

Sollicitation instationnaire de structure en mer Etude en laboratoire de modèles hydroélastiques de pipe-line*

Jean-Claude Guilloud

Docteur ès-Sciences

Ingénieur du Département Essais et Recherches

NEYRTEC-Etablissement de Grenoble d'ALSTHOM-ATLANTIQUE

Origine de l'étude

Le coût de la pose d'un pipe-line en mer est très élevé. On peut le considérer, au premier ordre, comme le produit du nombre de jours nécessaires pour poser un tronçon donné par le coût journalier de la méthode utilisée.

La réduction de ce coût semble passer par une augmentation de la vitesse de pose. Encore faut-il que la diminution de la durée de la pose ne soit pas purement et simplement annulée par l'augmentation du coût quotidien.

En effet, l'amélioration des performances d'une technique donnée conduit, assez souvent, à l'accroissement de l'investissement initial qu'il faut consentir pour rendre la méthode plus efficace, accroissement qui se répercute inévitablement sur le coût journalier.

C'est ainsi que si l'on considère la méthode actuelle basée sur l'assemblage en mer d'éléments courts, on note que l'augmentation de la cadence de pose a entraîné la conception de barges de très fort déplacement.

Sans remettre en cause la technique de pose en S, il semble logique de se demander ce qu'il advient de la méthode si, par principe, on décide le report de la majeure partie du travail de soudures sur un chantier à terre.

Prendre un tel parti suppose la double possibilité (physique et économique) de remorquer des conduites

de grande longueur à partir d'un chantier terrestre vers le lieu même de la pose.

Avant même de promouvoir cette "pose par remorquage" qui a, par ailleurs, déjà fait ses preuves par temps relativement calme avec des tubes de 10", il semble nécessaire de comprendre par des essais sur modèle réduit le comportement dans la houle d'une conduite de grande longueur, de l'ordre du kilomètre.

Objets précis de l'étude.

Rappel bref du cahier des charges initialement imposé

Les principales questions qui se posent en vue de la promotion de la méthode par remorquage sont les suivantes :

- Pour quelle amplitude de houle maximale, le remorquage d'un tube sortant directement d'une aciérie est-il possible ?
- Parmi les tubes qu'il semble raisonnable de pouvoir poser dans les prochaines années, c'est-à-dire ceux d'un diamètre allant de 10 à 40 pouces, quels sont ceux qui auront le meilleur comportement dans la houle ? D'une façon générale quels sont les paramètres les plus caractéristiques qui gouvernent ce comportement ? Quels rôles jouent le diamètre, l'épaisseur de l'acier, la densité moyenne et la rigidité ?
- Les tubes ayant toujours une densité supérieure à l'unité, quelle est la répartition des flotteurs la plus judicieuse ? Vaut-il mieux remorquer en surface ou par immersion ?
- Pour un tube et une configuration de remorquage donnés, existe-t-il un cap par rapport à la direction

(*) Cette étude a été commandée à ALSTHOM-ATLANTIQUE par la Cie Française des Pétroles (Groupe TOTAL), l'Institut Français du Pétrole et ELF-Aquitaine, dans le cadre du projet "Exploitation d'hydrocarbures en mer profonde". Elle a bénéficié des dotations du Fonds de Soutien des Hydrocarbures.

de propagation de la houle qui soit plus critique que d'autres ?

- Une dernière question essentielle est celle de savoir avec quelle vitesse de remorquage on pourra opérer par temps calme.

Bien avant la réalisation des essais dont il est rendu compte dans le présent document, toutes ces questions recevaient des réponses diverses et le plus souvent contradictoires. Ce sont ces questions qui ont servi de base à l'établissement par le client d'un cahier des charges de l'étude expérimentale dont nous rappelons ci-dessous les principaux paragraphes.

Objet des essais de remorquage sur modèle hydraulique

- Analyser et prévoir le comportement d'une conduite munie de flotteurs et remorquée dans la houle.
- Définir les équipements et les conditions de remorquage optimum.
- Mettre en évidence les états limites en simulant des crêtes à creux de 15 mètres au maximum.

On se bornera à étudier le comportement de la conduite dans un plan vertical sous l'action d'une houle monochromatique dont la direction est parallèle à celle de la conduite.

Conduite à étudier (Cf. tableau 1)

Les équipements d'allègement à essayer sont rassemblés dans le tableau n° 2.

Un examen complet du cahier des charges montre qu'il était laissé, à la société qui réaliserait ces essais, une très grande initiative quant à la conception des maquettes et à la conduite de ces essais.

