



## **Erosion autour d'un cylindre à proximité du fond.**

Cyril Dulou

Doctorant, IUSTI, UMR-139 du CNRS, Université de Provence.

Christophe Chevalier

Doctorant, Laboratoire de Mécanique, Université de Caen.

Eloi Lambert

Maître de conférences, Laboratoire de Mécanique, Université de Caen.

Résumé:

Nous avons analysé les phénomènes d'érosion autour d'un cylindre à proximité du fond par des essais en canal à houle et essayé d'optimiser la forme du cylindre par l'adjonction d'ailettes pour obtenir un enfouissement maximum sur un fond sableux ( $d_{50}=0.2\text{mm}$ ). Notre étude a permis de caractériser l'amplitude de l'enfouissement du cylindre en fonction de différents paramètres (conditions de houle, forme) ainsi que l'évolution du processus d'érosion en fonction du temps. Une étude complémentaire appliquée au cas d'un support de pipeline permet de présenter le processus d'érosion autour de celui-ci. L'ensemble des résultats est tout à fait satisfaisant et en accord avec les expériences menées par ailleurs.

### **1. Introduction**

L'érosion du sable au niveau des pipes sous-marins sous l'action de la houle est un phénomène qui intéresse fortement l'industrie pétrolière. En effet, certaines compagnies voudraient voir leurs pipes s'enterrer à un endroit et ne pas s'enterrer ailleurs. La diversité des problèmes de chacun conduit à la réalisation de nombreuses études sur le sujet. Les études *in situ* étant très difficiles à mettre en œuvre (Hulsbergen, 1984), les recherches se font surtout en laboratoire, et plus particulièrement en canal à houle. Nous avons utilisé le canal à houle du LMFGC qui fait 25m de long et 0.8m de large. Nous pouvons y reproduire des houles ayant des périodes de 1.5s à 3s avec des hauteurs crête à creux de 4cm à 20cm.

Nous avons effectué des profils bathymétriques pour pouvoir mesurer l'affouillement sous le cylindre, à l'aide d'un dispositif créé par nos soins. Nous avons ainsi comparé l'affouillement sous trois formes différentes de cylindre et nous avons pu retrouver les résultats de Sumer et Fredsøe (1990) concernant un cylindre fixe. L'évolution des profils bathymétriques est différente au cours du temps suivant le type de cylindre utilisé.

Nous verrons donc, après une brève présentation du dispositif expérimental créé par nos soins, l'évolution de l'affouillement en fonction des conditions de houle et du type de cylindre utilisé (libre ou fixé, présence d'ailettes, ...). Par la

suite, l'extension de notre dispositif expérimental à l'étude d'un support de pipeline nous permet de présenter le processus d'érosion au pied de celui-ci.

## 2. Dispositif expérimental

Nous avons créé une plage composée de plusieurs parties que l'on pose sur le fond du canal (figure 1). Le sable a été mis dans une cuve amovible que l'on pouvait insérer entre deux éléments de plage.

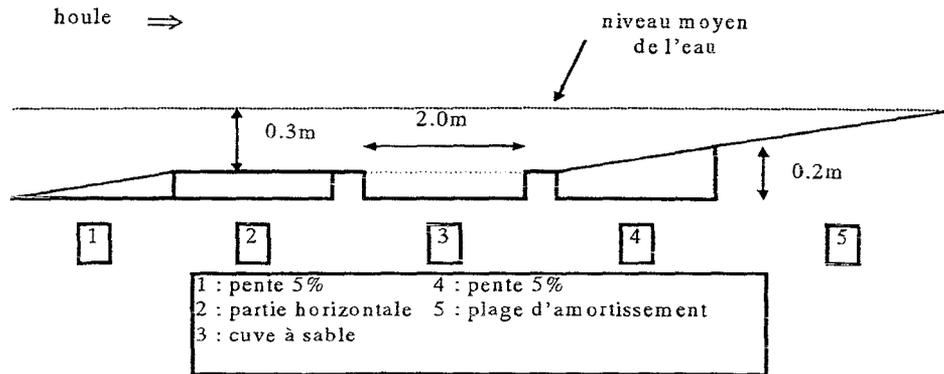


Figure 1 : Dispositif expérimental

La profondeur d'eau est de 0.3m au niveau du cylindre. La cuve à sable est divisée en trois : une grande cuve centrale (profondeur de 9cm) et deux petites latérales. Ces dernières servent à récupérer le sable en excès lors de la mise à niveau de celui-ci. On est obligé de mettre plus de sable que prévu pour que la mise à niveau soit parfaite. On évite ainsi des effets de bords.

