

C.N.E.X.O.
Contrat 73/718
Thème 3

CENTRE D'OCEANOLOGIE D'ENDOUME
CENTRE UNIVERSITAIRE DE MARSEILLE-LUMINY
13288 MARSEILLE CEDEX 2

RECHERCHES SEDIMENTOLOGIQUES SUR LA PROTECTION

DU LITTORAL A LA PRESQU'ILE DE GIENS (Var)

J. BLANC

Professeur de Géologie marine
et de Sédimentologie appliquée

RECHERCHES SEDIMENTOLOGIQUES SUR LA PROTECTION
DU LITTORAL A LA PRESQU'ILE DE GIENS (VAR)

LES FORCES : VENTS, VAGUES, HOULES, SEICHES et COURANTS.

Située à la limite du golfe du Lion et du golfe de Gênes, la région de la presqu'île de Giens demeure sous la dépendance de deux régimes dominants : les vents d'Ouest s.l. et les vents du secteur Est.

Cette alternance conditionne des systèmes différents, voire opposés, de vagues, houles et courants littoraux. La presqu'île de Giens constitue le résultat récent de ces actions, à la frontière de deux domaines mécaniquement antagonistes. Son évolution et sa protection devront tenir compte de cette dualité.

On peut distinguer :

1° - Régimes dominants et alternants :

- régime d'Ouest ("Mistral" local) : le mieux représenté au point de vue "statistique" : fréquence de 28 % en journées/par an (j/a). Cette dominance se manifeste encore par le "spectre" des vitesses :

- . 1% j/a à plus de 30 noeuds
- . 10% j/a de 15 à 30 noeuds
- . 17% j/a de 0 à 15 noeuds

- régime d'Est, à grande distance de fetch, venant du golfe de Gênes : fréquence moyenne de 23 % j/a avec :

- . 1% j/a à plus de 30 noeuds
- . 9% j/a de 15 à 30 noeuds
- . 13% j/a de 0 à 15 noeuds

Du fait de la distance de fetch, les vagues les plus grosses sont engendrées par les régimes d'Est. Les destructions, alluvionnements, etc... sont à imputer principalement à ces deux régimes dominants par leur force propre et leurs fréquences moyennes cumulées (51 % j/a).

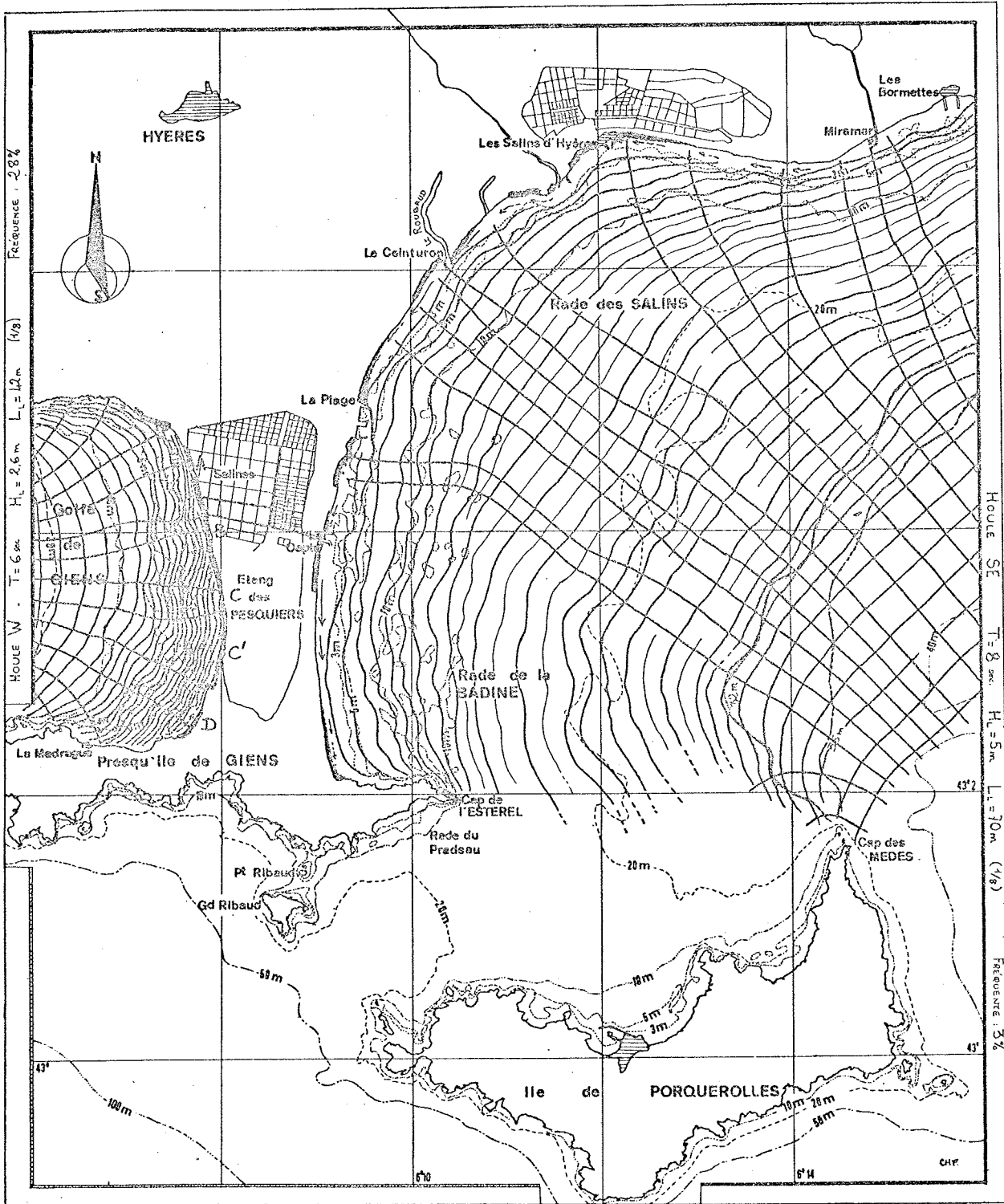
2° - Régimes importants et alternants :

- Régime de NE : 15 % j/an.

- . 2% j/a à vitesse comprise entre 15 et 30 noeuds.
- . 13% j/a à vitesse comprise entre 0 et 15 noeuds.

- Régime de NW : 10 % j/an.

- . 4% j/a à vitesse comprise entre 15 à 30 noeuds.
- . 6% j/a à vitesse comprise entre 0 et 15 noeuds.



 Zone érodée
 Zone calme
 Longshore current
 Dérive temporaire

Ces régimes engendrent des vagues parfois assez fortes et correspondent aussi à des érosions, transferts et accumulations. Leur fréquences annuelles cumulées (25 % j/a) et leur intensité relative interviennent et s'ajoutent aux effets des vents dominants mais, en tous les cas, les distances de fetch sont faibles, les vagues moins grosses tandis que les cambrures demeurent accusées.

3° - Régimes secondaires :

- Régime de SW : 7 % j/an.
 - . 0,5% j/a de vitesse comprise entre 15 et 30 noeuds.
 - . 6,5% j/a de vitesse comprise entre 0 et 15 noeuds.
- Régime N (Tramontane) : 5 % j/a.
 - . 0,5 % j/a de vitesse comprise entre 15 et 30 noeuds
 - . 4,5 % j/a de vitesse comprise entre 0 et 15 noeuds

Ils sont responsables de transferts locaux, de faible importance et de variations modestes du plan d'eau.

- autres régimes de peu d'importance totalisant une fréquence annuelle moyenne de 2 à 3 % journées /an : S et S.SE.

- journées de calme : de 10 à 11 % journées/an.

L'EXPOSITION.

Le tombolo oriental, le plus important, généralement engraisé par les sédiments du Gapeau et du Pansard, est essentiellement exposé aux houles et vagues assez grosses d'Est, NE et S.SE pour 40/j/an. Il en résulte des relèvements du plan d'eau atteignant parfois 0,70 m, combinés au phénomène de la marée, des seiches, érosions, transfert du NE vers le SW, puis le Sud, sédimentation dans la zone méridionale (l'Estanci, La Badine). Les seiches qui se manifestent au Sud de la Capte, jusqu'à l'Estanci, favorisent la sédimentation et cette zone littorale, naturellement protégée, ne pose aucun problème.

Le tombolo occidental, étroit et bas, demeure fragile. Il représente un des secteurs les plus menacés du littoral méditerranéen français. Ce tombolo est édifié par les sédiments quaternaires récents résultant d'un ancien cours du Gapeau ; il ne reçoit pratiquement aucun apport sédimentaire actuel et les érosions ne sont point compensées par un transfert notable, comme cela est le cas pour le tombolo oriental. La nature minéralogique de ce matériel "fossile", la granulométrie, généralement plus

grossière, etc... diffèrent encore des constituants d'origine métamorphique déposés sur le rivage oriental, aux Bor_mettes, Salins d'Hyères, Port d'Hyères, La Capte, l'Estanci.

L'érosion du tombolo occidental est le résultat de l'attaque des vagues d'Ouest, à cambrure élevée, quoique relativement courtes, auxquelles s'ajoutent les vagues de NW et SW, l'ensemble totalisant environ 45 j/an. Cette dominance des régimes d'Ouest, malgré les faibles valeurs des distances de fetch, nous oblige à envisager une protection efficace de cette zone littorale, orientée du Nord au Sud et perpendiculaire aux forces majeures. Aucune rivière se jetant en rade de Toulon et de Carqueiranne, il n'y aura point de mécanisme naturel d'ensablement compensateur en rade de Giens, comme cela peut être le cas en baie d'Hyères.

Les vitesses des vents de tempête sont maximales pour les dépressions accusées : on a mesuré :

- vent de 110 km/h (62 noeuds) pour 747 mm.
- vent de 120 km/h (66,5 noeuds) pour 746 mm.

De ce fait, les dépressions engendrent des relèvements du plan d'eau ("marées barométriques") atteignant 0,40 m qui, combinés aux vagues de tempêtes, peuvent s'élever à +0,80 m au-dessus du niveau normal et occasionner de fortes érosions littorales. Ces dernières, maximales à l'automne, en janvier et au printemps (avril-mai) correspondent toujours à la succession : dépression-vent de tempête et vagues-érosion du littoral. Le risque d'une érosion grave devient réel dès que la pression s'abaisse en deçà de 750 mm.

Le phénomène de la marée est faible ; les marnages, de $\pm 0,15$ à $\pm 0,25$ m sont sans importance sur l'évolution sédimentaire littorale. En revanche, la situation des rades de Giens et d'Hyères favorise les phénomènes de résonance et le développement de seiches. Ces ondes stationnaires à courte période se traduisent par les effets suivants :

1) Relèvements temporaires du plan d'eau : oscillations de $\pm 0,45$ m mesurées à la Madrague de Giens. Combinées à une "marée barométrique", ces oscillations peuvent atteindre +0,60 m et même +0,80 m par très gros temps d'Ouest, d'où l'érosion accélérée des petits fonds, de l'herbier et du tombolo occidental de Giens.

2) Courants de seiches dirigés de l'Est vers l'Ouest et réciproquement, sortant ou entrant dans la rade de Giens ou au Sud de la baie d'Hyères.

3) Sédimentation en cordons sableux obliques ou flèches sous marines en rides ou croissants à l'Estanci, au Sud de la Capte, au tombolo

oriental de Giens, là où se situent les lignes nodales des seiches. La disposition Nord-Sud des tombolos et la "barrière" constituée par l'"île" rocheuse de Giens favorisent les résonances et le développement de ces ondes stationnaires.

Il nous faudra tenir le plus grand compte de ces phénomènes lors de travaux d'aménagements du littoral ou de projets d'installation d'émissaires car :

a) les zones des nodales sont le siège de colmatages liés à une hypersédimentation naturelle, comme l'ont montré nos travaux dans le golfe de Fos.

b) les zones des nodales sont le siège d'une pollution (macroscopique) accélérée. Les débris (bois, plastiques, bidons, bouteilles) se rassemblent préférentiellement, à égale distance ($L/4$) des "ventres" de l'oscillation (L = longueur d'onde de la seiche) ; les rides sableuses étant généralement séparées de $L/2$, soit 45 à 65 m, en fonction des paramètres de l'oscillation incidente et des dispositions locales.

Les régimes :

Nous distinguerons les états suivants :

1°) Mer moyenne :

$T = 4 \text{ sec}$ L au large : 25 m $H = 0,55 \text{ à } 1,10 \text{ m}$

$W =$ vitesse du vent = 11 à 16 noeuds.

Profondeur d'amortissement (P.A) de la houle incidente : 27 m

Profondeur de réfraction (P.R) de la houle incidente : 12 à 13 m.

2°) Mer "grosse" (tempête normale)

$T = 6 \text{ sec}$ $L = 56 \text{ m}$ $H = 1,3 \text{ à } 2,5 \text{ m}$

$W = 22 \text{ à } 25 \text{ n}$, $P.A = 60 \text{ m}$, $PR = 28 \text{ m}$.

3°) Mer "forte" (forte tempête) :

$T = 7 \text{ sec}$ $L = 77 \text{ m}$ $H = 2,5 \text{ à } 4,5 \text{ m}$

$W = 25 \text{ à } 30 \text{ n}$ (moyenne à 27 n), $P.A = 80 \text{ m}$, $PR = 39 \text{ m}$.

4°) Tempête maximale observée :

$T = 8,2 \text{ sec}$ $L = 88 \text{ m}$ $H = 4,5 \text{ à } 6 \text{ m}$

$W =$ plus de 30 n, $P.A = 90 \text{ m}$, $P.R = 45 \text{ m}$.

5°) Tempête exceptionnelle (possible, prévisible mais jamais observée).

$T = 10 \text{ sec}$ $L = 156 \text{ m}$ $H = 6 \text{ m à davantage}$.

$W =$ plus de 38 à 40 n, $P.A = 160 \text{ m}$, $P.R = 78 \text{ m}$.

Le calcul montre qu'alors la limite de déplacement du sédiment très fin sur le fond peut être reportée à une profondeur de 160 m et correspond pratiquement à la majeure partie du précontinent.

Les vagues et houles, après réfraction à partir de la profondeur P.R., tendent à s'orienter parallèlement au tracé dominant du littoral et des isobathes (Loi de Lewis).

Cela est en conformité avec l'orientation générale des tombolos de Giens.

Lorsqu'après réfraction, les crêtes sont obliques par rapport à la ligne de côte, la résultante des mouvements (swash) admet un déplacement moyen parallèle au rivage (contre la ride littorale s'il y en a une), nommé "long shore current" (ou "transfert littoral", ou "dérive littorale").

Dans les zones de convergence des orthogonales ces dérives littorales ont une vitesse maximale ; elles tendent à se diriger vers les secteurs où les orthogonales divergent (Loi de J. Sitarz) (1963).

