**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande
**Band:** 61 (1935)
**Heft:** 25

**Artikel:** Action des vagues sur les digues à paroi verticale
**Autor:** Stucky, A. / Bonnard, D.
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-47035

**Nutzungsbedingungen**
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 09.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

61e année — 7 décembre 1935 — N° 25.

# BULLETIN TECHNIQUE
## DE LA SUISSE ROMANDE

ABONNEMENTS :
Suisse : 1 an, 12 francs
Etranger : 14 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 10 francs
Etranger : 12 francs
Prix du numéro :
75 centimes.
Pour les abonnements s'adresser à la librairie F. Rouge & Cie, à Lausanne.

Paraissant tous les 15 jours

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. — Organe de publication de la Commission centrale pour la navigation du Rhin.

COMITÉ DE RÉDACTION. — Président : R. Neeser, ingénieur, à Genève. — Secrétaire : Edm. Emmanuel, ingénieur, à Genève. — Membres : *Fribourg :* MM. L. Hertling, architecte ; A. Rossier, ingénieur ; *Vaud :* MM. C. Butticaz, ingénieur ; E. Elskes, ingénieur ; Epitaux, architecte ; E. Jost, architecte ; A. Paris, ingénieur ; Ch. Thévenaz, architecte ; *Genève :* MM. L. Archinard, ingénieur ; E. Odier, architecte ; Ch. Weibel, architecte ; *Neuchâtel :* MM. J. Béguin, architecte ; R. Guye, ingénieur ; A. Méan, ingénieur cantonal ; E. Prince, architecte ; *Valais :* MM. J. Couchepin, ingénieur, à Martigny ; Haenny, ingénieur, à Sion.

Rédaction : H. DEMIERRE, ingénieur, 11, Avenue des Mousquetaires, La Tour-de-Peilz.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DU BULLETIN TECHNIQUE
A. Dommer, ingénieur, président ; G. Epitaux, architecte ; M. Imer ; E. Savary, ingénieur.

ANNONCES
Le millimètre sur 1 colonne, largeur 47 mm. :
20 centimes.
Rabais pour annonces répétées.
Tarif spécial pour fractions de pages.
Régie des annonces :
Société Suisse d'Edition, Terreaux 29, Lausanne.

SOMMAIRE : Communications du laboratoire d'hydraulique de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne, par MM. A. Stucky, professeur, et D. Bonnard, ingénieur : *Action des vagues sur les digues à paroi verticale. — Concours d'émulation. — La catastrophe de Molare du 13 août 1935. — Leçon inaugurale.* — Bibliographie.

**COMMUNICATIONS DU LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE DE L'ÉCOLE D'INGÉNIEURS DE LAUSANNE**

par A. STUCKY, professeur, et D. BONNARD, ingénieur.

# Action des vagues sur les digues à paroi verticale.

*Etudes analytiques et expérimentales.*

*La question faisant l'objet de cette note est de nos jours activement étudiée. Nous croyons intéressant de donner ici un aperçu succinct des recherches poursuivies à l'étranger, tout en notant la part prise dans ces travaux par le* Laboratoire d'Hydraulique de l'Université de Lausanne [1].

*L'exposé général du problème a déjà été fait dans l'article intitulé :* Contribution à l'étude de l'action des vagues sur une paroi verticale *des numéros du 29 septembre et du 13 octobre 1934 du « Bulletin technique de la Suisse romande ».*

*Nous préciserons les résultats obtenus récemment en ce qui concerne les deux points suivants : mouvement réel de la mer au voisinage d'une digue à paroi verticale, poussée horizontale maximum agissant sur le mur.*

## 1. Mouvement réel de la mer au voisinage d'une digue à paroi verticale.

*Théories en présence et observation des faits.*

Les vagues abordant les ouvrages extérieurs de protection des ports provoquent des phénomènes dont la nature dépend du type de construction des jetées. Dans le cas de digues en enrochements offrant à la mer un parement en pente douce, les lames déferlent et se brisent sur l'ouvrage en l'exposant à des efforts dynamiques intenses. Au contraire, si la jetée est constituée par un mur vertical au pied duquel la profondeur est suffisante, les lames sont réfléchies. Les efforts agissant sur l'ouvrage sont alors de nature statique et de beaucoup moindres, d'où l'intérêt de ce genre de construction. A l'opposé de ce qui se produit en cas de déferlement, l'énergie de la houle se conserve intégralement du moins théoriquement.

La théorie classique du clapotis [1], permettant de saisir par le calcul ce phénomène, impose *a priori* l'absence de tout mouvement de translation ; les particules superficielles décrivant des orbites rigoureusement fermées. On sait que, soit sous l'action du vent, soit du fait des frottements sur le fond, les trajectoires des particules peuvent être notablement déformées et certains auteurs prétendent que, dans le cas de tempêtes violentes, alors même que le mur est fondé à une profondeur suffisante pour empêcher le déferlement des lames incidentes, l'oscillation des masses s'accompagne toujours d'un mouvement général de translation du large vers l'ouvrage.

Les partisans de cette seconde manière de voir considèrent comme peu probable la formation du clapotis sous son aspect régulier et classique. Ils admettent la réflexion de la houle et ses avantages en affirmant toutefois qu'en cas de tempêtes importantes, elle ne donne jamais naissance au mouvement idéal ondulatoire stationnaire.

Remarquons aussi que la théorie du clapotis postule que les vagues d'une tempête sont toutes de même nature. On conçoit facilement qu'en cas d'irrégularité dans la

[1] Au programme des travaux du congrès international de navigation de septembre 1935, à Bruxelles, section navigation maritime, figurait comme seconde question celle des digues verticales. Le professeur Coen Cagli, de Rome, et M. Renaud, directeur du port d'Alger, donnèrent dans leur rapport des résultats d'essais sur modèles effectués au Laboratoire de Lausanne.

[1] Annales des Ponts et Chaussées, 1928, p. 5 : « Essai sur les digues maritimes verticales », par M. Sainflou.

succession des lames, une grosse vague, succédant à une période de calme relatif, puisse provoquer à la paroi un phénomène différent dont les conséquences ne sauraient être jugées, sans autre, moins dangereuses.

Notons encore que cette théorie suppose que les mouvements restent petits.