Scénario expérimental proposé par NEYRTEC

Un examen précis du cahier des charges proposé en vue de répondre à la soumission montrait que les contraintes dans un tube dépendaient de 12 paramètres indépendants (données mécaniques, données relatives aux équipements d'allègement, caractéristique de la houle, enfin vitesse de remorquage).

Après une première étude physique du problème, nous sommes arrivés à l'idée que la vitesse de remorquage relativement faible n'était pas le facteur primordial influençant la tenue mécanique des tubes (au plan économique, il reste essentiel). Dès lors, nous avons proposé une série d'essais systématiques de "Stand-By" dans un bassin à houle. Cette option apportait une simplification notable des conditions d'essais tout en donnant toujours une très bonne idée d'un remorquage cap à la houle.

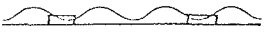
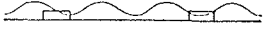
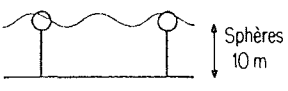
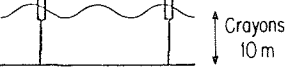

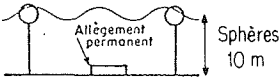
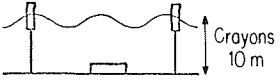
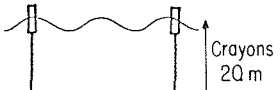

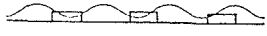
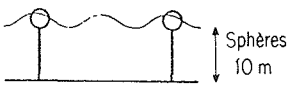
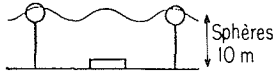
Mais suivre au pied de la lettre le cahier des charges, qui ne spécifiait que des essais cap à la houle, c'était

Tableau N° 1			
Pour chaque tube une fourchette de profondeur de pose est proposée. (Les extrémités étant fonction des coefficients de sécurité choisis).			
B = bétonné			
N°	Ø extérieur acier	Profondeur de pose (m)	Epaisseur acier (mm)
1	20"	1000 1300	22,35
2	20"	500 750	18,49
3	20" B	100 150	10,87
4	10"	1000 1300	11,17
5	10"	500 750	9,25
6	40" B	100 150	21,74
7	30"	1000 1300	33,53
8	30"	500 750	27,74
9	30" B	100 150	16,31

prendre le risque d'ignorer certains phénomènes qui auraient pu apparaître avec des houles obliques. C'est pourquoi, nous avons proposé que les essais systématiques en bassin soient suivis de quelques expériences typiques sur le lac de Port-Revel (*).

Ce grand moyen d'essais a permis non seulement d'étudier le comportement en surface et en sub-surface de deux tubes (20" N° 2 et 30" N° 9-B) avec différents caps à la houle et vitesse de remorquage, mais en plus de préciser la "tenue de route" des tubes, particulièrement en giration.

(*) Lac de 3,5 hectares appartenant à SOGREA, qui est le centre de formation des pilotes de super-tankers. Voir photo.

Tableau 2 Définition des équipements d'allègement à essayer		
1/ Remorquage en surface	2/ Remorquage en subsurface	3/ Remorquage en subsurface avec allègement permanent
<p>①.1 Flotteurs à l'espacement maxi. 1.1.1 Sécurité de flottaison 1,15.</p>  <p>1.1.2 Sécurité de flottaison 1,80.</p> 	<p>Les flotteurs seront placés à l'espacement maxi.</p> <p>②.1 Sécurité 1,15</p>  <p>Sphères 10 m</p>  <p>Crayons 10 m</p>  <p>Crayons 20 m</p>	<p>L'allègement permanent créé par des cylindres porte le poids fondrier à 5% du poids à sec. L'espacement sera maximal.</p> <p>③.1 Sécurité 1,15</p>  <p>Sphères 10 m</p>  <p>Crayons 10 m</p>  <p>Crayons 20 m</p>
<p>①.2 Flotteurs à l'espacement mini. 1.2.1 Sécurité de flottaison 1,15</p>  <p>1.2.2 Sécurité de flottaison 1,80</p> 	<p>②.2 Sécurité 1,80</p>  <p>Sphères 10 m</p>	<p>③.2 Sécurité 1,80</p>  <p>Sphères 10 m</p>
<p>Pour toutes les conduites 1 à 9</p>	<p>Pour toutes les conduites 1 à 9</p>	<p>Pour les conduites 1, 6, 7, 9</p>

Conception des essais et des maquettes

Une méthode d'approche indirecte est suffisante

Pour atteindre les objectifs énoncés au § 2 et qui concernent en définitive la tenue mécanique des tubes, il faut déjà que le modèle subissant l'action d'une houle de laboratoire se déforme d'une manière telle que le rapport des rayons de courbure locaux entre modèle et réel soit l'échelle géométrique $1/\lambda$.