Le déplacement du sable sur le fond :

Le problème consiste à évaluer par le calcul ou la mesure directe, la vitesse minimale v de début d'entraînement du sable, pour un diamètre D considéré, sur un fond supposé horizontal (1). Les calculs de Bonnefille (1963) et Larras (1964) ont abordé le cas de sédiments non cohésifs ; cependant, il faut remarquer que l'arrachement d'une particule contre le fond exige une énergie, donc une vitesse, bien supérieure à celle qui demeure nécessaire, par la suite, à la maintenir en mouvement dans un transfert littoral. Cette vitesse V_r est nommée "vitesse réglante de transport".

V_r est une fonction de la granulométrie, de la densité et de la sphéricité des grains ; elle s'abaisse en fonction inverse de l'accroissement de la pente. On peut admettre :

- pour le sable fin : $V_r = 0,10$ à $0,15$ m/sec
- pour le sable grossier : $V_r = 0,35$ à $0,60$ m/sec.
- pour les granules : $V_r = 0,40$ à $0,90$ m/sec.
- pour les galets et cailloux : $V_r = 0,70$ à $1,0$ m/sec.

En considérant les sites réels de Giens, le calcul, d'après les abaques de Bonnefille, donne les valeurs suivantes des vitesses v en m/sec.

(1) Cette dernière condition n'étant point réalisée, la pente sous-marine détermine en fait une vitesse réelle inférieure à la vitesse théorique v .

Matériau	Médiane	Site choisi	Profondeurs			
			3m	5m	10 m	15 m
Galets	5 cm	Plage du Gapeau Plage du Ceinturon	2,7	2,9		
Granules	2 mm	Plage du Ceinturon	0,67	0,72		
Sables grossiers	1,5 mm	Plage d'Hyères Hippodrome Almanarre	0,57	0,63	0,72	
Sables moyens	0,8 à 0,5 mm	La Capte	0,45	0,52	0,60	0,63
Sables fins	0,1 mm	L'Estanci La Badine	0,40	0,43	0,50	0,52

Les recherches sont menées par étapes :

1) Etablissement du stock granulométrique dominant et détermination de D (médiane, moyenne ou centiles supérieur, correspondant au "grain maximum", ce dernier étant intéressant à connaître pour l'évaluation de la vitesse d'arrachement, donc d'érosion au niveau du fond).

2) Répartition bathymétrique du stock de diamètre D.

3) Faciès granulométrique du stock concerné. On utilisera les travaux de Rivière, Visher et Weydert. Le détail des analyses sera poussé en fonction du temps disponible et de l'échelle du problème à traiter (1).

4) Calcul des vitesses de transport et des "niveaux d'énergie".

Les diagrammes de B.W. Logan expriment les vitesses contre le fond pour divers régimes :

1°/ Mer moyenne : T = 4 sec, pente assez forte (1/35) (L = 25 m, H moy. = 0,80 m).

Flux de vitesse égale à 1,20 m/sec à -3 m.

Flux de vitesse égale à 1,03 m/sec à -5 m.

Amortissement pratiquement complet à -30 m.

2°/ Mer grosse : T = 6 sec, pente 1/35. (L=56 m, H moy. = 2 m).

Flux de vitesse égale à 2,30 m/sec à -3 m. La valeur de cette vitesse ne change guère à -5 m. A -10 m, on calcule 0,50 m/sec. L'amortissement est réalisé vers 52 ou 55 m.

(1) Une recherche appliquée à court terme concernant un problème précis n'exigera point de longues études théoriques, vérification et calculs. Sur ces problèmes consulter les travaux de P. Weydert, 1971, 1972 et 1973.

3°/ Tempête maximale observée : T = 6 sec, pente 1/35.

(L = 88 m, H moy. = 5,10 m)

Aucune vitesse n'a été calculée pour les fonds de 3 à 5 m.

A -10 m, le flux montre une vitesse de 1,5 m/sec

A -15 m, le flux montre une vitesse de 1,0 m/sec

A -22 m, le flux montre une vitesse de 0,77 m/sec

A -33 m, le flux montre une vitesse de 0,50 m/sec

Amortissement pratiquement complet vers -77 à -80 m.

Conséquences pratiques :

1°/ Par mer "moyenne" :

- les sables grossiers cheminent jusqu'à -8 m et l'érosion affecte surtout les fonds jusqu'à une profondeur de -5 m.

- les sables moyens et fins sont mis en suspension jusqu'à -30 m.

2°/ Par mer "grosse" : érosion d'un fond sableux jusqu'à -10 m, mise en suspension de sable fin jusqu'à -50 m.

3°/ Pour la tempête maximale observée :

- érosion rapide de tous les fonds, quelle que soit leur nature, jusqu'à 10 m de profondeur.

- érosion du sable grossier et moyen jusqu'à -30 m.

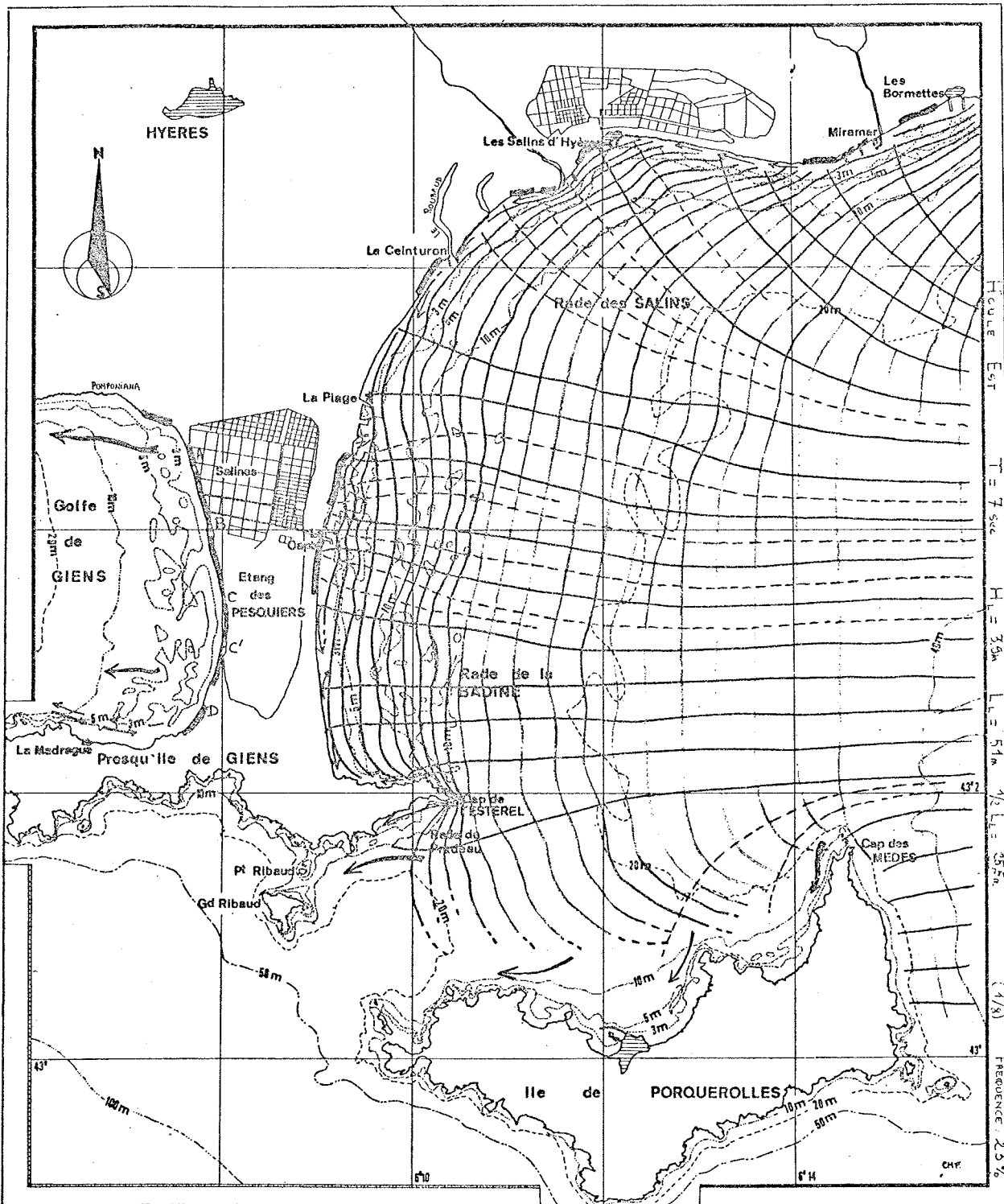
- mise en suspension des sables fins jusqu'à -60 m environ.

Comparaison avec les observations effectuées en plongée :

Les régimes de très fortes tempêtes et les mers "grosses" n'ont pu être directement observés en plongée. Les vitesses ont été calculées à partir des paramètres mesurables. L'observation directe a porté sur l'examen des fonds immédiatement après un gros temps : érosion des herbiers, état des chenaux, repères sur le fond, ravinements, galets tractés, matériaux déplacés, etc...

On peut se demander s'il y a une concordance entre les états "calculés" et les situations réelles du niveau des fonds. Cela nous amène aux remarques suivantes :

1° - En baie de Giens, à l'Ouest du tombolo occidental, les ravinements sous-marins et les remaniements de sédiments et de galets littoraux se manifestent jusqu'à -12 et même -15 m. L'action des courants compensateurs peut se prolonger en-deçà. Les vitesses réelles d'érosion, par très fortes tempêtes, paraissent supérieures aux valeurs calculées. Ces dernières sont des moyennes tandis qu'une "pointe" de vitesse réelle, même très brève, est accompagnée d'effets naturels et observables au niveau du fond.



- Zone érodée
- TRANSFERTS, LONGSHORE CURRENTS
- Zone calmatée
- COURANTS DE DÉRIVE

2° - En rade d'Hyères, à l'Est de la Capte et du port d'Hyères, les ravinements sous-marins et les remaniements se suivent jusqu'à -30 m. Les érosions sont encore très sensibles à 20 m de profondeur et des épandages bio-clastiques sont remaniés par gros temps jusqu'à -40 m. Mais en ce secteur, la présence d'un herbier vivace à Posidonies, jusqu'à -32 m, protège les fonds par la consolidation du sédiment des "mattes", ce qui n'est point le cas pour la baie de Giens où l'herbier très dégradé demeure en voie de régression rapide.

Il y a ici une meilleure concordance entre les effets réels, plus ou moins épisodiques, et les vitesses théoriques. Les mouvements naturels, plus rapides que les déplacements calculés sont en fait compliqués par les circuits courantologiques curvilignes de la rade d'Hyères et le système des courants sagittaux auxquels s'ajoutent des oscillations de seiches.

3° - Il est difficile d'évaluer les pentes sous-marines du fait des irrégularités liées aux herbiers : "mattes" et "tombants", massifs isolés amenant la concentration des orthogonales, ressauts et "contre-pentes", marmites d'érosion et dépressions fermées, de -5 à -20 m. Or, les calculs considèrent des pentes régulièrement inclinées. Il nous faut tenir compte, sur ces fonds d'herbiers, de freinages et turbulences complémentaires sans lesquels, d'ailleurs, les tombolos de Giens n'existeraient plus.

LE TOMBOLO OCCIDENTAL.

Description :

Long de 4.500 m, large par endroits de 80 m, le tombolo occidental de Giens, supportant la "route du sel", est une construction sableuse mince et fragile.

Tout au long de ce tombolo il a été défini plusieurs sites de surveillance, du Nord au Sud (fig.1) :

- Point A : plages situées au Sud de l'Alternance et au Nord de l'émissaire actuel de la ville d'Hyères.

- Point B : plage dite de "Passe Pied", à 700 m au Sud du débouché de l'émissaire. Tombolo aminçi (borne Q).

- Point C : sensiblement au milieu du tombolo W, flèche encore très aminçie.

- Point C' : à 600 m au Sud de C, là où change la courbure du tombolo W dont la ligne adopte une direction NNE-SSW.

- Point D : plage Sud du tombolo se raccordant à l'"île" de

Giens, en bordure de dune et marécages. Au Sud de D (450 m au SW) s'amorce le départ de l'émissaire sous-marin de Giens.

Les zones menacées correspondent aux segments AB, BC. Après de fortes tempêtes d'Ouest, en C, la largeur du tombolo se trouve réduite à 50 m alors qu'en 1956 elle était de 80 m (Blanc, 1960). En C", l'amaigrissement a réduit cette largeur de 90 à 75 m en quinze années. Des compensations à ces retrécissements ont été apportées par des remblaiements du côté oriental, en bordure de la roubine bordant l'Etang des Pesquiers. Néanmoins une possibilité de rupture demeure possible pour les secteurs définis par les segments AB, BC, par tempête très forte ou exceptionnelle d'Ouest ou W.NW, combinée à une "marée barométrique" (1).

Matériel sédimentaire :

De l'embase Nord (Pomponiana, l'Almanarre) jusqu'au point C', on observe un cordon littoral et une plage à forte pente formée de petits galets quartzeux, granules et sables grossiers coquilliers. Le matériel montre une origine mixte :

1° - Galets, granules et sables quartzeux détritiques issus des horizons du Permien et Trias inférieur. Cet épandage sub-fossile est lié à un cours ancien du Gapeau dont le débouché se situait à l'Ouest du Mont Fenouillet (Lutaud, 1924).

2° - Amas coquilliers fossiles, sub-fossiles et actuels dressés à la côte et formant des cordons ou des "beach cusps". Cet apport bioclastique prépondérant est issu en grande partie de l'érosion des vases, limons et sables versiliens formant le soubassement de l'étang des Pesquiers et des tombolos, comme le montrent les sondages. Ces sédiments, lagumomarine, riches en *Cardium*, *Ostrea*, etc..., s'étendaient vers l'Ouest, en baie de Giens, où ils ont été retrouvés en plongée jusqu'à une profondeur de 6 m, associés à des passées grésifiées (2).

A partir du point C', jusqu'à l'enracinement méridional on note un changement dans la composition du sédiment littoral :

1°) Apparition de minéraux lourds (grenats, staurotide), issus du massif métamorphique de Giens et des ectinites des Maures (séries de

(1) Les "marées barométriques" montrent des dénivellations sensibles dès 750 mm ; à 742 mm on peut observer une surélévation du plan d'eau de 0,60 m.

(2) Nous mentionnerons la découverte de ponces flottées, analogues aux échantillons trouvés par Jahandiez à Porquerolles, et provenant de l'archipel volcanique des Lipari.

Loli et des Berles), devenant de plus en plus abondants vers le Sud.