Dans un article intitulé « Sur un mouvement approché du clapotis » [1], M. Gourret, désireux de trouver au problème une solution mathématique, tenant compte dans une plus large mesure des faits, s'exprime ainsi : « Le mouvement principal de la mer au contact d'une digue verticale serait un mouvement stationnaire de clapotis... mais, en plus de ce mouvement régulier qui développerait contre la paroi des pressions continues, il se produirait, par suite des frottements et de la viscosité de l'eau, des efforts dynamiques secondaires... ». L'auteur propose, en conséquence, une nouvelle méthode d'analyse du clapotis, mais, contrairement aux premiers auteurs cités, selon la théorie desquels les résultats s'exprimaient en fonction des dimensions de la houle incidente, il donne une solution mathématique du problème lorsqu'on est en mesure de déterminer expérimentalement le profil de la surface libre au moment de l'affleurement maximum ou minimum à la paroi. Les données expérimentales nécessaires étant encore de nos jours insuffisantes, il a paru intéressant à l'auteur d'examiner si cette méthode générale ne permettait pas de donner une solution approchée du problème susceptible d'être utilisée provisoirement dans les applications. C'est ainsi qu'en définitive M. Gourret se voit dans l'obligation de faire des hypothèses supplémentaires. Les résultats auxquels conduit sa méthode l'autorisent à aborder la question du dimensionnement des soubassements (risberme).

D'intéressantes constatations, concernant la profondeur limite de déferlement des lames, furent faites à Alger, au cours de la tempête du 3 février 1934, qui provoqua la destruction de la jetée Mustapha. De l'importante étude publiée à ce sujet par M. Renaud [2], ingénieur en chef, retenons les faits suivants : Il découle des photographies faites au cours de la tempête que la houle, dont l'amplitude au large devait atteindre 9,00 m environ (longueur 200 m) ne déferlait pas par les fonds de 20 m situés en avant de la jetée, mais seulement par des fonds de 9,00 m. Ce fait est d'autant plus à retenir que l'absence de vent était complète et cela laisse entendre que, au cas où apparaissent des déferlements par des fonds très supérieurs, on peut se demander si ces déferlements ne sont pas apparents seulement et dus au vent violent qui accompagne d'ordinaire les grandes tempêtes.

D'autre part, il faut remarquer que le calcul par la théorie de la houle en profondeur finie aurait laissé prévoir que la houle devait déferler par des fonds de 4,50 m, le déferlement du clapotis se produisant par des fonds de 9,00 m. A ce sujet, M. Renaud conclut en ces termes : « Il ne faut pas perdre de vue que la formule du déferlement de la houle est basée sur la considération théorique de la transformation de la trochoïde en cycloïde, il est de toute évidence qu'en fait le déferlement doit se produire bien avant ; il n'est donc pas surprenant que l'observation ait conduit à observer le déferlement par une profondeur double de la profondeur théorique ».

M. le professeur Coen Cagli, dans ses divers articles [1], insiste sur le fait que le mouvement des masses observé en mer au voisinage des digues verticales ne revêt pratiquement jamais l'aspect d'un mouvement ondulatoire stationnaire. Il note, en particulier, que la cote de l'affleurement maximum de la lame à la paroi dépasse de beaucoup le niveau déduit de la théorie hydrodynamique et qu'en outre il se produit au droit de la jetée des gerbes d'eau dont on ne peut expliquer la formation par la théorie du clapotis. D'après cet auteur, l'étude de la question doit être poursuivie en cherchant à déterminer l'action que peut avoir sur l'ouvrage non plus un mouvement combiné de lames incidentes et de lames réfléchies, mais bien, pour être dans le cas le plus défavorable, une vague unique de grande dimension abordant la digue, alors que devant cette dernière, par suite d'interférences diverses, la surface de la mer est relativement calme.

C'est dans le but de contribuer à la solution de ces divers problèmes que furent entrepris au Laboratoire d'hydraulique de Lausanne, avec la collaboration de M. le professeur Coen Cagli, un grand nombre d'expériences dont nous donnons ci-après les résultats essentiels.

*Résultats des recherches expérimentales.*

Dans nos recherches précédentes [2], nous nous étions bornés à étudier dans notre chenal d'essais le phénomène du clapotis. Le train de vagues initial, avant toute réflexion, était, dans ces expériences, peu marqué. De sa réflexion résultait immédiatement un mouvement ondulatoire stationnaire qui, lui-même, était amplifié jusqu'à ce que son amplitude soit le double de celle de la vague incidente dont on voulait examiner l'effet sur l'ouvrage. C'était admettre *a priori* que les vagues provoquaient à la muraille un mouvement de clapotis parfait. Ces expériences avaient donc pour but davantage le contrôle en laboratoire d'une méthode d'analyse du mouvement ondulatoire stationnaire que la détermination expérimentale du phénomène réel apparaissant en cas de tempête au droit des jetées verticales.

Dès lors, abordant le problème de manière plus générale, nous avons cherché à déterminer quelles devaient être les conditions réalisées par le système digue-houle

[1] Annales des Ponts et Chaussées, 1935, p. 337.

[2] Annales des Ponts et Chaussées d'avril et mai 1935 : « La jetée de Mustapha au port d'Alger », par M. Renaud, directeur du port d'Alger.

[1] Annali dei Lavori pubblici, 1934, n° 6. « Sulle condizioni di stabilità dei moli a parete verticale », par prof. ing. Coen Cagli.

Voir aussi le rapport du même auteur au Congrès international de navigation de 1935, à Bruxelles.

[2] « Bulletin technique de la Suisse romande », septembre et octobre 1934. Voir aussi nos résultats publiés par M. Renaud dans l'article cité précédemment.

pour que la réflexion des lames puisse intégralement se produire. L'observation en nature et l'expérience ayant montré que le clapotis théorique ne se produisait en fait jamais, nous nous sommes efforcés de définir expérimentalement dans quelles limites le mouvement des masses au voisinage d'une jetée verticale peut être assimilé sans grande erreur à celui du clapotis et quelles étaient, en cas contraire, l'allure du mouvement et la nature des efforts agissant sur le mur.