En fait, cette condition est suffisante. Par une vérification rapide de quelques ordres de grandeurs, nous avons acquis la certitude que le problème de la tenue mécanique ne se posait ni en termes d'ovalisation, ni en termes de flambage local.

Par conséquent, l'accès aux contraintes réelles de flexion pouvait se déterminer uniquement par la géométrie de la déformée du tube.

Cette remarque initiale est importante car elle donne plus de latitude dans la réalisation et le réglage de l'impédance mécanique de la structure.

Vu par le fluide, le tube doit globalement avoir une rigidité EI adaptée. Pour ce qui concerne sa constitution interne, on peut s'écarter des règles qu'imposerait une stricte similitude géométrique et élastique (réduction de l'épaisseur et diminution du module d'élasticité dans le rapport géométrique).

Il fallait de plus que l'encombrement géométrique externe soit réduit dans le rapport λ et le poids fondrier dans le rapport λ^3 .

Détermination de l'échelle géométrique λ et du facteur de réduction du paramètre EI

L'échelle géométrique est déterminée par le rapport entre l'amplitude maximale de la houle à simuler (impératif du cahier des charges) et l'amplitude maximale du batteur à houle dont nous disposons. Nous l'avons fixée au quarantième ($\lambda = 40$).

Reproduire l'action de la houle sur le tube et les équipements d'allègement suppose qu'on respecte *en priorité* la similitude de Froude. Dès lors l'échelle de réduction des efforts est en λ^3 et celle des moments en λ^4 . En conséquence, il faut réduire la rigidité EI par λ^5 pour que la déformée du tube soit homothétiquement semblable à la déformée réelle. Nous remarquerons que $\lambda^5 = 10^8$.

Conception des tubes

Le facteur de réduction de 10^8 de la rigidité EI des tubes permet de comprendre leur principe de réalisation. Chaque tube, long de 30 m est constitué d'une

vigtaine d'éléments linéaires raccordés par des pinces rectifiées (cf film).

La rigidité de chacun des tronçons constitutifs est assurée entièrement par une âme métallique centrale rectifiée. Il s'agit donc d'un modèle à élasticité continûment répartie.

Parmi les différents procédés de réalisation de maquette hydro-élastique linéaires brevetés par notre société, nous avons choisi, à cause de la précision de réglage du poids fondrier imposé par le cahier des charges, de reproduire la géométrie externe des tubes en enfilant sur l'âme métallique des boîtes plastiques. Cet enrobage tronçonné ne modifie pas la rigidité centrale. Les boîtes plus ou moins creuses assurent le réglage du poids fondrier avec une très bonne précision puisqu'elles sont injectées sous pression.

Validité des essais — Problèmes posés par la simulation des efforts de traînée

Il fallait savoir si la petitesse des tubes (de 12 à 40 mm) n'entraînerait pas une majoration des coefficients de traînée par rapport à la réalité. La critique risquait dès lors d'être la suivante : "Les phénomènes de résonance seront masqués et vous serez optimistes sur les états limites".

Pour répondre à cette critique, nous avons dû faire une analyse physique simple des phénomènes pour déterminer dans quel domaine de périodes, il y avait "une vitesse de glissement du tube" par rapport au milieu fluide.

Cette étude rapide, sans aucun recours à l'ordinateur, s'est faite en considérant simplement un tube de densité égale à l'unité. (Les tubes à étudier ont une densité allant de 1,15 à 1,32). Elle nous a montré que *la période de résonance en pilonnement ne coïncide jamais avec la période critique de flexion*. Le maximum du moment de flexion se situe lorsque le tube est entraîné surtout par les vitesses orbitales et non directement par le champ de pression de la houle. On peut caricaturer ce phénomène en disant qu'un tube ayant un important coefficient transversal de traînée suivra toujours la houle et finira par se rompre dans une houle de petite longueur d'onde.