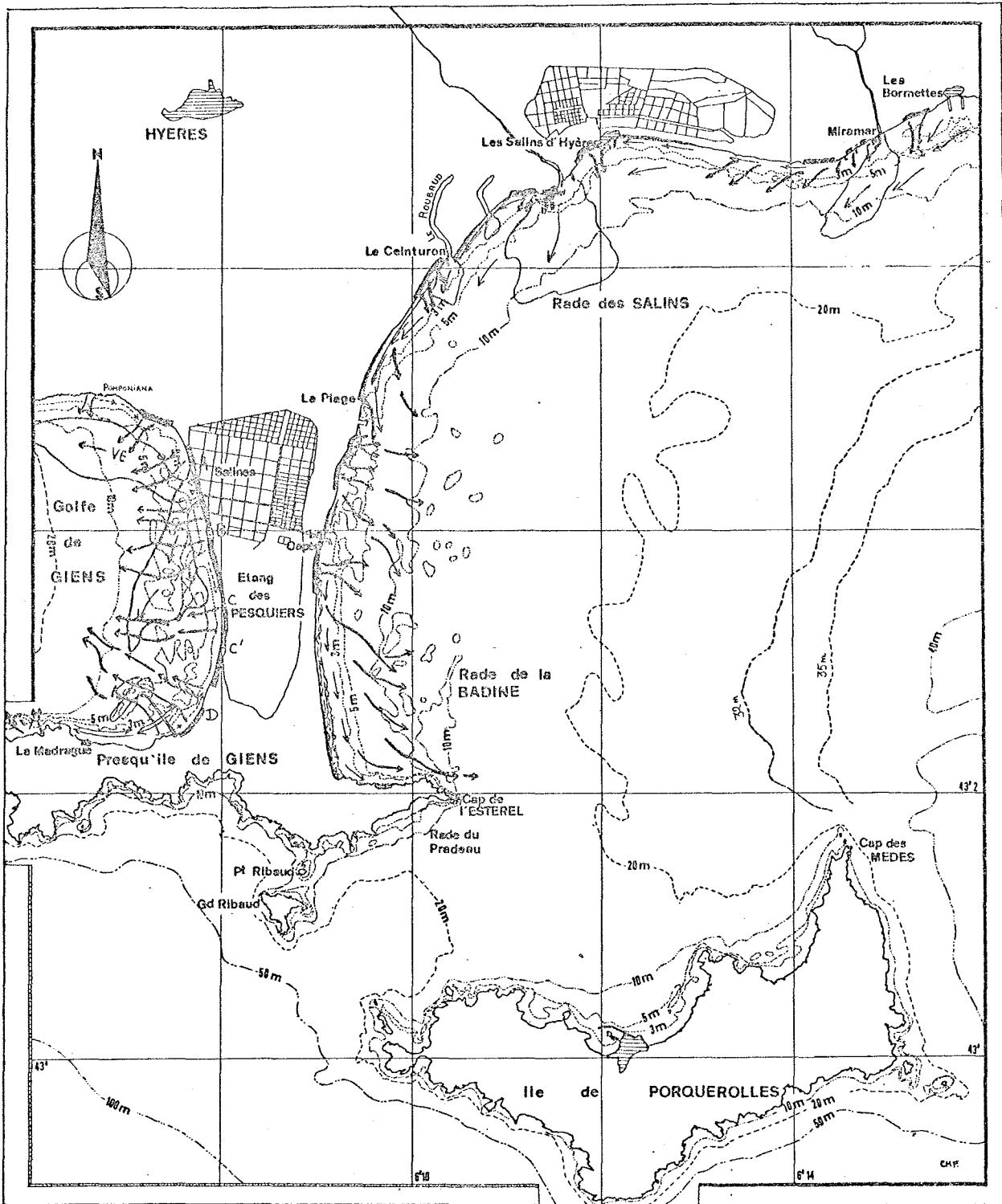
2°) Apparition d'un nouveau stock quartzeux, d'origine métamorphique et filonienne, donnant des galets ferrugineux irréguliers, d'allure cérébroïde. Ce matériel, issu de Giens, provient de l'érosion du piedmont quaternaire (éboulis et limons rubéfiés würmiens, (Blanc, 1958). Ces galets contrastent avec les galets septentrionaux, issus des anciens cours du Gapeau, d'origine permo-triasique, blancs, limpides et très régulièrement ovoïdes.

Le stock bio-clastique initial et les plaques de grès remaniés subsistent, dans les secteurs érodés au Sud de C' et D, sous le cordon en voie d'amaigrissement, on observe de petites concentrations de minéraux denses (grenats, staurotide, disthène, oligiste, magnétite, etc...). Entre le point D et le départ de l'émissaire Sud, on relève d'autres accumulations, notamment après les périodes d'amaigrissement (augite (T. Abond.), staurotide (T.A.), oligiste, magnétite (A), hornblende (A), grenat almandin (A), micas, disthène, etc...

Le déferlement des vagues obliques, à l'Almanarre et au point A détermine la formation d'un système de "beach cusps" dont les longueurs (distances d'une "corne" à l'autre) diminuent vers le Sud ($L = 3 \text{ m}$ à $1,5 \text{ m}$), en fonction de l'amortissement et d'une légère dérive littorale. Après les gros temps d'Ouest, on observe la formation de deux "générations" de "beach-cusps" emboîtées : au rivage : $L = 3 \text{ m}$, circonscrite par une autre ligne plus interne où $L = 11 \text{ m}$. Ces figures traduisent l'oscillation d'ondes de Bragg vraisemblablement liées à des réflexions et diffractions sur la côte rocheuse (Pompaniana) où les affleurements sont nombreux ainsi qu'au niveau des grandes "mattes" érodées et des plages septentrionales à fortes pentes. De ce fait, malgré la force des vagues incidentes et les déferlements spectaculaires, ce secteur demeure en équilibre sédimentaire.

L'étude granulométrique sommaire du tombolo occidental montre des irrégularités continuelles liées aux "beach-cusps", zones d'érosion, et de départ des courants sagittaux, cordons de galets et de coquilles, fragments indurés et grésifiés de sédiments laguno-marins rejetés au rivage, etc... La dérive Nord-Sud, observée en pleine eau ne s'accompagne point d'un véritable transfert sédimentaire général mais, entre les zones de départ des courants sagittaux ("concavités" à forte érosion), on note de faibles déplacements, complexes, locaux et irréguliers du sédiment dans le sens Nord-Sud ou réciproquement.

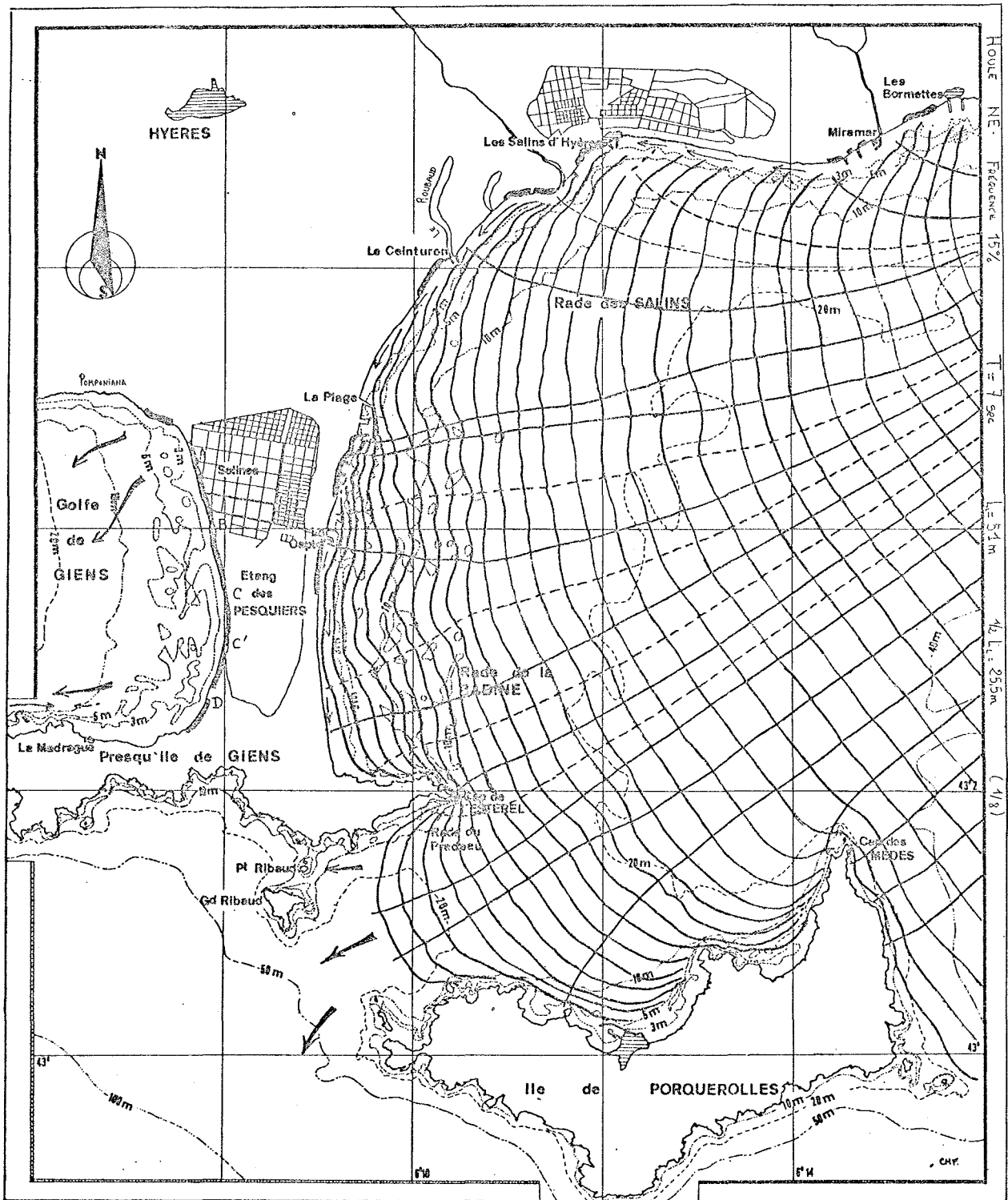
Par régimes W.SW ou SW, on observe une dérive SW-NE remontant le long du tombolo W. Cette dernière est responsable de petits transferts locaux et irréguliers de faible importance pouvant déporter certains minéraux



- - - - Zone érodée
 - - - - Zone engraisée
 - - - - Courant de seiche

- - - - Longshore current
 - - - - Dérive temporaire
 - - - - Courant de fond (érosion s. marine)

- - - - Extension des pollutions
 - - - - Ride littorale
 - - - - Rides, frotins et nodales (seiches, etc.)



 Zone érodée
 Zone calmée
 TRANSFERTS, LONGSHORE CURRENTS
 COURANTS DE DÉRIE

métamorphiques de Giens jusqu'au point C' et même, parfois, jusqu'en C (fig.2).

Cependant, compte tenu de ces remarques, le rivage du tombolo occidental n'est point l'objet d'un véritable transfert systématique comme cela est le cas pour l'isthme oriental.

Le courant de seiche, au Sud du golfe de Giens, orienté Ouest-Est et vice versa, ne semble point être accompagné d'effets sédimentologiques mais intervient dans la dispersion des effluents de l'émissaire méridional.

Les inflexions du tracé littoral du tombolo W correspondent aux zones de départ des courants sagittaux et, pour le point C, aux limites de régimes à incidences préférentielles :

- au Nord de C : dérive du Nord au Sud, déportant les effluents de l'émissaire d'Hyères en zone méridionale de la baie de Giens (fig.1,2). Incidence des houles : 290, 280 jusqu'à l'azimuth 268.

- au Sud de C, une dérive du SW vers le NE a été confirmée par des colorations et visées sur flotteurs.

Un facteur de protection inattendu : les grès sous-marins :

Découverts en 1957 et publiés en 1960 (J. Blanc), ces bancs gréseux sous-marins s'étagent de -2 à -6 m. Il s'agit de "beach-rocks" correspondant à des indurations en zone médio-littorale liées à des anciens niveaux phréatiques. Ces derniers sont responsables de la cimentation calcitique, souvent ferrugineuse. De petits sondages dans les formations pélagiques laguno-marines, près de l'étang des Pesquiers et des points C et C' ont mis en évidence des indurations partielles accompagnées de rapides concrétionnements ferrugineux ("fer des maris") (1). En certains cas, les arénites ont été suffisamment exposées pour se trouver ciselées de stries de déflation liées à l'orientation du vent dominant (Mistral : NW ou W.NW).

Ces "beach-rocks" jalonnent une succession de niveaux marins, de -6 m à -2 m ; leur inclinaison, assez forte, (quelques degrés vers l'Ouest, W.SW et W.NW), rappelle celle des plages actuelles du tombolo dont ils épousent le tracé. Leur faune et microfaune laguno-marine ne diffèrent guère de l'actuelle et les recherches locales nous indiquent qu'il s'agit de plusieurs niveaux très récents de la remontée versilienne, vers 1.500 à 3.500 ans B.P. Ce sont des grès quartzeux isométriques ou des grès hétérométriques à *Ostrea* et *Cardium edule*.

(1) J'ai observé, près de C' et D, dans les marais et sur l'arrière plage, des grésifications récentes accompagnées de concrétions ferrugineuses cimentant des mines et autres débris métalliques enfouis.

En plongée, on note la fissuration et le déchaussement rapides de ces grès sous-marins :

- en 1903, seules les "roches" devant B et C affleuraient.
- en 1950 et 1953, j'ai observé le dégagement des grès, initialement recouverts de sédiments meubles et de "mattes", devant C' et D.
- en 1972, à la suite d'une phase d'érosion sous-marine liée à la dégradation des herbiers à Posidonies, une "ceinture" grésifiée apparaît depuis l'Almanarre, "doublant" vers l'Ouest l'ensemble du tombolo occidental de Giens, formant un radier résistant et protégeant l'isthme d'une destruction rapide.

Cette dalle résistante devra être soigneusement étudiée par des forages. Elle constitue une assise intéressante sur laquelle pourraient être établies des défenses frontales rapprochées.

Les courants sagittaux et l'érosion sous-marine :

Le flux pénétrant par gros temps d'Ouest en rade de Giens est dirigé vers le rivage du tombolo occidental. La compensation est assurée par un système de "rip-currents" ou courants sagittaux (Rivière, 1951 ; Blanc, 1958 ; Arbey, 1959), sortant de la rade par de nombreux chenaux en érodant le fond.

Signalés en 1960 (J. Blanc), ils montrent un développement accru depuis la dernière décennie. Les comparaisons bathymétriques réalisées par Maggi (1973) entre les relevés hydrographiques de 1896 et 1969 montrent une érosion et un creusement accentués des fonds à -3 et -5 m ; les ablations s'observent encore d'une manière systématique de -10 à -18 m, aux dépens des herbiers à Posidonies et ce, bien antérieurement aux épandages et pollutions récents. Les phénomènes de creusement sous-marins correspondent à des ablations pour des épaisseurs de 1 à 3 m, depuis 73 ans, notamment aux chenaux situés au Sud de l'Almanarre (Ouest du point A), à l'Ouest des points B, C et C', au Nord de la Madrague de Giens et à l'Ouest du point D.