Pour ces dernières études, notre installation d'essais a été améliorée. Des appareils de mesure des pressions construits sur un principe nouveau, nous permirent de déterminer les diagrammes des efforts plus commodément et avec une précision plus grande. La longueur du chenal d'essais fut portée de 6 m à 15 m (voir fig. 1) et le dispositif destiné à produire les vagues complètement renouvelé. Le genre des vagues obtenues en Laboratoire varie selon le mode générateur utilisé, et nous n'avons pu conclure qu'en interprétant une grande quantité de mesures entreprises avec divers procédés d'expérimentation.

Dans la suite de notre exposé figureront deux groupes de résultats se rapportant à ce que nous avons nommé respectivement : « vagues de translation », et « vagues interceptées ». Les premières expériences ont été faites en lançant une lame unique et en observant la manière dont elle abordait la paroi à l'extrémité du chenal. Ce mode de faire a l'avantage de simplifier les mesures de pression, par contre, la détermination de la longueur de la vague est moins précise. En outre, on ne peut obtenir d'emblée une vague de dimension suffisante qu'en provoquant un déplacement d'eau lui conférant un caractère marqué de translation. (Les trajectoires ne sont plus des orbites rigoureusement fermées.) En mer, les vagues de fortes dimensions prennent, en profondeurs limitées, dans une certaine mesure ce caractère d'onde de translation. Les affleurements maximum et les efforts mesurés dans ce cas sont à prendre comme limite supérieure probable.

Les essais du second groupe ont été effectués en provoquant dans un chenal de 15 m de longueur un train de vagues de longueur constante mais d'amplitude croissante. L'expérience consistait, en opérant à mi-distance entre les deux extrémités du chenal, à laisser passer quelques vagues puis à intercepter, en abaissant instantanément une paroi entre deux crêtes, l'une d'elles, dont on avait au préalable observé les dimensions. La vague ainsi arrêtée dans sa course se réfléchissait, l'on notait alors les affleurements atteints et les pressions occasionnées sur le mur. On fut ainsi en mesure d'observer la réflexion de lames d'oscillation (avec pas ou peu de translation). En effet, l'ébranlement de l'eau du chenal s'obtenait progressivement sans déplacement subit et général d'un gros volume liquide. Ces expériences nécessitent une longueur de chenal suffisante pour que le clapotis formé à son extrémité par les premières vagues ne vienne pas troubler l'observation du phénomène suscité au droit de la paroi plongeante. Il est possible que par ce procédé l'énergie de la lame ne soit pas entièrement interceptée, c'est pourquoi les valeurs ainsi trouvées, tant en ce qui touche les affleurements maximum que les efforts, devront être considérées comme une limite inférieure.

On est en droit d'admettre qu'en réalité, soit les affleurements maximum, soit les efforts exercés sur la muraille seront compris entre les limites ainsi définies par ces deux séries d'expériences.

En observant la réflexion d'une lame nous étudions un phénomène qui n'est autre que le premier sommet d'un clapotis. Si donc on est en mesure de déterminer expérimentalement les conditions à remplir par l'ouvrage (profondeur au droit du mur et au pied du soubassement) pour que la réflexion de la lame la plus forte, considérée isolément, se produise normalement, c'est-à-dire sans déferlement préalable et sans amplitude exagérée du mouvement à la paroi (« brisure »), on aura défini les conditions nécessaires à assurer, en cas de vagues régulières, la formation du clapotis. Dans ces limites, l'effet sur l'ouvrage d'une vague unique succédant à une période de calme relatif ne saurait être différent de celui qu'exercerait un mouvement ondulatoire stationnaire résultant de la succession

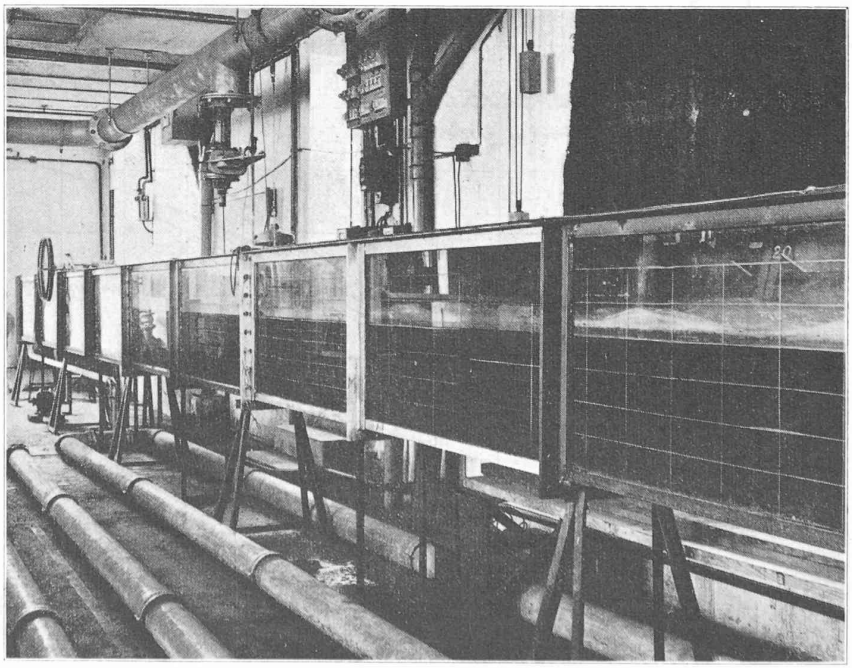


Fig. 1. — Vue générale du chenal de 15 m utilisé au Laboratoire d'hydraulique de Lausanne, pour les études concernant les vagues et les ondes.