Cette idée simple, mais non évidente au départ, a été rassurante quant au choix de l'échelle et à la technique de l'enrobage tronçonné. Etant certains de fournir des résultats plus pessimistes que la réalité, nous allions dans le sens de la sécurité. En estimant l'amortissement réel qui est très important, nous avons eu le sentiment qu'une augmentation des traînées sur le modèle ne conduirait pas à de très grandes erreurs dans la détermination des états limites en flexion.

Nous avons proposé, dans notre soumission une démarche expérimentale complémentaire pour évaluer les erreurs par excès. Celle-ci n'a pas été retenue par notre client. Il est vrai que cette *distorsion consciente* de la similitude hydraulique n'entraînait, en fait, qu'une *difficulté de transposition* à l'échelle réelle et n'affectait que très peu l'étude comparative du comportement des tubes.

Conception des équipements d'allègement

L'analyse physique préliminaire, exposé sommairement dans le paragraphe précédent, nous a montré en plus que les paramètres de flottaison ne joueraient pas un rôle essentiel dans le comportement dynamique du tube. On peut le montrer aisément sur le point particulier suivant :

Dans la mesure où les tubes ont des densités proches de l'unité (ce qui sera toujours le cas pour le remorquage des pipe-lines) et où la sécurité de flottaison n'est pas excessive (pour diminuer la taille et le nombre des flotteurs), les forces de rappel exercées par ces derniers sont faibles et par conséquent n'entraînent qu'une petite modification de la résonance principale d'un tube dans la houle.

Constatant ce fait essentiel, il devenait inutile de concevoir l'équipement d'allègement avec un luxe de détails. Nous nous sommes contentés de reproduire la géométrie externe et la poussée totale des flotteurs utilisés sans régler leur inertie, sans utiliser des orins élastiquement semblables.

Principaux résultats relatifs au remorquage

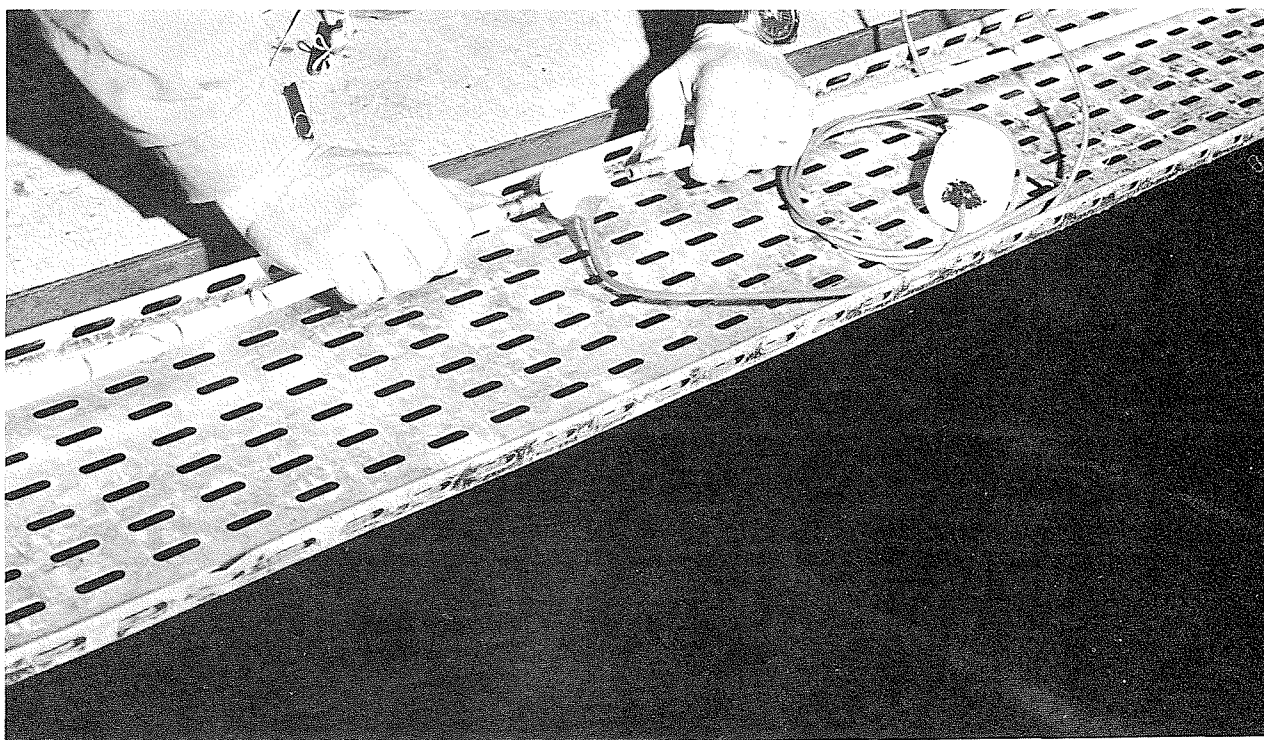
Les résultats de ces essais ne pouvant pas être encore divulgués, nous ne donnerons que les quelques conclusions générales suivantes :