Les caractères essentiels de ces chenaux empruntés par les courants de décharge sont les suivants :

1°) Tracé généralement perpendiculaire à la ligne de cote. Ils se poursuivent en moyenne jusqu'à des profondeurs de -10 m ; on peut cependant les suivre jusqu'à l'isobathe 20 m.

2°) Largeur moyenne : 100 à 300 m, forme sinueuse, rarement rectiligne. Leur creusement amène la formation de "tombants" de 2 à 5 m dans la "matte" de l'herbier à Posidonies.

ALMANARRE

Port Hyères

A

B

C

C'

D

ETANG

des

PESQUIERS

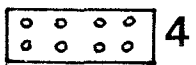
La Capte

GIENS

N



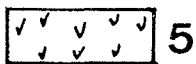
1



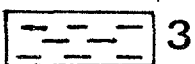
4



2



5



3

1 Km



3°) La zone de départ au rivage correspond à une concavité de la ligne de la plage où se manifeste une érosion parfois rapide (points B, C et C'). Le chenal peut être alors très large (100 à 400 m), évasé, creusant faiblement les dalles du "beach-rock" ou les sables du prisme littoral.

4°) Après un trajet sous-marin variant entre 600 et 2.300 m au maximum, s'observe une zone d'amortissement où s'effectue le délestage du sédiment en transit. Cette zone située à 7, 9 ou 18 m de profondeur selon les cas, est marquée par un épandage sédimentaire hétérométrique formant un lobe d'apparence deltaïque étalé vers le large (fig.5).

A cette profondeur-limites cessent les phénomènes d'érosion mais l'herbier continue à régresser par l'action de ces colmatages au terme des transits. Des chenaux juxtaposés peuvent être coalescents au niveau de ces lobes sous-marins.

5°) Le matériel sédimentaire relevé dans les chenaux et les lobes des courants de décharge est très varié, hétérométrique et issu de la zone littorale ou de l'herbier à Posidonies : sables fins ou grossiers, galets de quartz hyalin (Permo-Trias), galets ferrugineux de Quartz cérébroïde (éboulis würmiens littoraux ; Giens), blocs et fragments de phyllades, "beach-rock" et matériaux provenant des défenses en enrochements de la "route du sel" (calcaires gris du Muschelkalk ; blocs de 50 kg).

6°) Au dispositif des chenaux transverses, perpendiculaires au littoral (courants sagittaux) s'ajoutent des couloirs d'érosion liés à des isobathes bien déterminées et parallèles à la courbure du rivage. De tels chenaux longitudinaux sont également bien développés en bordure du tombolo oriental, notamment entre le Pansard et les salins d'Hyères (tombants de 4 m dans des "mattes" datées par des amphores ; type III Dreyssel), au Ceinturon et au Nord de la Capte.

Ces sillons longitudinaux se situent à des profondeurs de 4 m, 6 à 7 m, 16 à 17 m, selon les cas. Ils peuvent être occlus ou reliés entre eux formant alors des "couloirs" sinueux mais à des profondeurs constantes. Lorsqu'ils recoupent les chenaux transverses, au large des points C et C', l'érosion sous-marine est fortement accentuée et ce "quadrillage" amène une dissection rapide des "mattes".

Les sillons longitudinaux paraissent liés aux lignes majeures du déferlement par gros temps. Les chenaux transverses sont le résultat des courants de décharge compensant la surélévation hydrostatique manifestée aux rives du tombolo occidental, ce dernier se comportant comme un barrage vis-à-vis des vagues d'Ouest.

7°) On observe d'autres formes d'érosion sous-marines à diverses profondeurs (de -1,5 m à -20 m) :

- "marmites" longitudinales (en fait, amorces de sillons longitudinaux isolés non encore anastomosés).

- "marmites" circulaires, elliptiques ou irrégulières, entièrement fermées et où s'accumulent les frondes et souches de Posidonies, les aegagropiles (1), les débris ligneux, amas de Codiacées, bidons, pneus, bouteilles et débris divers.

- trous de bombes et cratères d'explosions agrandis par les ravine-
nements.

Les mêmes figures s'observent au large du tombolo oriental et aux îles d'Hyères (Blanc, 1958).

La topographie de détail des chenaux transverses et longitudinaux "marmites" d'érosion, etc... est très variée et des levés précis au 1/10.000 seraient nécessaires. En fait, la multiplicité et la position changeante des axes de ravinement demeurent liés aux tempêtes exceptionnelles et aux particularités locales (déferlements, réflexions et diffractions).

Un herbier à Posidonies très dégradé :

L'herbier à Posidonies du golfe de Giens est en voie de régression rapide depuis plus de vingt années. En fait, les observations des usagers de la côte et les relevés de Maggi (1973), montrent que cette érosion sous-marine se trouve amorcée depuis au moins 70 ans.

A la Madrague de Giens, au voisinage de l'îlot de la Redonne, j'ai noté une érosion de 4 m, pour un "tombant" de l'herbier à Posidonies, en dix années (Blanc, 1960). Le substrat (phyllades) peut être mis à nu et certaines "mattes" ont totalement disparu.

Les causes de la dégradation rapide des fonds de l'herbier apparaissent liées :

1) aux érosions sous-marines : courants sagittaux, chenaux transverses, chenaux longitudinaux, déferlements. Ces facteurs mécaniques sont prédominants et se manifestaient bien antérieurement aux interventions humaines.

2) aux ensablements résultant de l'érosion des plages et petits fonds et du "décapage" des sables et limons versiliens grésifiés. Ces facteurs sédimentaires ne doivent être sous-estimés mais ils apparaissent

(1) Les "aegagropiles" sont des boules brunes, ovoïdes, véritables galets de fibres rouïes de Posidonies.

secondaires vis-à-vis des actions mécaniques.

3) aux pollutions récentes liées aux émissaires Nord (ville d'Hyères) et Sud (Giens) (fig.1).

- les dérives dominantes amènent un étalement en "queue de comète" vers le S.SW (régime normal).

- par régime d'Est, les dérives déportent les effluents vers l'Ouest et l'W.NW, tout au long du littoral, de l'Almanarre à Carqueiranne (fig.3).

Ces mouvements sont mis en évidence par des photographies aériennes, des colorations artificielles et des cheminements de flotteurs presque entièrement immergés et repérés à partir de bases à terre (points A et B).

Après le rejet, une fraction notable (mais non exactement évaluée) des pollutions "fines" et "macroscopiques" revient au rivage sous l'action de la dérive normale (Ouest, Est) et des courants de seiche. Ainsi, la belle plage du tombolo occidental de Giens a été interdite au public tandis que la zone Sud (Madrague de Giens), très fréquentée, demeure affectée par les pollutions. L'herbier de la Madrague de Giens et son "récif-barrière", étudié par Molinier et Picard (1951) se trouvent menacés et déjà fortement altérés. De ce fait, les craintes des riverains s'avèrent justifiées.

L'installation récente d'un émissaire à -10 m et à 1.200 m du littoral, au Nord du golfe de Giens, à 1.050 m dans le 255 du point A doit être déconseillée car les effluents seront affectés par l'hydrologie de la baie de Giens et reviendront partiellement au rivage sous l'action des vagues d'Ouest. D'autre part, les incidences exactes de la seiche ne sont point exactement connues. Enfin, la dégradation des herbiers, remplacés par des peuplements proliférants à Codiacées (*Codium tomentosum* et *Codium bursa*) sera accentuée.

La solution rationnelle, à mon sens, consisterait en un rejet au Sud de Giens, à une profondeur de 55 m dans le 195 de la pointe des Morts, après une étude hydrologique et bathymétrique détaillée (1).

Les risques d'érosion du tombolo occidental :

La menace est double :

1) chocs des vagues déferlantes (surtout régimes d'Ouest, du 260 au 295) et élévation du plan d'eau. La surélévation résultante peut amener en certains points (B et C), la submersion temporaire du tombolo et la coupure de la route reliant Giens à l'Almanarre.

(1) Cette proposition s'avère, à peu de choses près, analogue à celles fournies par G. Cooper et P. Maggi (1973).

2) affouillements et reculs des plages aux zones de départ des courants sagittaux. Ces reculs peuvent localement atteindre plusieurs mètres en quelques années (1). Ces ablations ne sont qu'incomplètement compensées et il s'ensuit un déficit sédimentaire aux zones B, C et C'. La zone A maintient un tracé à peu près équilibré tandis que la zone D, au Sud, directement abordée par les vagues obliques est également érodée (micro-falaise, talus, murs écroulés) mais cette ablation, moins grave, n'est point susceptible d'extension ou d'érosion du tombolo.

Les déchaussements de la dalle de grès ("beach-rock"), la dissection des herbiers et l'érosion des "mattes" accentuent les affouillements au littoral. Le sédiment grossier, arraché aux plages par les courants sagittaux et tracté à une distance parfois importante, ne revient que très incomplètement au rivage. Enfin, la dégradation des herbiers liée aux récentes pollutions s'accroît depuis 1959 à un taux inquiétant. Il demeure parfois difficile de séparer la part exacte relevant des facteurs mécaniques et des pollutions, mais les résultats globaux sont aisément discernables. En 1967, G. Cooper signalait une dégradation générale des "mattes" jusqu'à -6 m. Actuellement, j'ai noté une régression de l'herbier jusqu'à une profondeur de 20 m, imputable principalement aux facteurs mécaniques et sédimentaires.

Quoiqu'il en soit, les "mattes" de l'herbier ne remplissent que très insuffisamment leur rôle de "volant régulateur" protégeant le littoral de l'érosion. Cela constitue le problème majeur de l'érosion du tombolo occidental de Giens.

Les extractions sous-marines de sables et graviers ont amené une destruction des "mattes" jusqu'en 1880. Le résultat, direct ou indirect, a été un recul du tombolo de 60 m depuis 1890 (rapport A. Baudry, 1971) (2). Les bornes-repères ont disparu et Baudry cite la position en pleine eau de l'une d'entre elles en 1945.

L'exploitation sous-marine des "mattes" ne doit point être étrangère aux ruptures temporaires du tombolo survenues en 1854 et en 1917. Les causes observables ont été :

- très fort régime d'Ouest,
- dépression et eaux anormalement hautes.

La rupture a été très rapide et en moins d'une heure, l'isthme large de 150 m (au voisinage de l'actuel point C), a été recouvert par les

(1) Documentation des Ponts-et-Chaussées maritimes, observations aimablement communiquées par G. Cooper et recherches personnelles.

(2) "Annales" des Salines de Giens.

eaux. Le résultat a été le "remplissage" immédiat de l'étang des Pesquiers, l'invasion des Salins de la Capte et la perte de la production de sel.

En 1940 (tempêtes des 17 et 30 novembre) et en avril 1942, A. Baudry mentionne encore des franchissements de l'isthme en plusieurs points non précisés, probablement au voisinage de B et C. En 1958, le niveau a été temporairement exhaussé de 0,70 m ; depuis, G. Cooper constate au point B un recul de 40 m du tombolo. Personnellement, j'ai évalué une érosion de 15 m, ce qui est déjà suffisamment rapide et grave.

Du 27 au 28 décembre 1970, une tempête amenant une submersion locale et temporaire a coupé la route amenant une érosion de 2 à 5 m du tombolo au point B. Cette érosion a été mal compensée par la suite (1). En mars 1972, j'ai noté un nouveau recul de 1 m en 15 jours (point B, "Passe Pied"). L'affouillement est continu en B et C, même par beau temps. Seule la dominance des vents d'Est, pendant quelques jours, fonctionnant comme des "vents de terre", amène un léger engraissement temporaire. Mais, le point C demeure toujours en recul et constitue le secteur le plus menacé du tombolo occidental.

En l'état actuel, une rupture partielle de l'isthme occidental est possible et prévisible à courte échéance sous l'action d'une forte tempête d'Ouest combinée à une importante dépression amenant l'exhaussement du plan d'eau (240 mm, + 0,70 m). Le cas d'un "tsunamis" d'origine sismique n'est point envisagé ici, mais sa possibilité peut être raisonnablement admise sur notre littoral. Les dégâts seraient alors très élevés en ce secteur faible.

La protection du tombolo occidental de Giens :

1° - Zones très menacées à protéger dans les plus brefs délais :

Il s'agit des points B et C et de leur voisinage. L'érosion des plages est spectaculaire malgré quelques enrochements frontaux. Le profil du fond demeure assez abrupt ; des changements de courbure s'observent au départ des courants sagittaux. En face du point C, par 3 m de profondeur, un déferlement en volute est noté, sur une longueur de 400 m, au niveau de mattes dégradées. Des vagues de translation, insuffisamment freinées arrivent au rivage, déferlent à nouveau détruisant les anciennes et nouvelles défenses en enrochements.

(1) On note également un recul de plusieurs mètres, sans réelle gravité, au point D.

- en B, le tombolo montre sa plus faible largeur et la "route du sel" est parfois dégradée.

- en C, se présente la zone la plus menacée du tombolo.

2° - Zones menacées :

Entre les points C et C' : les houles sont déjà bien freinées sur des mattes à -5 m, puis à -3 m où l'on observe deux déferlements successifs avant l'arrivée au rivage. Cependant, depuis quelques années, la matte la plus proche de la plage, à -3 m, s'érode rapidement et le substratum grésifié apparaît. Dans un avenir proche, cette protection naturelle fera défaut. Le courant sagittal, à l'Ouest de C' est préoccupant par son importance et l'abondance des matériaux qu'il charrie vers le large. Ainsi, la portion littorale C C', quoique moins directement menacée que le "segment" B C, sera bientôt plus exposée qu'en l'état actuel.

3° - Zones faiblement érodées ou en équilibre :

- au Nord du point A et au Sud de C', de fortes houles et de gros déferlements au rivage sont étalés par la réfraction sur les "mattes" tandis que les dalles de grès protègent le littoral. Néanmoins, l'érosion sous-marine progresse par petits fonds au niveau des chenaux transverses et longitudinaux. L'herbier s'y trouve rapidement dégradé et l'accentuation des pollutions, la réalisation du nouvel émissaire risquent d'accentuer cette régression. A moyen terme, ce secteur risque d'être menacé.

- en D et au Sud de ce point, malgré quelques érosions locales et un soutirage de matériaux par les courants sagittaux, on observe une zone déjà mieux abritée et non menacée. On peut même observer quelques engraisements localisés mais temporaires.

4° - Les régimes érosifs, pour l'ensemble du tombolo, sont les dépressions avec brusques chutes ou remontées barométriques : de 752 à 762 mm durant la nuit, naissance d'un vent à 35 noeuds venant de l'Ouest, formation de vagues très cambrées montrant une hauteur de 4 m au large (T = 8 sec avec des écarts de 5 à 9 sec). Sur le littoral, l'élévation du niveau peut atteindre +0,70 m (27 octobre 1972). La vitesse du vent présente des "battements" à 20 ou 35 m, avec de rares maxima à 45 n. La pression minimale mesurée, ramenée au niveau de la mer, a été de 743 mm (9 et 10 avril 1973).