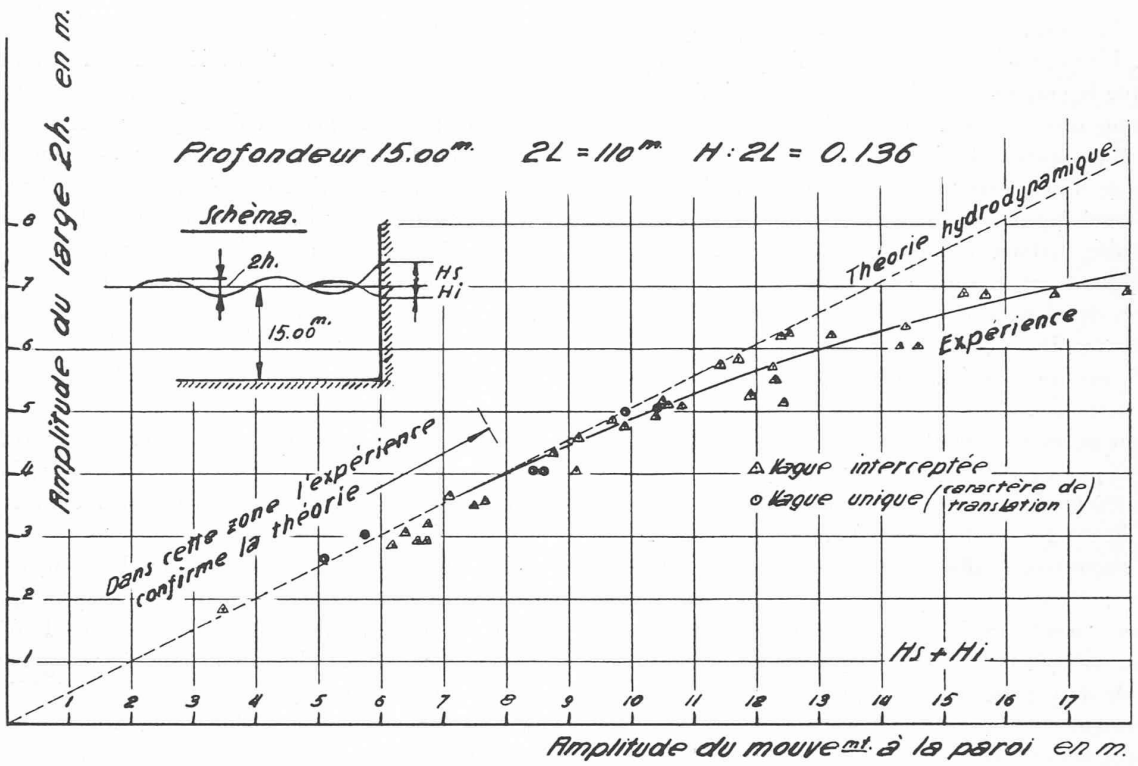



Fig. 2. — Amplitude du mouvement à la paroi en fonction de l'amplitude de la vague au large. Lorsque cette dernière atteint 5,00 m, la moyenne des amplitudes totales mesurées à la paroi dépasse la valeur théorique. Cet excès atteindrait 3,00 m environ, pour des vagues de 7,00 m. au large.

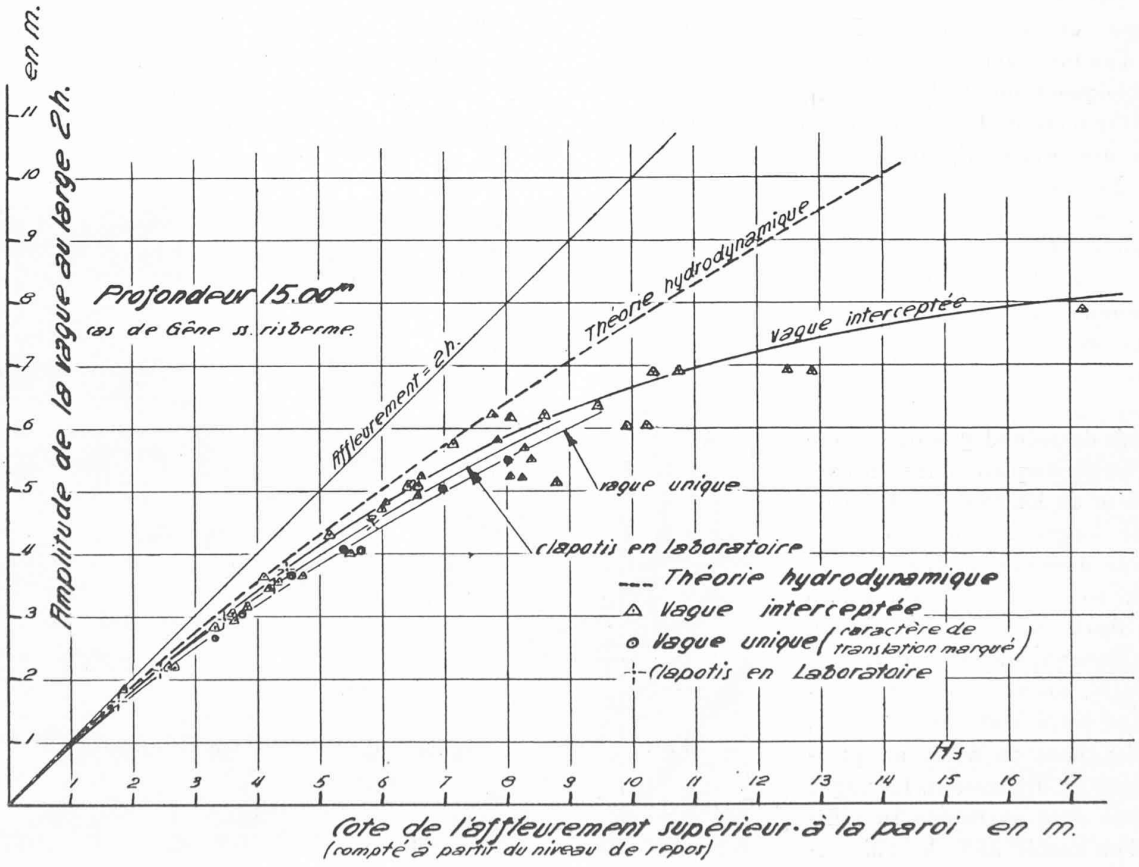



Fig. 3. — Cote de l'affleurement maximum à la paroi, en fonction de l'amplitude au large. La cote observée en Laboratoire est toujours supérieure au niveau calculé. Cette différence, minime pour les vagues de faibles dimensions, s'accentue nettement dès que l'amplitude de la lame au large dépasse 5,25 environ.

régulière de plusieurs vagues semblables à la première.