- La méthode de remorquage qui est possible pour des diamètres supérieurs à 10" semble particulièrement bien adaptée pour la pose profonde puisque les tubes utilisés, plus rigides et en général non bétonnés, se comportent mieux.
- Le remorquage en immersion n'est que très légèrement plus favorable que le remorquage en surface. Il devient défavorable lorsqu'on utilise un allège permanente. Ce phénomène ne doit pas surprendre puisqu'on reporte une partie des flotteurs de surface, qui n'ont eue que peu d'action, dans le champ même de la houle. Cette conclusion est par ailleurs heureuse étant donné les complications de mise en œuvre de l'allège permanente.
- Les essais à échelle réelle effectués récemment au large de l'Ecosse sur un tube de 16" ont confirmé les résultats des essais sur modèle.

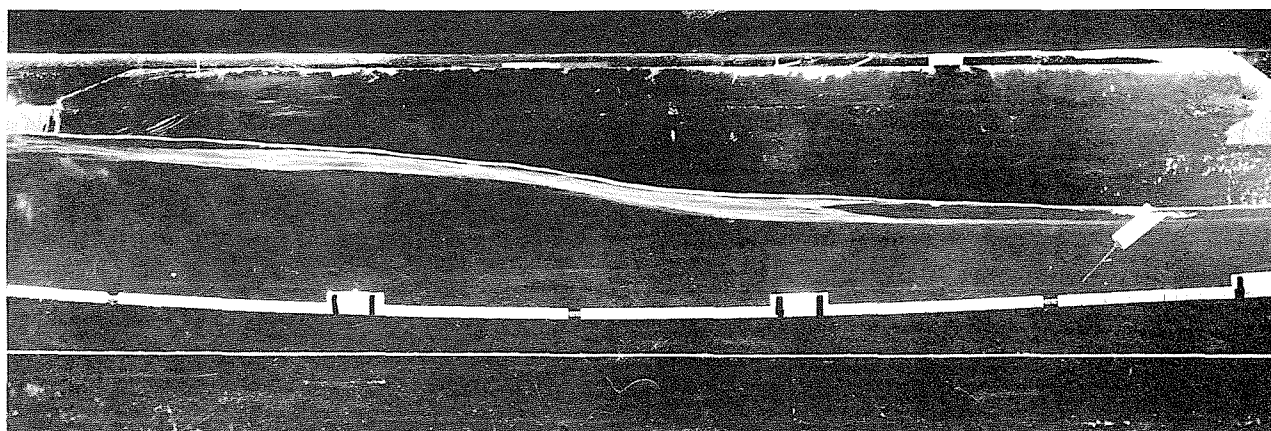
Conclusions

Nous avons tenté d'éclairer les démarches par lesquelles on arrive à simuler en laboratoire de nouveaux phénomènes tels que l'action de l'océan sur une structure élastique simple. Les techniques expérimentales que nous avons mises au point, dans l'étude des pipe-lines ou des risers et qui sont désormais *crédibles*, permettraient d'étudier leur pose à partir de barges en reproduisant l'élasticité des stingers.

Les problèmes hydroélastiques ont une acuité particu-



Mise en place d'un dynamomètre.



Déformation d'un pipe-line dans la houle.

lière dans la conception des grandes structures mises en œuvre dans l'exploitation off-shore. Parce qu'il s'agit là de réalisations à la fois fort coûteuses et peu répétitives, la maîtrise des problèmes en question ne peut se faire par le simple recours à des essais de prototypes ou de "têtes de série" : il est nécessaire de disposer de méthodes d'approche de plus en plus représentatives et applicables dès le stade des études de conception. Parmi ces méthodes, celles qui font recours à l'expérimentation sur modèle réduit — en combinaison ou non avec des approches analytiques ou numériques — paraissent devoir fournir les réponses les plus complètes et les plus sûres aux besoins exprimés, en réduisant le coût des recherches.