Les dérives calculées au large, en fonction d'une latitude de 43°04'N sont :

- pour un vent maximal de 45 n. soit 67m/mn
- pour un vent moyen de 35 n. soit 60m/mn.
- pour un vent minimal de 20n. soit 40m/mn.

ALMANARRE

Etang des Pesquiers

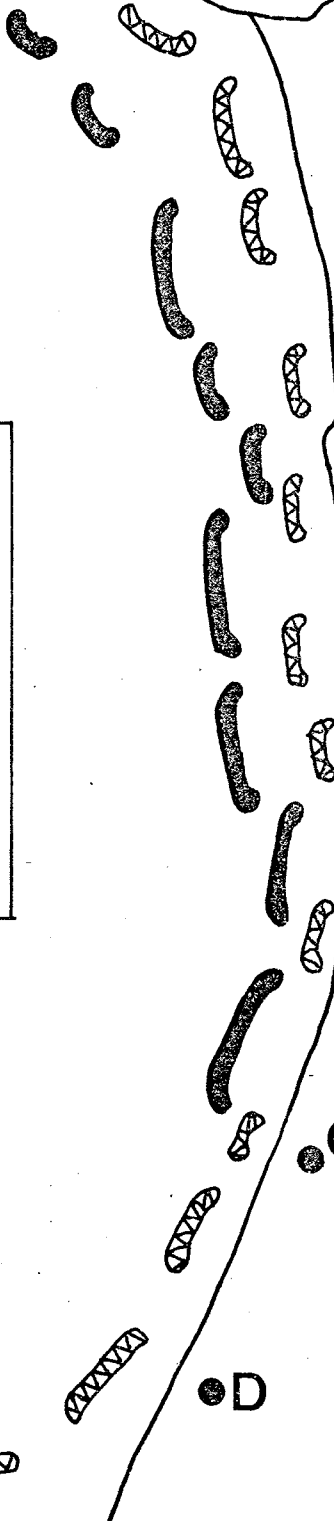
PROTECTION ELOIGNEE
BRISE - LAMES à - 5 m.

PROTECTION RAPPROCHEE
BRISE - LAMES à - 3 m.

N



1 km



A

B

C

C'

D

Les vitesses réelles par petits fonds, calculées au moyen de visées sur des flotteurs dérivants colorés sont plus élevées ou plus faibles selon les cas du fait de régimes pulsatoires, prise au vent des flotteurs et frottements contre le fond ou déviations au niveau des courants sagittaux. Chaque cas doit alors être considéré en particulier (de 90 à 40 m/mn).

5° - Suites à donner :

La protection la plus urgente devra être réalisée du Nord du point B du Sud de C. Dans un deuxième temps, il faudra traiter les segments AB et CC'.

L'absence de véritable transfert de sédiments du Nord vers le Sud (1) nous amènera à renoncer aux ouvrages transversaux, tels que les épis (qui amèneraient probablement une accentuation de la destruction du tombolo), pour adopter un système de défenses longitudinales.

Ces dernières pourront être des ouvrages frontaux en enrochements très lourds (blocs de 3 à 5 tonnes), très soigneusement réalisés, parallèles au littoral et aux isobathes, face aux segments AB, BC et CC' des plages.

On peut concevoir plusieurs options :

5.1 - brise-lames de protection éloignée sis à l'isobathe 5 m, recoupant les chenaux et les "mattes" dégradées. Cet ouvrage absorberait une partie de l'énergie incidente et réaliserait un déferlement au large du tombolo. Tout en réduisant le courant sagittal érosif, il ne devrait point s'opposer au renouvellement des eaux par upwelling. L'ouvrage devrait être élevé à +2,5 m et même +3 m si possible afin d'arrêter une partie des embruns et de s'opposer efficacement aux vagues.

Un brise-lame immergé à -2 m, sis sur l'isobathe 5 m serait insuffisant pour l'amortissement de vagues prévisibles (2) à T = 10 sec et H supérieure à 6 m.

Les tracés devront être interrompus tous les 300 m et légèrement infléchis vers le SSE (fig.6). Les "passes" larges de 100 à 150 m seront situées entre les points A et B, B et C, C et C'. Ces zones "découvertes" seront rapidement érodées. D'où la nécessité d'envisager une ligne de protection rapprochée.

5.2 - brise-lames de protection rapprochée sis à l'isobathe 3 m : ces ouvrages seront appuyés sur les "mattes" érodées, les grès et sables des chenaux. Ils recouperont transversalement une topographie sous-marine

(1) mais non l'absence de dérive.

(2) jamais observées (maximum reconnu en d'autres lieux : T = 9 sec, H = 5,5m).

tourmentée et des aménagements et modifications de détail devront être prévus. Là encore, on maintiendra une disposition parallèle au rivage.

Les enrochements soignés et lourds pourront être plus bas (+2 m); nous déconseillons ici encore, les digues immergées car il nous faudra tabler sur des hauteurs de vagues de 2,5 à 4,5 m. Leur distance à la plage se situera entre 280 m et 350 m en moyenne.

L'ouvrage sera interrompu de "passes" mais les secteurs situés en face des ouvertures du brise-lames de protection éloignée devront être obligatoirement endigués sous peine d'une destruction rapide du tombolo par accentuation du flot de retour. Un brise-lame de ce type devra être envisagé en face des points A et D (fig.6).

La disposition décalée des ouvrages de types 5.1 et 5.2 brisera les courants sagittaux érosifs en occasionnant deux déferlements avant l'arrivée du flux sur les plages. Les renouvellements de l'eau seront acceptables si l'on maintient des passes de 100 m munies de "cônes" réfléchissants immergés et si l'on renonce à déverser les effluents dans la baie de Giens. Nous considérons cette condition comme primordiale.

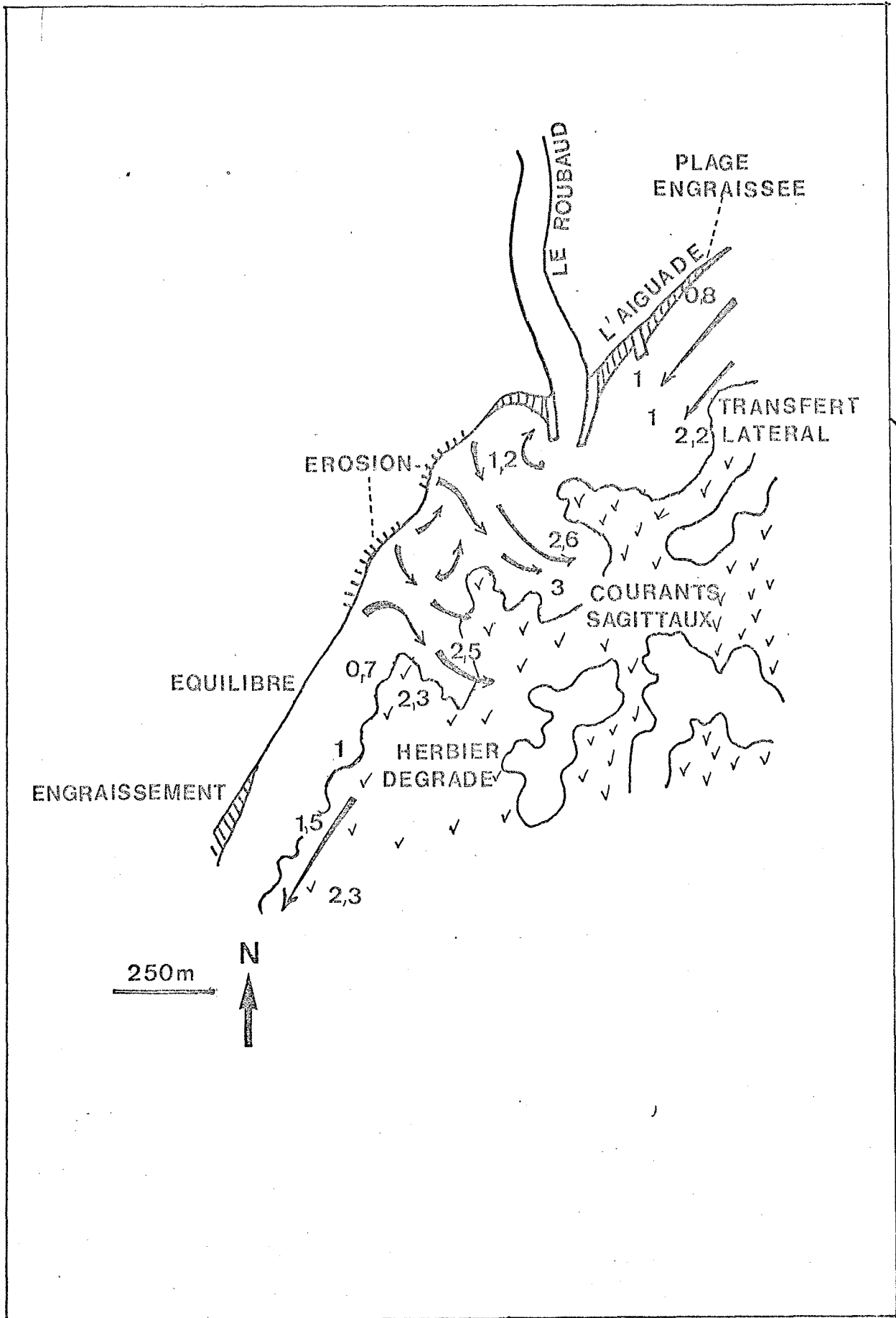
La construction des brise-lames éloignés et rapprochés sera coûteuse ; elle détruira des "mattes" à Posidonies mais ces dernières sont déjà fort dégradées en ces endroits. A ce prix l'on protégera le tombolo Ouest de Giens tout en créant des mouillages abrités et en augmentant, par des décharges appropriées de graviers "propres", la superficie des plages.

Des endiguements et enrochements au littoral pourraient être réalisés à la place des ouvrages 5.1 et 5.2, à un moindre coût mais la protection du tombolo serait médiocre et les courants sagittaux continueraient à dégrader les herbiers. Il faut néanmoins s'attendre à des fortes turbulences et des érosions sous-marines au pied des brise-lames frontaux. Pour celà il est indispensable d'effectuer une étude en modèles réduits et une prospection géophysique détaillée accompagnée de sondages à l'emplacement des assises lourdes.

TRANSFERT DU TOMBOLO EST.

Caractères généraux :

Un transfert, lié aux régimes d'Est (s.1) et à l'obliquité des vagues et houles, amène le cheminement des alluvions et troubles charriés par le Gapeau et le Pansard vers l'Ouest (Salins d'Hyères), puis le S.W (plage d'Hyères) et, enfin, vers le Sud (La Capte, l'Estanci). Ce mécanisme déjà connu (Blanc, 1957, 1958, 1960) se traduit par une érosion aux plages



de Miramar, à l'Ouest des Salins, au Ceinturon, à la plage d'Hyères et à la Capte tandis que s'engraisse la zone méridionale (Estanci, rade de la Badine), à l'enracinement du tombolo contre l'obstacle de Giens. Les autres portions du littoral demeurent en équilibre. Depuis 1958, la direction des chemine-
ments a été précisée, en plus des observations directes, par les analyses minéralogiques et granulométriques (Blanc, 1958 ; F. Picard, 1968).

Au terme du transfert où la sédimentation sous-marine et les pollutions "macroscopiques" prennent de l'importance se développent d'importants herbiers à Posidonies et Cymodocées.

La vitesse mesurée de la dérive littorale est variable : 25 m/mn en moyenne par vent de SE. Des maxima ont été observés à 40 et 50 m/mn mais aucune mesure directe n'a été effectuée par gros temps où le calcul donne des valeurs de 70 à 80 m/mn.

Erosions sous-marines :

Elles ne sont point liées, en baie d'Hyères, aux pollutions issues des émissaires. Seuls interviennent les facteurs hydrodynamiques et sédimentaires. On retrouve les chenaux d'érosion observés au golfe de Giens :

1°) Chenaux liés aux courants sagittaux, perpendiculaires au littoral dont ils accentuent l'affouillement. L'érosion s'effectue aux dépens des sables mobiles du prisme littoral, des "mattes" de l'herbier à Posidonies et probablement des fonds du "détritique côtier". Les "tombants" peuvent atteindre 4 à 5 m de haut. De tels chenaux se suivent bien jusqu'à des profondeurs de 6 à 8 m. Nous estimons qu'ils se prolongent en certains cas jusqu'à -11 m au Nord de la Pointe de la Badine où se réalise la décharge d'une amorce de circuit. La dégradation des "mattes" est très avancée et leur dissection n'a laissé que des îlots sous-marins irréguliers ceinturés de "tombants" (fig.5).

2°) Chenaux longitudinaux, parallèles à la courbure du littoral et au sens de la dérive moyenne, recoupant les chenaux transverses au large du Ceinturon, de la Capte, de la plage d'Hyères et de l'Estanci. Il en résulte un quadrillage très irrégulier avec formation de "mattes" isolées et très dégradées.

Les chenaux du Ceinturon (fig.7), de l'Hippodrome et du Sud de la Capte ont été étudiés depuis 1952 et 1954. Leur largeur varie de 15 à 200 m et les zones de départ peuvent être l'objet d'une érosion rapide : 20 m en trente années au Ceinturon, 10 m de recul entre 1952 et 1954 à la plage de l'Hippodrome. Des mesures directes ont été effectuées par beau temps ;

elles donnent des vitesses faibles, de 0,3 à 0,8 m/mn. Mais, par fortes tempêtes, ces axes de drainage doivent être balayés par des courants rapides ainsi que l'attestent des traînées de galets et de blocs de 2 à 3 kgr, remaniés et dépourvus d'enduits de Diatomées, caractérisant habituellement les matériaux "au repos".

A une profondeur variant de 9 m à 12 m, les herbiers se régénèrent et couvrent d'une façon homogène une pente régulière. Les sillons d'érosion n'en sont point absents pour autant ; on observe encore des irrégularités, "marmites" et contre-pentes jusqu'à -22 m et même à -40 m, -45 m, au niveau des sables et graviers du détritique côtier. Les influences sédimentologiques de ces courants de fond profonds, sortant de la rade d'Hyères sont actuellement en cours d'étude.

La conséquence pratique est une érosion générale des herbiers jusqu'à -12 m. En deçà, les ravinements sont atténués et compensés par la croissance active des Posidonies. Quant aux courants profonds, de -38 à -45 m, ils ne paraissent point présenter de conséquences préjudiciables. Seules les érosions, jusqu'à -12 m peuvent retenir notre attention car elles interviennent sur les ablations littorales au Ceinturon, à la plage d'Hyères et à la Capte. L'important chenal de décharge situé au Nord de la Pointe de la Badine "ferme" le circuit courantologique, érode activement les herbiers mais demeure sans effet sur le littoral rocheux ou la zone à forte sédimentation de l'Estanci.