Mais nos essais nous ont montré qu'il existe, dans chaque cas, une dimension limite des vagues, au delà de laquelle la réflexion s'accompagne d'un mouvement vertical à la paroi dont l'amplitude dépasse notablement le double de la hauteur des lames au large, alors même que la profondeur est suffisante à empêcher tout déferlement de ces dernières. On observe alors des projections verticales d'eau pouvant, le cas échéant, surmonter le couronnement de l'ouvrage. La conséquence en est une destruction d'énergie rendant impossible la conservation du mouvement ondulatoire stationnaire et le phénomène prendra l'aspect d'un clapotis ébauché dont la destruction se poursuit d'emblée par brisure de ses crêtes s'accompagnant d'embrun retombant de part et d'autre de ses sommets.

Ce phénomène est appelé parfois déferlement du clapotis, nous préférons le désigner sous le nom de « brisure » du clapotis. Sa cause n'est pas uniquement le manque de profondeur, ce peut être une hauteur exagérée de la vague rapportée à sa longueur ou encore un caractère trop marqué de translation de cette dernière.

Nous verrons, au chapitre suivant, que l'avantage principal inhérent aux jetées à paroi verticale, à savoir le caractère statique de la poussée horizontale, subsiste néanmoins dans tous les cas où la profondeur d'eau est suffisante pour éviter le déferlement des lames incidentes, alors même que leur succession n'engendre plus, du fait des dimensions de l'ensemble digue-houle, un clapotis normal. Il est probable que l'on ait attribué parfois à tort au déferlement des lames les gerbes d'eau provenant de la brisure du clapotis et ne présentant en elles-mêmes aucun inconvénient.

Afin de concrétiser les conclusions que nous venons d'énoncer, nous faisons figurer ici deux graphiques se rapportant à l'étude du mouvement de la mer apparaissant au droit d'une jetée verticale fondée à 15 m de profondeur (cas de Gênes, abstraction faite de la risberme)

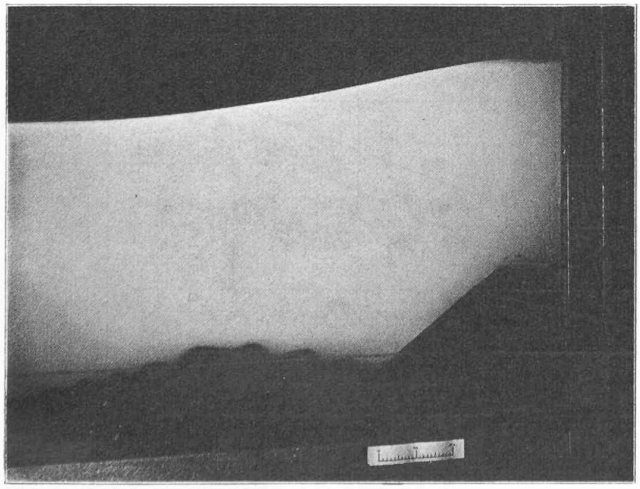


Fig. 4. — Photographie prise à l'instant de l'affleurement maximum de la vague à la paroi dans le cas d'une réflexion normale.

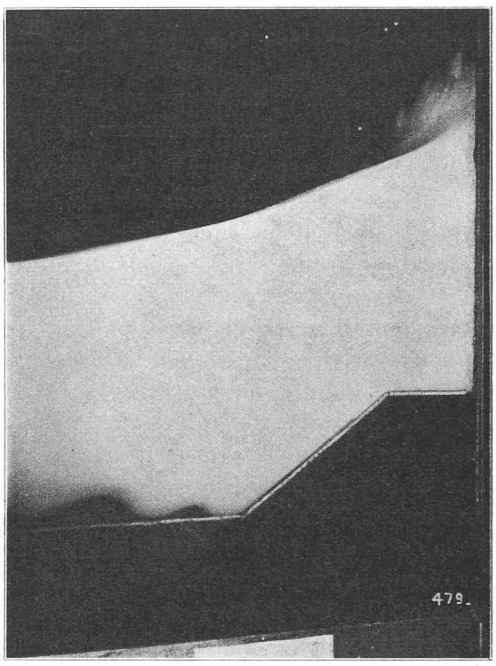



Fig. 5. — Photographie prise à l'instant de l'affleurement maximum à la paroi dans le cas où la réflexion s'accompagne d'une gerbe d'eau verticale.

et soumise à l'action de lames de 110 m de long dont nous avons augmenté progressivement l'amplitude.

A la figure 2, nous donnons en fonction de l'amplitude au large, $2h$, la hauteur totale balayée à la paroi : $Hs + Hi$. A la figure 3, se trouve définie la loi liant l'amplitude au large à la cote de l'affleurement maximum rapporté au niveau de repos.

L'examen de ces deux graphiques montre que l'amplitude totale à la paroi n'est voisine, dans ce cas, du double de l'amplitude au large que pour autant que la valeur $2h$ ne dépasse pas les 40 % environ de la profondeur. Passé cette limite, l'eau monte violemment le long de la digue et, sans que les dimensions de la houle varient beaucoup, les affleurements maximum atteindront le 130 % des valeurs calculées par la méthode hydrodynamique. La conservation du mouvement ondulatoire stationnaire a été impossible pour de telles grandeurs de vagues. Notons, en passant, que cette limite n'est pas en contradiction avec les observations faites à Alger (voir paragraphe précédent). Ces constatations de laboratoire sont, en outre, en accord avec les mesures faites à Gênes, où furent observées au cours de fortes tempêtes des montées d'eau à la paroi, dépassant de beaucoup les valeurs théoriques [1].

On comprendra mieux le changement que subit le phénomène à partir de cette amplitude limite en comparant l'aspect de la ligne d'eau à la paroi aux figures 4 et 5. La première photographie étant prise alors que la réflexion s'opère encore intégralement (tangente

[1] Voir à ce propos les articles déjà cités de M. Coen Cagli et, en outre, l'article : « Pressioni esercitate dal mare contro le dighe a parete verticale » dans « L'Ingegnere » d'août 1934, par M. le Dr ing. Salvatore Levi.

horizontale à la paroi), la seconde montrant, au contraire, l'amorce d'une projection verticale de l'eau.

**2. Poussée horizontale agissant sur la jetée à l'instant de l'affleurement maximum.**

Les éléments en présence pour la discussion de cette question sont essentiellement : Les résultats du calcul par la théorie hydrodynamique (Sainflou), ceux des mesures directes effectuées sur les jetées existantes et les résultats expérimentaux obtenus en laboratoire.

