuis sont toujours préfabriqués en dehors de Monaco, les superstructures peuvent être construites à Monaco, avec les avantages en matière fiscale et d'activité qui en résultent ;
- l'emprise des espaces libres de plan d'eau a été réduite de façon à porter de 200 000 m² à plus de 300 000 m² la superficie de plancher des bâtiments, sans que leur hauteur, au demeurant modeste, ait été augmentée. La gamme de l'offre prévue va de l'appartement en bâtiment collectif de 4 + 7 à la presqu'île privée.

Les parties fixes de la digue de protection sont constituées de caissons en béton précontraint, de 110 m de longueur, comportant côté large deux chambres de dissipation d'énergie couvertes en marches d'escalier (fig. 15).

Cette disposition présente le double avantage de réduire très sensiblement les efforts dus aux vagues auxquelles sont opposés des obstacles progressifs, et d'offrir par temps calme de vastes espaces de loisirs : solarium, plongeoirs, etc...

14. Calcul de La Shon.

15. Parties fixes de la digue de protection.

Ces caissons reposent sur des pieux métalliques inclinés de fort diamètre, ancrés dans le *bed-rock*. Une semaine devrait suffire à l'installation d'un caisson suivant la procédure indiquée dans les *figures 16*. Une telle méthode, nouvelle en travaux maritimes, mais usuelle en travaux pétroliers offshore, présente l'avantage de s'affranchir des aléas liés à l'état de la mer.

Les caissons flottants de protection reprennent, dans un souci de standardisation, les dimensions et l'essentiel de la structure de la digue semi-flottante envisagée pour la Condamine.

Dotés de plaques anti-roulis, ils sont ancrés, à leurs extrémités, sur le fond marin, à l'image des plates-formes pétrolières dites semi-submersibles.

Dans la première phase, deux éléments fixes de 110 m de longueur et trois caissons de 350 m abriteraient un plan d'eau d'une vingtaine d'hectares sur lequel 150 000 m²

environ de planchers de bâtiments pourraient être installés.

Ainsi la Principauté de Monaco souhaite-t-elle montrer, avec ces projets, qu'il est possible de concilier environnement et développement, économie et écologie.

Bibliographie

- [1] ORFALI R. — *Ouvrages de protection du complexe urbanistique et touristique de Fontvieille*. Revue Travaux de novembre 1972.
- [2] GODA Y. — *Random Seas and design of maritime structures*. University Press of Tokyo.
- [3] LARRAS J. — *Physique de la houle et des lames*. Editions Eyrolles.
- [4] DUVAL R. — *La durabilité des armatures et du béton d'enrobage*. Chap. 6 du livre : la durabilité des bétons. Presses de l'ENPC.

16. Procédure d'installation d'un caisson.