Bilan du transfert :

On sait que les déferlements obliques donnent des transports d'eau dont la résultante est parallèle à la côte et dirigée dans le même sens que la houle. Le maximum de vitesse serait dans le déferlement le plus au large. Dans l'ensemble, il s'agit de transports pulsatoires le long de trajectoires hélicoïdales ou en "dents de scie" près du littoral.

Le débit maximum du matériel sableux transporté se situerait dans la zone de vitesse maximum du courant, près des premiers rouleaux déferlants (J. Larras, 1957) (mis en évidence par des mesures de turbidité, l'examen du déplacement de sables colorés ou irradiés).

La vitesse moyenne du transfert latéral varie de quelques décimètres à quelques mètres par seconde dans la zone du maximum des vitesses.

Pour J. Larras, après un assez grand nombre de mesures à la mer et d'expériences en modèle réduit, cette vitesse serait donnée par la formule :

$$v = K. \sqrt[3]{\frac{g \cdot h^2}{T}} \cdot i \sin 2 \alpha$$

... pour une plage stable, rectiligne, indéfinie.

h = amplitude des lames déferlantes,

T = période des lames

i = pente *moyenne* de la plage entre la ligne de rivage et la première ligne de rouleaux.

α = angle des vagues, *avant réfraction*, avec la ligne de rivage

g = accélération de la pesanteur

K = coefficient sans dimensions dépendant de la turbulence générale, de la quantité d'énergie de la houle et de la rugosité des fonds. Dans les cas moyens, on pose : K = 2,6

La vitesse doit être maximum pour une incidence de vagues déferlantes de 45°.

Par mer de vent d'Est, force 2, on note sur la plage située entre l'Hippodrome et la Capte, les valeurs suivantes :

h = 100 cm, T = 6 sec, i = 3 %, α = 25°,

d'où l'on tire, en C.G.S. :

v = 40,3 cm / sec.

Or, au Ceinturon, pour une houle SE, force 2, on mesure, dans la partie superficielle de la tranche d'eau, une vitesse de 77,2 cm/sec.

Cette vitesse peut s'abaisser à 50 cm/sec. au tombolo occidental de Giens pour une mer de force 3. Près de l'Estanci, pour une mer de force 1, l'eau se déplace latéralement à la vitesse de 20 cm/sec. Aucune mesure n'a été effectuée par gros temps.

Le transit littoral en suspension au cours des tempêtes est très délicat à évaluer et concerne des quantités importantes de matériaux se chiffrant à plusieurs dizaines ou plusieurs centaines de mètres cubes. Par très gros temps, la turbidité générale des eaux, se manifeste jusque par des fonds de 80 m. De ce fait, les épis ne doivent arrêter qu'une faible quantité de sédiments. Cette cubature "piégée" est estimée à 20 ou 25 % de la totalité du stock en transit (Bellesort et Migniot, 1972) et mesures du Laboratoire Central de l'Hydraulique de France (1960).

A Giens, nous pensons que le maximum de transit en suspension (et non en traction), s'effectuerait par des fonds de 0 à -5 m. Pour du sable fin, la formule simplifiée du L.C.H.F. exprime la cubature V des matériaux en transit, connaissant :

H = amplitude de la houle en mètres

T = période de la houle en sec.

a = obliquité de la houle par rapport à la ligne du littoral

t = temps de transit évalué en secondes (1 heure = 3600 sec,
1 journée = 43.200 sec).

On a :

$$V = 10^{-3} \cdot H^2 \cdot T \sin \frac{7a}{4} \cdot t.$$

. si $H \geq 3$ m (houles grosses de tempêtes), ces dernières transportent à elles seules près de 55 % du transit littoral pour une durée relative de 5,4 % du temps total.

. Si $H \leq 1,5$ m (houles moyennes et faibles), ces dernières ne transportent que 14,70 % des matériaux tout en agissant pourtant pendant une durée relativement importante : 78 % du temps.

. Les valeurs données par le L.C.H.F. sont les suivantes :

- transit annuel au Nord de l'Adour: 300.000 m³
- transit annuel à Lion-sur-Mer (Côtes de la Manche) : 50.000 m³
- transit annuel au littoral d'Israël : 800.000 à 500.000 m³
selon l'obliquité du littoral.
- Pointe Noire (Congo) : transit annuel de 400.000 m³, dont
300.00 m³ pour les fortes tempêtes
- Agadir (Maroc) : transit annuel de 400.000 à 450.000 m³

A Giens, on note les valeurs suivantes de a pour un régime moyen

E.SE :

- Salins d'Hyères : a = 5° à 10°
- Ceinturon : a = 6°
- La Capte : a = 6° à 11°.

Nous adopterons une valeur moyenne de 6° sans tenir compte d'écarts locaux ou temporaires ("fourchette" de 3° à 20°) liés à des réfractions réfractions (débouché du Gapeau) ou de diffractions (jetées d'Hyères et des Salins). Pour un gros temps avec $H = 3,5$ m au large et $T = 7$ sec, pour une journée de tempête continue, on a $V = 691$ m³.

Or, pour une moyenne annuelle de 26 % j/an concernant les régimes d'Est, SE et E.SE, en ne considérant que les gros temps avec W (vitesse du vent) supérieur à 30 noeuds, on obtient une proportion de 1,6 % du temps annuel total. D'où une moyenne calculée de 5,84 journées continues. Il en résulte une estimation annuelle de 4.035 m³ en transit pour la "tempête-modèle" définie.

Cette cubature doit être complétée par les transits de régimes "moyens" où $H \leq 1,5$ m, responsables de 15 % du transfert total d'après le modèle du L.C.H.F., soit 27 % du stock mû par gros temps et correspondant à 1.090 m³.

Le total moyen serait de 5.125 m³/an entre la Capte et l'Hippodrome. Cette valeur ne concerne que le transit littoral décelable correspondant seulement à 20 ou 25 % de la cubature totale en mouvement. En adoptant une hypothèse "basse", cette dernière pourrait être évaluée à 25.625 m³/an.

Ces estimations appellent les remarques suivantes :

1) Les évaluations statistiques des régimes nous conduisent à "bloquer" les durées de tempêtes en une seule période moyenne. Or, les "pulsations" et ondes de gros temps sont multiples et complexes. D'où la nécessité de mesures continues par houlographes.

2) Il n'est point tenu compte des régimes exceptionnels à T = 9 ou 10 sec., parfois 11 sec. Leur extrapolation par rapport aux diagrammes des houles dites "centenaires" donne une probabilité en pourcentage de 0,01 % comprise entre les marges limites des tempêtes "décennales" et "centenaires".

3) Les colmatages annuels retenus par les ouvrages d'Hyères et de la Capte ne doivent représenter qu'une fraction des sédiments transportés. La fraction pélitique, inférieure à 50 µ, est déportée au large et se décan- te sur les fonds du détritique côtier. Elle provient essentiellement des troubles du Gapeau et du Pansard.

L'estimation de cette cubature relativement modeste, en transit, doit être, liée à la charge modérée des rivières précitées. Elle n'encourage guère à l'édification d'épis supplémentaires interrompant un transfert déjà limité et amenant, par les affouillements observés au Sud des ouvrages, une rupture inutile de l'équilibre naturel.

LES SECTEURS MENACES DU TOMBOLO ORIENTAL DE GIENS.

Historique des observations :

Les secteurs menacés par l'érosion sont, de l'Est vers le SW, puis vers le Sud : les plages à l'Ouest des Bormettes (La Londe-les-Maures) et de Miramar, le littoral à l'Ouest des Salins d'Hyères et du débouché du Gapeau, la plage NE du Ceinturon à l'Ouest du débouché d'un "bras mort" du Gapeau nommé "Le Roubaud", les plages d'Hyères et de l'Hippodrome et une partie du littoral de la Capte, au Sud du canal du Gras faisant communiquer l'étang des Pesquiers avec la rade d'Hyères.

A) Port Pothuau et le débouché du Gapeau :

Le rapport Baudry (1971) fait état de très fortes vagues de vent d'Est déplaçant des blocs de 1800 kg à Port Pothuau. De plus, une érosion

au débouché du Gapeau se poursuit depuis plusieurs décennies. La comparaison des relevés des Ponts et Chaussées effectués en 1961 et l'examen des photographies aériennes (mission de 1967) montre une ablation fortement aggravée par une extraction sous-marine de galets et graviers pourtant autorisée à cet endroit. Il en a résulté, de 1961 à 1967, un recul de la flèche orientale de 30 m et sa disparition est maintenant totale.

Par fort Mistral et régimes W.SW ou SW, une dérive, en sens opposé au transfert se manifeste depuis la zone méridionale du tombolo (L'Estanci); jusqu'aux jetées du port d'Hyères, au Ceinturon et au Gapeau. Il en résulte une certaine compensation aux érosions naturelles des gros temps de vent d'Est, compensations dont le mécanisme se traduit par l'évolution et l'orientation préférentielle des flèches orientales ou occidentales et de la "barre" sous-marine, formée de galets, au débouché du Gapeau (Blanc, 1960) (1).

Sur cette "barre" du Gapeau, les déferlements peuvent être très violents ; une onde réfléchie sur des fortes pentes ou des obstacles artificiels se combine avec les houles incidentes. Le 9 novembre 1957, l'épi des Salins (débarcadère de la Marine Nationale) ainsi qu'une partie de la jetée du front de mer, ont été détruits en une dizaine d'heures. La surélévation du niveau peut alors atteindre +1 m à Port Pothuau et au débouché du Gapeau (arrachage de tétraédres et d'une partie d'un émissaire).

Les crues du Gapeau, liées aux périodes de forte pluviosité donc, le plus souvent, aux régimes d'Est (s.l.), amènent une recharge non négligeable en matériaux variés. A la suite d'une crue à +0,80 m, +1 m et d'un élargissement du Gapeau à 80 m au niveau de son embouchure, j'ai vu se former une flèche de galets de 60 m de longueur en quelques jours. La dominance des grosses houles d'Est (T variant entre 7 et 8 sec) a amené une orientation de cette flèche vers l'Ouest et les épandages ont enrichi le transfert. Ces engraisements automnaux et printaniers sont accompagnés d'une importante "macropollution". Aux sables et graviers accumulés s'adjoignent des centaines d'arbres, roseaux, etc... arrachés aux rives du Gapeau. Des troncs de plusieurs mètres sont ainsi flottés au Ceinturon, à l'entrée du port d'Hyères (2) et à la Capte (un tronc de 7 m a été récemment jeté sur la plage au Nord de la jetée ; mars 1973). Des tonnes de débris divers (pneus, ferrailles, bidons, bouteilles, etc... accompagnent les débris ligneux. Au début de février 1973, l'avancée du rivage a été de 12 m en quelques jours. Mais ces nouveaux cordons de galets et graviers, à forte pente (14°) sont très

(1) Observations effectuées de 1957 à 1960.

(2) Ces troncs affleurant ou situés sous la surface, plantés dans le sédiment, constituent un danger pour les plongeurs et la navigation.

exposés et rapidement dispersés par l'érosion.

B) Plage du Ceinturon :

Elle est située au SW de l'embouchure du Roubaud ("bras-mort" du Gapeau) détourné en 1882 pour l'assainissement des marais) et du port-abri de l'Aiguade. Ce port, ancien mouillage d'Hyères depuis le roi Saint Louis (1254 : cité dans le rapport Baudry), est protégé par deux jetées fonctionnant comme des épis.

Son recul aurait été de 30 m en une trentaine d'années (mais cette évaluation est peut-être exagérée). A plusieurs reprises, la route a été entaillée après une érosion complète de la plage par les vagues d'Est et S.E. Sur la plage, on note une ablation de 3 m en quelques années.

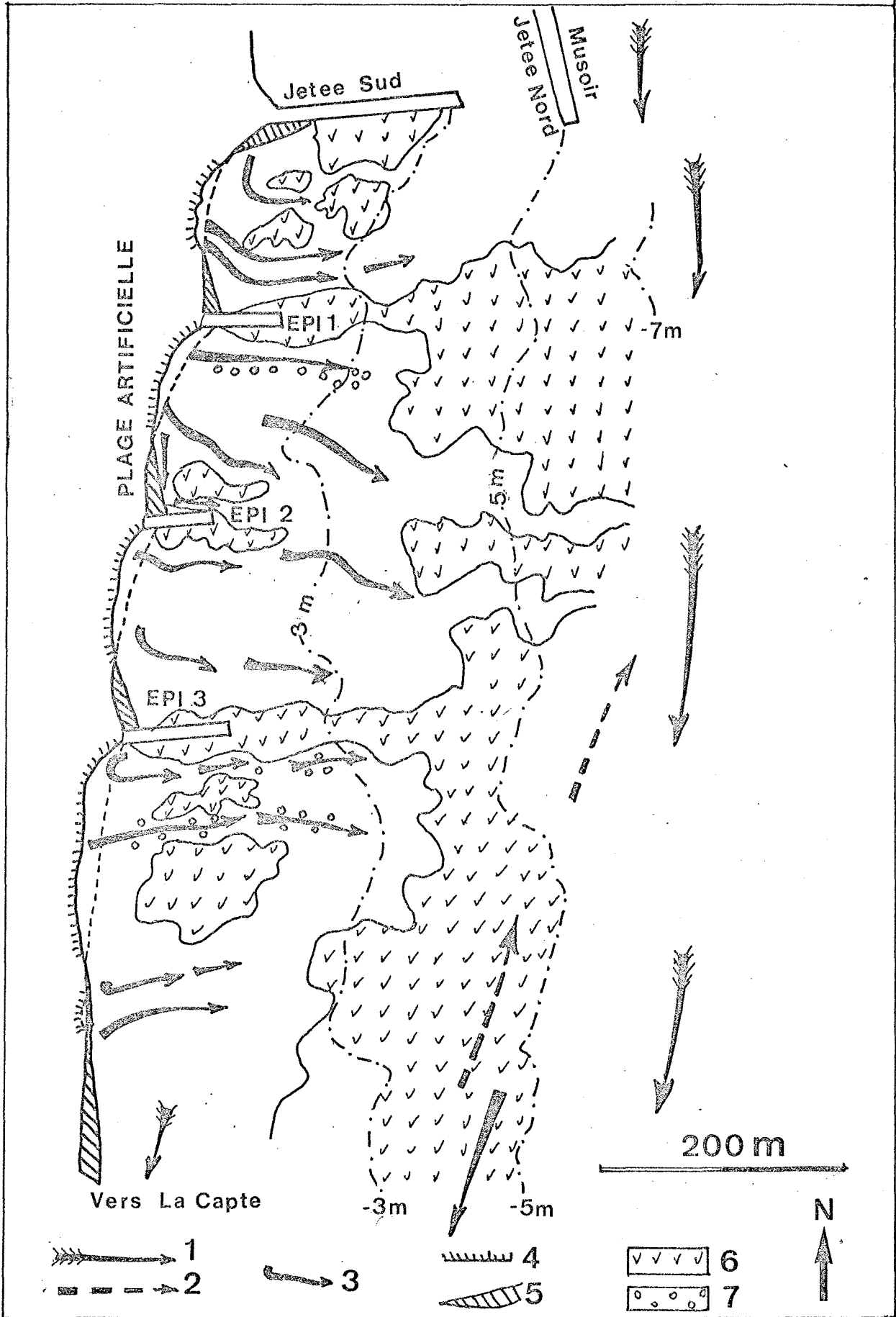
En plus des phénomènes de cavitations à l'Ouest des épis constitués par les jetées de l'Aiguade (fig.7), la plage du Ceinturon est affouillée par deux chenaux correspondant à des courants sagittaux ("rip-currents"). Pour un régime d'E.SE où $T = 7$ sec (1), $W = 22$ à 27 n, $L =$ au large = 77 à 80 m, $H = 2,5$ à 5 m au large, on observe un freinage très rapide de la houle et une diminution de la hauteur des vagues :

Z ~ PROFONDEUR	L Calculées	H Calculées	H mesurées	Vitesses du courant d'arrachement
10 m	60 m	4 m	?	
5 m	46 m	4 m	?	0,25m/sec
3 m	37 m	3 m	2,5 m	0,4 m/sec
2 m	30 m	2,20 m	1,8 m	0,5 m/sec

Lorsque le soutirage par les courants sagittaux est très actif, la pente de la plage s'accroît : de 16° à 8° . Même les gros blocs amenés pour protéger le littoral sont déchaussés. Cette zone demande à être rapidement protégée par un brise-lames s'opposant aux vagues incidentes et aux courants d'arrachement. Le niveau dangereux s'y établit à partir d'une élévation de $+0,60$ m, $T = 7$ sec, pente = 8° .