Nous montrons dans ce chapitre qu'il est possible, actuellement, d'estimer, sans grande erreur à craindre, l'importance des efforts auxquels sont soumises les digues à parois verticales.

Les conclusions auxquelles nous avons été conduits dans notre article antérieur sur ce sujet étaient générales. Nous avions, à ce moment, réussi à connaître parfaitement la nature de la poussée et les lois liant la répartition des efforts le long d'une verticale aux dimensions de la vague et plus spécialement au rapport $h : L$. Dès lors, nos recherches nous ont permis de donner à ces affirmations un caractère plus positif ; de la valeur qualitative qu'elles avaient avant tout, nous avons passé à des résultats numériques. Nous nous sommes attachés, dans la présente étude, à connaître en fonction des dimensions de la vague au large, l'intensité de la pression au niveau de repos. Cette valeur une fois connue, il sera possible d'en déduire, sans grande erreur, le diagramme complet de poussée.

Nous donnons ici les graphiques groupant les valeurs mesurées pour un cas comparable dans ses éléments principaux à celui de la digue de Gênes (abstraction faite de la risberme). Ces expériences ont été poursuivies 1. en provoquant dans le chenal d'essai une vague unique dont le caractère de translation était nettement marqué et en observant les efforts en bout du bassin ; 2. en provoquant un train de vagues et en abaissant instantanément dans l'un des creux une paroi verticale au droit de laquelle la pression au niveau de repos était mesurée à l'instant du premier affleurement supérieur ; 3. en établissant dans le chenal un mouvement de clapotis tel qu'il résulterait idéalement de la succession des vagues régulières. Etant entendu que ce clapotis ne garderait sa forme classique que pour autant que la houle incidente ne dépasse pas en dimension la limite correspondant à la profondeur disponible et au delà de laquelle le clapotis se déforme (voir chapitre précédent).

A la figure 6, nous avons reporté, en fonction de la montée à la paroi, la pression mesurée au niveau de repos. A la figure 7, ces mêmes pressions sont données en fonction de l'amplitude au large de la vague incidente. Ces graphiques montrent, en outre, les résultats auxquels conduit la théorie hydrodynamique du clapotis (méthode de M. Sainflou).

On peut en déduire ce qui suit :

*a*) A l'instant de l'affleurement maximum, la pression au niveau de repos est toujours plus faible que la pression hydrostatique correspondante (confirmation des conclusions antérieures). Quelle que soit la méthode d'expérimentation employée au laboratoire (vague unique, vague interceptée, clapotis), les essais ont donné des résultats plus faibles que ceux de la théorie hydrodynamique.

*b*) Lorsque la hauteur de la vague au large dépasse la limite définie par nos essais et au delà de laquelle le clapotis régulier ne se forme plus de manière parfaite,

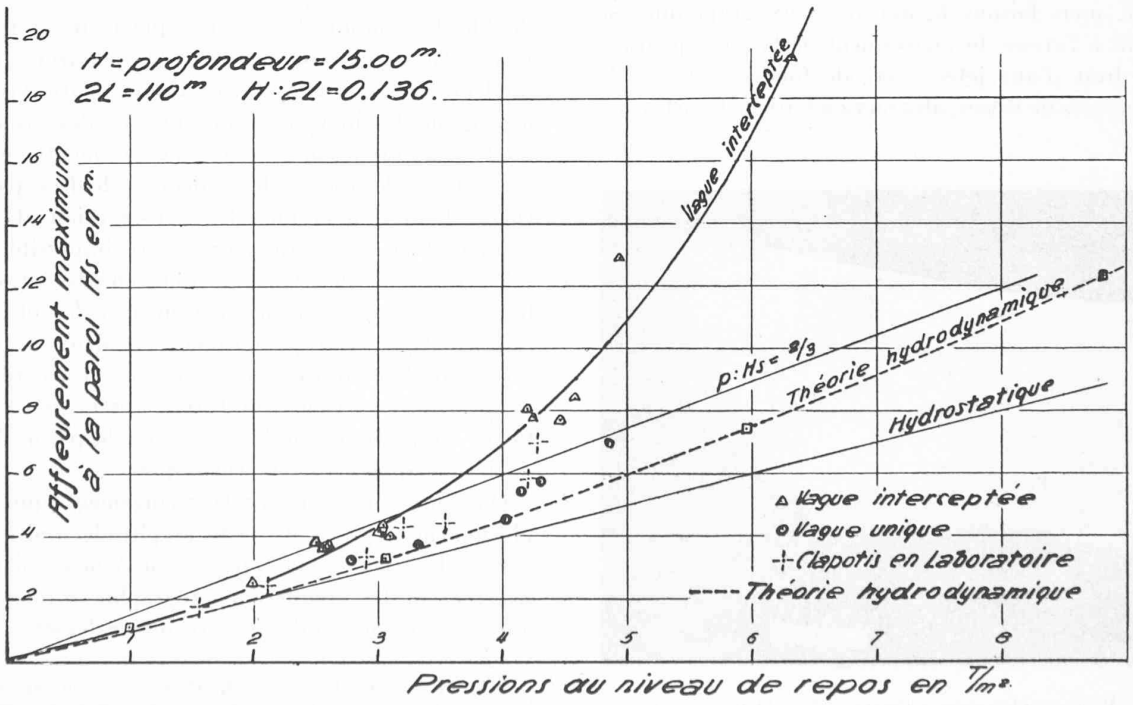



Fig. 6. — Pression au niveau de repos, à l'instant de l'affleurement maximum en fonction de la cote atteinte à la paroi.

l'amplitude totale du mouvement à la paroi dépasse nettement la valeur théorique de $4h$ (voir chapitre précédent), mais les pressions au niveau de repos ne sont pas, de ce fait, augmentées proportionnellement ; au contraire, l'écart entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées augmente toujours ; il est d'autant plus grand que le rapport $2h : 2L$ l'est plus. La brisure du clapotis, sa destruction partielle, ne s'accompagne donc pas d'effets dynamiques supplémentaires à la paroi, les gerbes d'eau en résultant étant verticales.