Nous avons utilisé trois types de cylindre, de diamètre commun  $D = 4$  cm, un cylindre immobile fixé aux parois du canal, un cylindre libre verticalement (aux dimensions de la cuve à sable) et le cylindre précédent équipé d'ailettes.

Pour les profils bathymétriques, nous avons réalisé un dispositif à l'aide de la table de déplacement du vélocimètre laser qui nous permettait d'avoir des mouvements selon les trois coordonnées de l'espace (figure 2). La précision de la machine était du  $1/100^{\text{ème}}$  de millimètre. Malheureusement l'appréciation du contact ramenait la précision au millimètre.

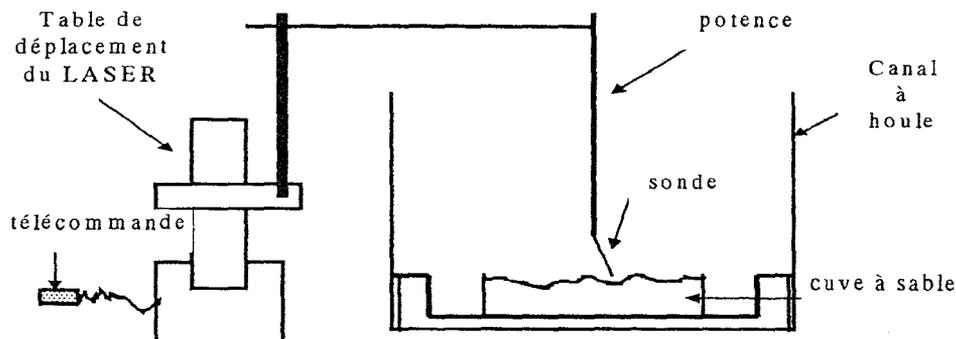


Figure 2 : Principe de mesure de la bathymétrie.

### 3. Affouillements sous le cylindre

#### 3.1. Cylindre fixé aux parois du canal

L'affouillement est très rapide sous le cylindre, mais si dans certains cas il se stabilise rapidement, dans d'autres cas il a tendance à toujours évoluer ou à osciller autour d'une position d'équilibre.

Un problème que nous avons rencontré est la limite de la cuve par « grosse » houle. En effet, pour des conditions de houle de plus de 10 cm de hauteur, beaucoup de sable se déplaçait et la cuve se vidait petit à petit. Il y avait donc un déficit en sable qui altérait les résultats obtenus. Pour ces conditions, les essais étaient écourtés. On ne prendra donc pas la valeur de l'affouillement en fin d'essai, mais on prendra un temps de référence qui est commun à tous les essais.

Nous avons choisi de prendre  $t=20$  mn sachant qu'à cet instant la position d'équilibre n'est pas obligatoirement atteinte. Plus la houle est grande, plus l'affouillement est profond.

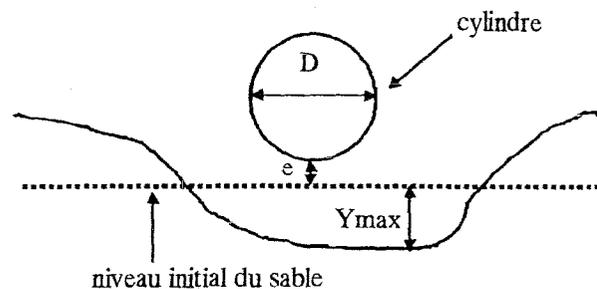


Figure 3 : Notations utilisées.