Nos laboratoires, qui ont de longue date participé au progrès de la simulation physique en hydrodynamique et à l'extension progressive de son champ d'application, sont convaincus que certains problèmes de résistance des structures en mer (plate-forme de forage ou de pose, superstructure des réservoirs en béton) pourraient être étudiés sur modèle hydroélastique. C'est à notre avis le cas des structures constituées d'éléments linéaires que l'on pourrait simuler en adaptant la technologie que

nous venons de décrire. Cette adaptation demanderait évidemment une analyse préalable du problème des nœuds. Il n'est pas exclu qu'on arrive, après cette étude à trouver une technologie adéquate des nœuds qui ne perturbe pas le comportement élastique des piles. Par mesures des contraintes sur ces piles, on pourrait remonter analytiquement (éléments finis par exemple) au comportement des nœuds.

Si le recours à l'hydroélasticité expérimentale n'est pas plus souvent utilisé, c'est qu'on ne pousse jamais assez loin les réflexions physiques initiales pour dégager la liste des paramètres de similitude *prioritaires*. De ce fait, on est très souvent conduit, par ignorance des principaux phénomènes à mettre en jeu, à conclure soit que l'échelle réelle est le meilleur modèle, soit à prévoir sur la maquette un luxe de détails qui la rende coûteuse et inexploitable.

Toutes les réflexions susceptibles de dégager les voies et moyens d'approche utilisant des similitudes partielles et distordues — cette distorsion dépendant du problème posé — sont de nature à faire progresser l'hydroélasticité expérimentale. L'étude des pipe-lines nous en a fourni un exemple.

*
* *



Essais sur le lac de Port Revel.

Discussion

Président : M. P. WILLM

M. le Président remercie vivement M. GUILLOUD pour son intéressant exposé et pour le film qui l'a illustré. Il n'était guère facile dans un si court laps de temps, dit-il, de préciser les hypothèses simplificatrices admises et les résultats fournis par le modèle dans ce problème très épineux d'hydroélasticité. Il ouvre ensuite la discussion.

M. GUEVEL (E.N.S. de Mécanique, Nantes) souhaiterait avoir quelques explications en ce qui concerne la distinction des termes qui, dans l'expression de la pression, sont liés à la notion de fluide parfait et à la notion de vitesse orbitales.

M. GUILLOUD précise que, du fait des vitesses orbitales de la houle, il y a un écart de vitesse entre le tube et le milieu dans lequel il se trouve plongé ; il en résulte un effort de traînée sensiblement proportionnel au carré de cet écart de vitesse dans le cas d'un fluide réel. Cet effort dépend de la longueur d'onde de la houle et diminue, toutes choses égales d'ailleurs, lorsque celle-ci augmente car le glissement entre le tube et le milieu ambiant s'atténue. Il existe aussi des effets de pression – qui se manifestent même en fluide parfait – et l'influence de la raideur du tube qui commande les mouvements de celui-ci.

Dans les essais effectués à Port-Revel, ainsi que vous l'avez vu dans le film, on mesurait les traînées de remorquage ; celles-ci tendent à stabiliser le pipe-line. Les essais effectués – à titre de vérification du modèle – dans la réalité au large de l'Ecosse montrent le même phénomène.

Etant moi-même expérimentateur, je sais combien l'extra-

polarisation du modèle réduit au réel, dans des cas analogues, peut être périlleuse, observe M. GUEVEL. N'avez-vous pas observé de phénomènes de fouettements au cours de vos divers essais ?

Non, répond M. GUILLOUD ; au large de l'Ecosse, les essais ont été faits sans "ancrage flottant" et sans remorqueur de queue à une vitesse de 4 à 5 nœuds ; si on avait remorqué le pipe à 100 nœuds, il y aurait eu vraisemblablement des effets de fouettements et d'embarquée.

Pourquoi, demande M. le Président, n'avoir pas pris le film des essais sur modèle à cadence accélérée de façon à pouvoir rétablir à la projection l'aspect du réel, au point de vue des périodes de houle ?

Nous avons pensé le faire, mais cela entraînait, en pratique, quelques difficultés de prise de vue, notamment en ce qui concerne l'éclairage et nous avons choisi une solution plus commode, répond M. GUILLOUD.

M. le Président remercie M. GUILLOUD pour son exposé remarquablement illustré par le film qui l'a suivi et pour les réponses qu'il a apportées aux questions posées par M. GUEVEL.

Il donne, ensuite, la parole à M. CIOLINA pour l'exposé de la communication qu'il a rédigée en collaboration avec MM. THOMAS et ALLOUARD (ce dernier est représenté à la séance par M. COUDERC).