*c*) Pour les vagues de faible amplitude rapportée à leur longueur (montée à la paroi, comptée dès le niveau de repos, de 0 à 3,00 m pour $2L = 110$ m), l'effort au niveau de repos peut être assimilé à une poussée hydrostatique (on prend ainsi une petite marge de sécurité). Pour les vagues de moyenne amplitude au large (montée à la paroi 3 à 4,00 m environ pour $2L = 110$ m), l'effort unitaire au niveau de repos atteindra environ les 80 % de la pression hydrostatique correspondant à l'affleurement maximum. Enfin, pour les vagues exceptionnellement fortes (affleurement supérieur à la jetée atteignant la cote 9,00 m vague de $2h = 6{,}00$ m pour $2L = 110$ m à Gênes) l'effort au niveau de repos ne dépassera pas les 50 ou au maximum les 60 % de la pression hydrostatique correspondante.

Il faut juger la valeur de ces résultats en les comparant aux rares déterminations faites sur les jetées elles-mêmes, à l'aide d'appareils dynamométriques spéciaux. Les mesures de pression effectuées en particulier à Gênes au cours de diverses tempêtes conduisent à des conclusions identiques aux précédentes. La mise en parallèle des efforts obtenus sur l'ouvrage lui-même et au laboratoire a été faite par M. le professeur Coen Cagli, dans son rapport au congrès international de navigation.

### 3. Conclusions.

Les résultats donnés dans cette communication conduisent aux conclusions suivantes :

1. La profondeur au pied de la muraille, telle qu'elle existe aux digues de Gênes, Alger, Catane, soit égale à environ 3 fois l'amplitude au large de la vague la plus forte, est suffisante à éviter le déferlement des lames incidentes.

2. Dans le cas de vagues de tempêtes (longueur $2L > 100$ m) ($2h : 2L = 0{,}03$-$0{,}05$) le phénomène de réflexion des lames ne peut être assimilé à un mouvement ondulatoire stationnaire classique (clapotis) que pour autant que la hauteur de la vague au large, $2h$, ne dépasse pas les 40 % environ de la profondeur au pied de la muraille. (Pour Gênes, $2h = 4$ m, environ.)

Passé cette limite, l'amplitude totale du mouvement vertical à la paroi s'écarte de la valeur théorique $4h$ (brisure du clapotis), l'affleurement supérieur atteint alors une cote variant de 3,00 h à 3,5 h au-dessus du niveau de repos.

3. La pression maximum au niveau de repos, déterminée par le méthode analytique du clapotis *(Sainflou)*, n'a pas été dépassée dans nos expériences, alors même que l'affleurement supérieur à la paroi surpassait de beaucoup la cote calculée. On peut en conclure que quoique, dans le cas de grandes vagues, le phénomène au droit de la jetée ne soit plus conforme aux déductions du calcul, ce dernier donne toutefois des valeurs susceptibles d'être utilisées dans le dimensionnement de ces ouvrages. La

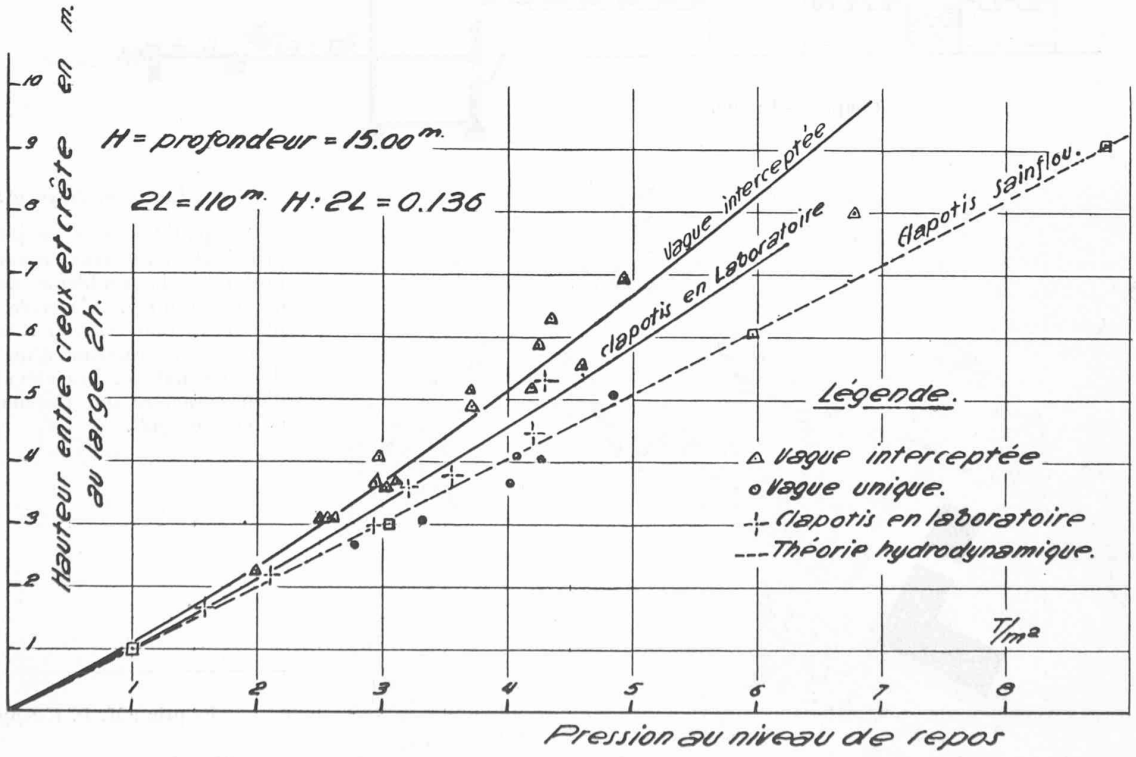



Fig. 7. — Pression au niveau de repos à l'instant de l'affleurement maximum en fonction de la hauteur de la vague au large.

pression au niveau de repos ainsi calculée est sensiblement égale en tonnes par m² à l'amplitude *2h* de la vague au large exprimée en m. C'est aussi la valeur maximum mesurée à Gênes, grâce aux dynamomètres placés dans la jetée.