Une compensation, insuffisante, est apportée par Mistral et régimes d'Ouest où une dérive parfois rapide, s'établit en sens inverse ($V = 40$ à 50 m/mn).

(1) Correspondant à une "mer forte moyenne".



C) Plages d'Hyères et de l'Hippodrome :

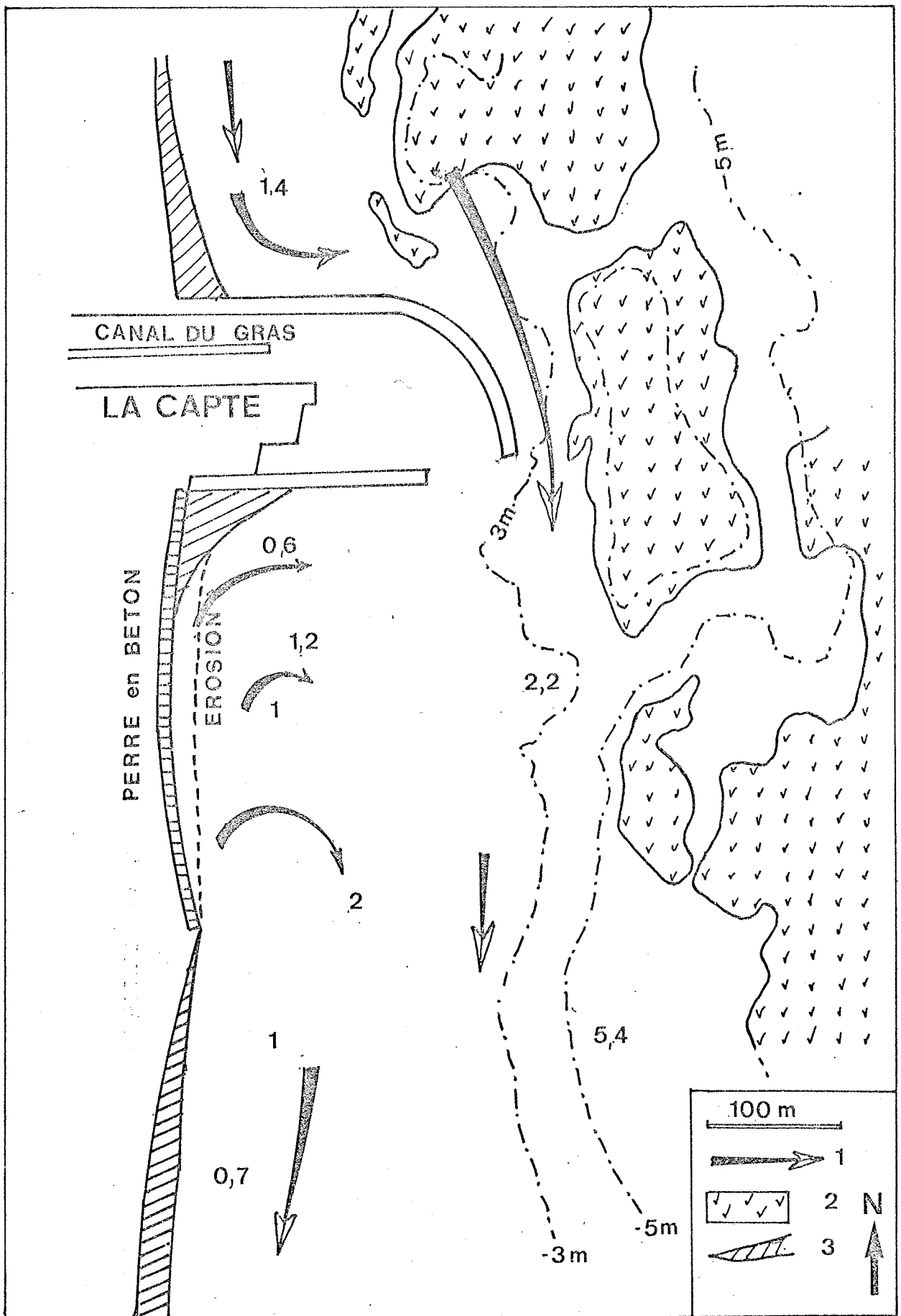
Antérieurement à la construction du port d'Hyères, j'avais observé sur la plage, en 1952 et 1954, des "rip-currents" (courants sagittaux) érodant activement le littoral ; un recul de 12 m fut constaté entre 1952 et 1954 (Blanc, 1958). La vitesse du flux de retour au large variait entre 0,6 m/sec et 0,20 m/sec. Ainsi, plusieurs villas sont menacées entre 1954 et 1956 ; quelques enrochements sont établis. L'examen des lieux me permet de situer quatre axes de courants sagittaux.

La création des jetées du nouveau port, de 1954 à 1956 perturbe cet état naturel déjà inquiétant en organisant un affouillement rapide en aval des ouvrages, tandis qu'une partie des matériaux en transfert se trouve capturée au NE et manquera pour compenser les érosions. Alors, tout le front de mer bâti au Sud du port d'Hyères, depuis la création de la nouvelle agglomération, se trouve menacé. Les remèdes apportés : enrochements, petits épis, apports de sable, se révèlent insuffisants et l'érosion se continue ; En 1963, la menace se précise pour les riverains (murs écroulés). Les reculs varient de 3 à 12 m en trois années. Ces plages deviennent alors les zones les plus vulnérables du tombolo (fig.8).

De nouveaux épis en enrochements sont construits et les plages sont engraisées artificiellement. En 1971 et 1972, on décide l'implantation d'une plage artificielle rechargée de galets et de sable fin provenant des carrières de Sainte Anne d'Evenos (Albien), l'ensemble étant maintenu par un tapis poreux en "bidium tergal", fixé sur la plage et le sillon pré-littoral.

En 1972 et 1973, le tapis en "bidium tergal" est pratiquement arraché et crevé tandis que le sable apporté, trop fin pour les conditions hydrodynamiques du site, tend à se disperser facilement. La plage "artificielle" est donc menacée ; ailleurs, l'érosion se poursuit et l'on mesure, en moins d'une année, des arrachements de clotures et reculs locaux de 2 à 3 m. Les épis sont déchaussés et contournés par les vagues obliques. Les pentes se raidissent de 8° à 11° et même 12° ; on note la formation de micro-falaises d'érosion entaillant les plages sur 0,40 à 0,60 m. Les galets remaniés se rassemblent en "beach-cusps", après une surélévation du niveau de +0,50 m. Dans ces zones érodées et lessivées, apparaissent quelques concentrations de minéraux denses (augite, grenats, hornblende, minerais métallique, etc...).

En l'état actuel, trois épis en enrochements ont été construits au Sud de la jetée méridionale du port d'Hyères. Entre les épis n°2 et 3 (fig.8), deux embryons d'épis inefficaces ont été établis. Malgré quelques



engraissements localisés au NNE des ouvrages, l'érosion se continue et, au Sud de l'épi n°3, cinq mètres ont été perdus entre 1971 et 1973. Plusieurs maisons sont très menacées malgré l'adjonction de quelques enrochements frontaux.

La dispersion au large se manifeste par des courants sagittaux situés entre les épis. Le sédiment littoral, blocs de maçonnerie, galets, etc... sont dispersés en deçà de l'isobathe 5 m. Les "mattes" sont très dégradées et creusées par des chenaux tout à l'entour des épis ancrés sur un herbier littoral et au large où les "tombants" montrent un front d'érosion sinueux, tourné vers le rivage. Des "noyaux" isolés de l'herbier à Posidonies, en voie de régression rapide, s'observent de l'épi n°3 à la Capte (fig.9).

L'inefficacité des épis amenant une érosion du littoral par relais successifs oblige à considérer très rapidement un mode de protection frontal.

D) Plage de la Capte :

On considère la plage située au Sud du débouché du canal du Gras, en face des maisons de la petite agglomération. Il n'y a pas de problème pour la plage du Nord constamment enrichie par le transfert au niveau de la jetée (fig.9).

Les érosions sont ici liées à des courants sagittaux et à la construction des jetées du port abri du canal du Gras. De 1955 à 1957, l'ablation, très rapide, oscillait entre 5 et 10 m (Blanc, 1958). Le maximum d'ablation fut observé après une surélévation de niveau de +0,76 m à la suite d'une tempête d'Est combinée à une marée barométrique. Plusieurs maisons furent considérées comme sinistrées et inondées. Le débordement du canal du Gras (+0,80 m) jusqu'à la route et l'envahissement des salines aggravèrent la situation (1).

Alors fut décidée la construction d'un "perré" en béton à profil défectant les vagues. Cet ouvrage frontal bien exécuté assure maintenant une bonne protection dans la mesure où l'élévation n'excède pas +0,60 m et où T demeure inférieur à 7 secondes.

Cependant l'amaigrissement se continue aux dépens de la seule plage sableuse où apparaissent les concentrations de minéraux lourds (2).

(1) Depuis le canal des Gras peut être momentanément obstrué par des martelières afin d'éviter l'inondation des salines ... mais non de l'agglomération !

(2) Présence de l'assemblage habituel au tombolo oriental : hornblende verte (A), chlorite, biotite, épidote, muscovite, grenat, staurotide, tourmaline, hématite, magnétite, etc... (F. Picard, 1968) (Assemblage de la rade d'Hyères).

Néanmoins, 4 m de plage ont été "récupérés" de décembre 1972 à mars 1973. En ces cas d'engraissement, le profil des plages passe à 6° et même à 4° vers le Sud.

A 2 km au Sud de la Capte la formation de rides obliques liées aux nodales des seiches accentue les colmatages et protège le littoral au-delà de la "zone d'ombre" des jetées où le transfert commence à abandonner le sédiment. La pente régulière du fond y atteint alors 2° à 3° et il n'y a aucun problème à l'exception d'une "macropollution" de plus en plus importante vers l'Estanci.

Causes de l'érosion :

On peut retenir trois causes essentielles, parfois liées :

- 1 - chocs des vagues obliques et déferlements,
- 2 - présence de courants sagittaux notamment au Ceinturon, à Hyères-Plage et à la Capte,
- 3 - Phénomènes de cavitation en "aval" des épis et des jetées avec de rapides reculs du littoral. Cette action bien connue est aggravée par le déficit en sédiment.

Régimes dangereux :

1°) Tempêtes d'Est, E.NE, E.SE marquées par de fortes houles à périodes de 7 à 9 sec. Des périodes de 3,2 à 8 sec peuvent être exceptionnellement observées mais nous ne disposons point d'observations systématiques et continues. Il serait très utile d'effectuer des enregistrements en baie d'Hyères afin de déterminer les houles maximales et de prévoir alors des ouvrages en conséquence.

Les vagues sont accompagnées de vents violents exhaussant le plan d'eau : les tempêtes peuvent amener des vents de 35 à 45 n avec des "pointes" à 50 n.

2°) Fortes dépressions : de 750 à 742 mm (cette valeur constituant un minimum observé). Il en résulte une marée barométrique non négligeable :

- . + 1,5 m à Marseille le 9 novembre 1957,
- . + 0,75 m à la Capte à la même date (1).

Une surélévation à +0,80 m entraîne une érosion accélérée de tous les secteurs. Entre +1 à +1,5 m, probabilité non négligeable, se manifesteraient des sinistres littoraux accompagnés de la destruction de maisons et d'équipements portuaires, inondations au niveau du Gapeau et aux abords du

(1) Deux maisons endommagées et dégâts aux jetées.

du canal des Gras (la Capte) ("raz-de-marée barométrique" en 1950 et en 1964). En 1950 (23 décembre), la combinaison d'une forte tempête de vent d'Est et d'une dépression a réalisé une montée des eaux évaluée à 0,76 m \pm 0,20 m (+ 0,80 m à Toulon, à 8 h et + 0,90 m, à cette même ville, à 20 h ; mesures du Service des Ponts et Chaussées, rapport Baudry).

LE TOMBOLO EST DE GIENS ET SA PROTECTION.

1° - On doit renoncer à l'édification d'épis et obstacles transversaux considérés isolément, générateurs de colmatages face au transfert mais aussi créateurs de zones d'érosion actives en "aval".

2° - Engraisser les secteurs menacés par des recharges en matériaux de qualité, dépourvus de limons et d'argiles, à granulométrie étudiée en fonction des caractères hydrodynamiques des sites à protéger (paramètres des houles, obliquité, exposition et pente des plages, relations avec les herbiers, etc...). Un granulats grossier ($\phi > 2$ mm) et propre apparaît souhaitable. Il convient d'éliminer les sables trop fins. Par ses caractères intrinsèques, le matériau devra s'opposer à la dispersion au large. Les blocs des jetées (1) devront être exempts de fissures et colmatages argileux afin d'éviter une fragmentation secondaire.