D'autre part, le calcul, les mesures faites à Gênes et les essais de laboratoire montrent que, dans le cas de longues vagues, on peut admettre (on prend ainsi une petite marge de sécurité) que la pression maximum agissant sur le mur est constante, du niveau de repos au pied de la muraille, compte tenu de la poussée hydrostatique côté port.

Enfin, au-dessus du niveau de repos, on admettra une répartition linéaire de la pression tombant à zéro à la cote d'affleurement maximum.

Ces conclusions ont été formulées sous une forme quelque peu différente par M. de Rouville, rapporteur général du problème des digues verticales, et adoptées par le Congrès de Navigation, de Bruxelles. Notons, en terminant, que, si ces deux questions fondamentales (mouvement de la mer au voisinnage de la digue et efforts horizontaux agissant sur l'ouvrage) semblent avoir trouvé actuellement leur solution, il n'en est pas encore de même pour la question des affouillements au pied de la muraille. Ce point, très important, est actuellement l'objet d'études et d'observations nouvelles.

Lausanne, septembre 1935.

# Concours d'émulation.

Ce concours, organisé par l'Ecole cantonale vaudoise de dessin et d'art appliqué et le Groupe des architectes de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes, était ouvert : aux élèves de l'Ecole cantonale de dessin et d'art appliqué ; aux dessinateurs, apprentis, élèves architectes et décorateurs, aux artisans domiciliés dans le canton de Vaud et âgés de moins de 30 ans.

Il comprenait deux catégories : *Concours A :* projet d'un club de golf dont le terrain de jeu est supposé aux environs du Chalet-à-Gobet ; *Concours B :* projet d'un hall dans une auberge-relais.

Une somme de Fr. 700 était mise à la disposition du Jury pour récompenser les meilleurs projets des deux catégories ; il avait toute liberté pour répartir la somme entre les deux catégories. La plus petite prime n'était pas inférieure à Fr. 30.

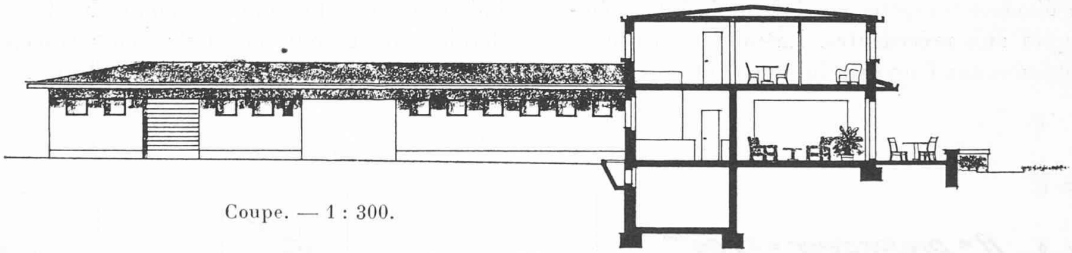
Le Jury était composé : du directeur de l'Ecole cantonale de dessin et d'art appliqué ; de M. H. Vonder Muhll, président du Groupe des architectes ; de M. G. Mercier, architecte ; de M. Casimir Reymond, sculpteur ; de M. H. Bischoff, artiste-peintre ; de M. J.-J. Mennet, artiste décorateur.

Le Jury s'est réuni le 17 septembre, pour examiner 26 projets du concours *A* (club de golf) et 10 projets du concours *B* (hall d'une auberge-relais).

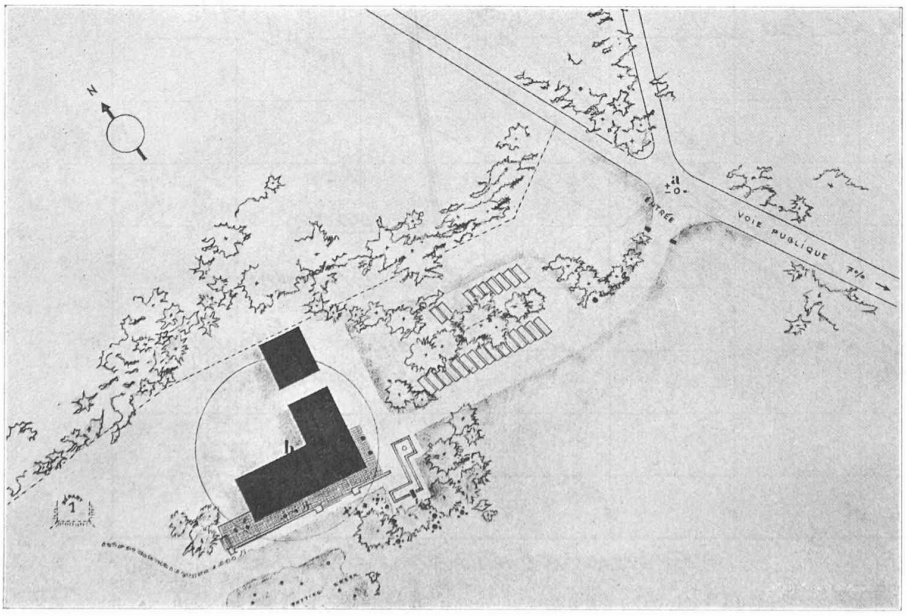
Tous les envois arrivés en temps voulu remplissaient les conditions du programme. Le Jury se plaît à reconnaître l'effort fourni par les concurrents tant du concours *A* que du concours *B*.

Nous avons publié, à la page 252 de notre numéro du 12 octobre dernier le palmarès de ce concours et nous reproduisons, ci-après, deux projets primés dans la catégorie *A*, avec le texte du jugement du Jury.

Le rapport du Jury se termine par ce vœu auquel chacun souscrira : Ce concours provoquant, depuis quelques années, une heureuse émulation parmi les jeunes architectes et décorateurs, il est à souhaiter que son organisation pourra être maintenue dans l'avenir.



Coupe. — 1 : 300.




*Jugement du jury :*

Les qualités de ce projet résident principalement dans une étude approfondie du problème qui ressort du programme. L'arrivée est bien placée. Le plan est clair et correspond bien à la destination d'un bâtiment de cette nature. Les élévations sont d'un caractère qui convient bien à un club de golf.

Ier prix : M. *P. Estoppey.*

Plan de situation. — 1 : 600.