3° - Création de brise-lames frontaux afin de dissiper le mieux possible l'énergie des vagues avant que ces dernières n'atteignent les rivages. On ne devra point s'opposer au transfert mais l'utiliser. Chaque site devra faire l'objet d'une étude particulière (bathymétrie, hydrodynamique, sédimentologie).

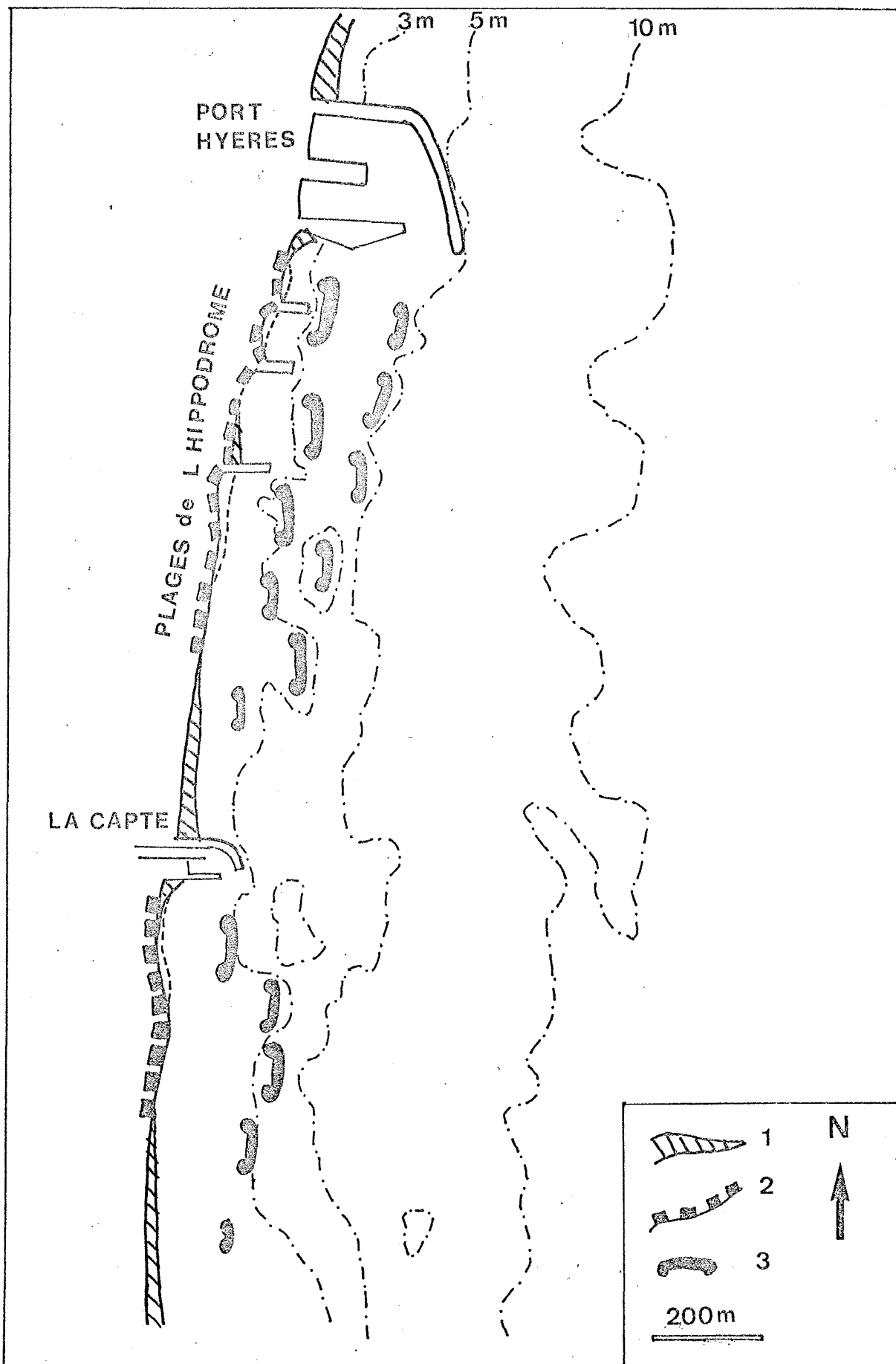
On renoncera à des ouvrages imperméables. On recherchera des blocs pesants (3 à 6 T), à forte rugosité.

4° - Caractéristiques des brises-lames proposés :

4.1 : Ils ne devront point être situés trop près du littoral à cause des turbulences et des affouillements importants qu'ils détermineront. Mais, une situation trop éloignée du rivage permettrait, après un premier déferlement, la formation de "vagues de translation" trop importantes et à fort pouvoir érosif.

Une immersion à -3 m, plus économique, ne semble point devoir

(1) Calcaires gris du Muschelkalk toulonnais.



être retenue du fait de sa proximité. Une situation à -5 m ou -4,5 m devra être calculée et réalisée en modèle réduit. Cela correspond à une distance du littoral oscillant entre 300 et 450 m.

. Au Larvotto (Monte-Carlo), les brise-lames, très soigneusement exécutés, résistent bien à de fortes houles. Ils sont situés à 120 m du littoral, pour une très forte pente qu'il a fallu artificiellement redresser (implantation à -7 m).

. Au Mourillon (Toulon), les brise-lames se situent à 150 et 200 m du rivage initial. Mais, dans ces deux cas, il s'agissait de plages artificiellement créées sur un littoral assez abrupt et exposé.

L'éloignement du brise-lame et ses interruptions diminueront les possibilités de pollution, ces dernières étant parfois préoccupantes à Renecros (Bandol), au Mourillon et au Larvotto. En aucun cas il ne faudra s'opposer au renouvellement des eaux par "upwelling".

4.2 : On évitera donc des brise-lames continus afin d'éviter les zones de décantations trop importantes et les pollutions, le "piégeage" de débris et bois flottés, etc... Leur longueur ne devra dépasser 200 à 250 m et ils devront présenter de larges ouvertures (fig.10).

Face à ces dernières, afin d'éviter une concentration de l'érosion et des soutirages de matériaux en zones découvertes, on édifiera des brise-lames très robustes à -3 m. Le décalage entre les défenses longitudinales rapprochées et éloignées favorisera les phénomènes de diffractions, réflexions et interférences d'où la possibilité de colmatages. L'extrémité des brise-lames sera arrondie vers l'intérieur, c'est-à-dire vers le rivage.

4.3 : On pourra utiliser, dans les passes ou autres secteurs exposés, des obstacles coniques immergés à -1 m (cônes de diffraction).

4.4 : Le poids des enrochements devra être élevé : plus de 2 T (1). Les brise-lames, parallèles aux directions générales des isobathes et du rivage ne devront point comporter de points anguleux accentuant les chocs et où se concentre l'énergie. Leur structure caverneuse sera perméable (brise-lames de Carnon) et pourra servir d'abri aux poissons et crustacés. Leur "fruit" (rapport base/hauteur) sera déterminé en modèles réduits ; il est possible d'envisager *à priori*, un fruit de 3/2 et une hauteur de +2,5 m au-dessus de l'eau (fig.10).

4.5 : En plus des études en modèles réduits, nécessité d'établir un brise-lame expérimental en vraie grandeur et d'en étudier le comportement

(1) On devra s'attendre à un tassement du sol sous-marin sous les brise-lames de 0,50 à 1 m selon les cas.

avant de passer à la phase définitive des travaux.

4.6 : Urgence des construction :

a) d'abord, les secteurs les plus menacés : Hyères-Plage et plage de l'Hippodrome.

b) ensuite, ouvrages du Ceinturon et de la Capte.

CONCLUSIONS.

Ces recherches, encore bien incomplètes, permettent de dégager les résultats suivants :

1°/ Les forces dominantes sont représentées par les régimes d'Ouest et d'Est à la limite des golfes du Lion et de Gènes. La formation des tombolos en est la conséquence directe combinée à l'héritage sédimentaire du Gapeau, des temps quaternaires à l'actuel. La presque île de Giens est maintenant l'objet d'une érosion assez générale liée à la faiblesse relative de la charge du Gapeau et du transfert, aux chocs des vagues, à l'action des courants sagittaux et aux pollutions - mais le processus de dégradation des sites était déjà bien amorcé antérieurement à l'extension de ces dernières.

Parmi d'autres phénomènes interviennent encore l'action des "marées barométriques" et des seiches.

2°/ Les érosions au niveau du fond et la dégradation des herbiers à Posidonies sont observées en rade de Giens et en baie d'Hyères. Par très gros temps, ces ablations se manifestent jusqu'à 10 m de profondeur, à Giens Ouest et par -20 m et probablement davantage à l'Est de la Capte et du port d'Hyères. Les profondeurs d'action sont fonction des paramètres des houles incidentes et des circuits tourbillonnaires dans les deux golfes.

La compensation hydrostatique, par fortes tempêtes, est réalisée par deux systèmes de chenaux.:

1) chenaux des courants sagittaux, perpendiculaires au littoral et responsables de rapides érosions, notamment au tombolo occidental de Giens.

2) chenaux longitudinaux, parallèles au littoral et aux isobathes recoupant les premiers et disséquant les "mattes" des herbiers à Posidonies.

Ces chenaux peuvent drainer les sédiments arrachés aux rivages jusqu'à des distances dépassant 2.500 m.

3°/ L'érosion sous-marine est active ; elle progresse aux dépens des herbiers à Posidonies, rapidement dégradés jusqu'à une profondeur de

20 m. En certains cas, cette dernière a pu être quantitativement évaluée. Il apparaît que les pollutions récentes, notamment en baie de Giens, accentuent le phénomène. Les principales modalités de ces ablations ont été décrites. Il en résulte un danger d'érosion pour le tombolo occidental de Giens malgré la protection sous-marine d'une formation sablo-limoneuse indurée ("beach-rock", sables consolidés), témoin d'un ancien rivage et actuellement immergée jusqu'à -6 m.

4°/ Malgré la généralisation des dérives de vents d'Est et de Mistral, seul le tombolo oriental, essentiellement alimenté par le Gapeau, est l'objet d'un véritable transfert littoral orienté de l'Est vers l'Ouest, puis vers le SW et le Sud. Mais les colmatages demeurent relativement modérés, notamment dans le secteur méridional (Estanci), comme le montrent les observations et le calcul.

5°/ Les régimes dangereux étudiés correspondent à des élévations du plan d'eau (+0,70 à +1 m) liées à des dépressions ("marées barométriques") et combinées à des fortes houles. Les secteurs très menacés sont le tombolo Ouest, les plages d'Hyères et de l'Hippodrome. L'érosion est encore manifeste au débouché du Gapeau, au Ceinturon et à la Capte.

La menace est actuellement l'éventualité d'une tempête exceptionnelle (T = 9 à 10 sec) coïncidant avec une dépression à 740 mm et une élévation du plan d'eau de 1 m. Il en résulterait d'importants dégâts sur le littoral et pour les fonds marins.

6°/ Sur le plan pratique nous préconisons :

6.1 : La suppression des pollutions dans le golfe de Giens par la création d'un émissaire au Sud de la presqu'île.

6.2 : La nécessité de ne plus édifier d'épis ou jetées transverses au tombolo oriental afin d'éviter les affouillements en "aval" accentués par la dispersion au large due aux courants sagittaux.

6.3 : L'implantation de défenses frontales décalées, éloignées (-5 m) et rapprochées (-3 m), sous la forme de brise-lames interrompus, parallèlement au littoral et aux tracés des isobathes. L'objet de ces enrochements lourds sera d'organiser les déferlements les plus violents avant l'arrivée des vagues au rivage. Par ailleurs, ces ouvrages arrêteront partiellement et modifieront le mécanisme des courants compensateurs et notamment des courants sagittaux déportant le sable des plages vers le large.

6.4 : les recharges de matériaux devront concerner un granulat propre et un sable grossier parfaitement équilibré vis-à-vis des contraintes hydrodynamiques et topographiques (pentes) des sites à protéger. Les

matériaux fins sont à proscrire.

6.5 : Les zones prioritaires à protéger sont le tombolo occidental de Giens, les plages d'Hyères et de l'Hippodrome. Viennent ensuite, la zone à l'Ouest des Salins d'Hyères, l'embouchure du Gapeau, le Ceinturon et la Capte.

REMERCIEMENTS :

Nous exprimons notre gratitude à Mmes C. Froget, O. Weydert, MM. A. Jeudy de Grissac, G. Cooper, M. Bernasconi (C.N.E.X.O) qui, directement ou non, nous ont aidé à entreprendre ce travail.

Contrats C.N.E.X.O. 71/401, 72/475 et 73/719.

BIBLIOGRAPHIE :

- ARBEY F., 1959. Observations nouvelles sur les croissants et les sinuosités de plages. *C.R.Ac.Sci.*, 248, (22) : 3187-3189.
- BAUDRY A., 1971. Rapport sur la presqu'île de Giens. Pont et Chaussées Maritime, Toulon, 32 p.
- BELLESSERT B. et MIGNIOT C., 1972. Plages et littoraux artificiels. *Etude du Lab. Central Hydr. de France*, 52 p.
- BLANC J., 1957. Observations sédimentologiques sur le littoral rocheux à l'Est de Marseille. *Rev. Inst. France Pétrole et Ann. Combustibles Liquides*. VII (4) : 411-420.
- BLANC J., 1958. Recherches de sédimentologie littorale et sous-marine en Provence occidentale. Thèse, Paris. *Ann. Inst. Océan. Masson*, 35 (1) 140 p.
- BLANC J., 1960. Etude sédimentologique de la presqu'île de Giens et de ses abords. *Rec. Tr. Stat. Mar. Endoume*, 33 (20) : 35-52.
- BONNEFILLE R., 1963. Etude de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu. *Bull. Direct. Etudes et Recherches E.D.F.*, 5, 67 p.
- LARRAS J., 1957. Plages et côtes de sable. *Collect. Lab. Central Hydr. France, Eyrolles*, 117 p.
- LEPETIT J.P., 1972. Protection du littoral. Problèmes posés, moyens d'études et ouvrages de défense. *Direct. des Et. et Recherches E.D.F.*, 145 p.
- LOGAN B.W., 1969. Carbonate sediments and reef, Yucatan shelf, Mexico, Part 1 and 2. *Mem. Amer. Assoc. Petrol. Geolog.*, 1-2 : 199-329.
- LUTAUD L., 1924. Etude tectonique et morphologique de la Provence cristalline, Thèse, 270 p.
- MAGGI P., 1973. Le problème de la disparition des herbiers à Posidonies dans le golfe de Giens (Var). *Science et Pêche, I.S.T.P.M.*, 221 : 7-20.
- MOLINIER R. et PICARD J., 1951. Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines sur le littoral méditerranéen français. *Ann. Inst. Oceanog.*, Paris, (37) : 3.
- PICARD J., 1968. Contribution à l'étude des minéraux lourds dans les sables littoraux de la Garonne au cap Lardier (Provence). *D.E.S, Fac. Sci. Marseille*, 51 p.
-