La relation entre le nombre de Keulegan Carpenter  $KC = U_m T/D$  ( $U_m$  étant la vitesse orbitale maximale au niveau du cylindre,  $T$  la période de la houle et  $D$  le diamètre du cylindre) et l'affouillement maximum relatif est visible sur la figure 4. On voit que l'augmentation de  $KC$  entraîne une augmentation de la profondeur de l'affouillement.

Sumer et Fredsoe (1990) ont proposé une formule liant  $KC$  à l'affouillement pour un cylindre fixé et pour  $e=0$  (cylindre reposant sur le fond au départ) :

$$\frac{Y_{\max}}{D} = 0.10KC^{0.5} \quad (1)$$

Nos résultats sont en parfaite concordance avec cette relation.

Par contre, si on compare avec la formule proposée par Ozkan Cevik et Yüksel (1997), on trouve que cette dernière n'est pas adaptée à notre cas d'étude (voir figure 4) :

$$\frac{Y_{\max}}{D} = 0.05 KC^{0.68} \quad (2)$$

La différence entre ces deux résultats vient sans doute du fait que Sumer et Fredsøe emploient un sable dont le diamètre médian est le même que le notre,  $d_{50}=0.2$  mm, alors que Ozkan Cevik et Yüksel utilisent un sable très grossier,  $d_{50}=1.28$  mm.

Si on prend le cas du cylindre libre verticalement, on ne vérifie pas les résultats de Sumer. L'hypothèse du cylindre fixé est donc importante.

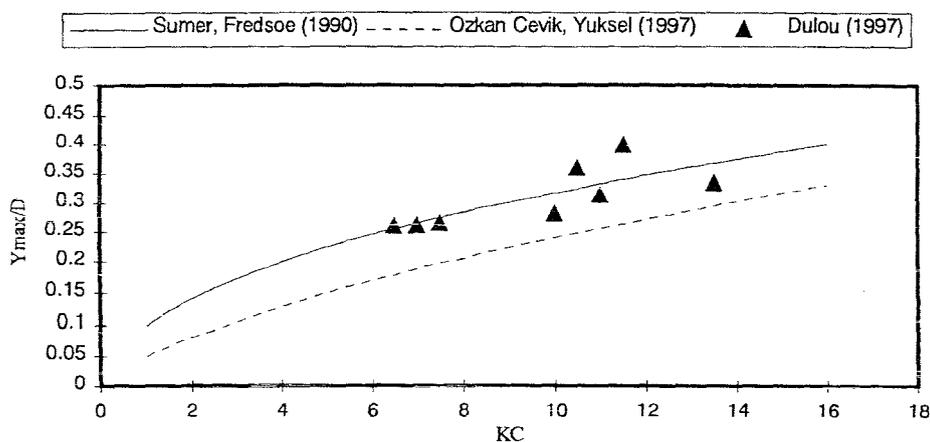


Figure 4 : Affouillement relatif maximum en fonction de  $KC$  pour un cylindre fixé posé sur le fond, comparaisons de nos résultats expérimentaux avec les formules empiriques de Sumer et Fredsøe (1990), Ozkan Cevik et Yüksel (1997).

### 3.2. Cylindre non fixé

Avec ce cylindre, nous avons une érosion un peu différente de la précédente et nous pouvons visualiser une érosion type autour d'un cylindre (Leeuwestein, 1984). On parle maintenant d'enfouissement du cylindre car au cours de l'érosion il va s'enfoncer dans le sable. Le phénomène est très rapide, selon la houle il commence à descendre dès les premières minutes. Mais cette évolution dans les premières minutes est très aléatoire. Suivant sa position initiale par rapport au sable, l'érosion se fait soit par les côtés et se propage vers le centre, soit par les côtés et par le centre (érosion très rapide).

L'affouillement est plus important avec le cylindre non fixé qu'avec le cylindre fixé. Il semblerait que l'on ait du mal à trouver une position d'équilibre car parfois après des temps longs, le cylindre s'enfonce encore. Il aurait fallu augmenter la durée des essais. Un autre problème lié à la durée des essais est que l'on n'a pas retrouvé notre cylindre complètement enfoui avec du sable le recouvrant (Leeuwestein, 1984), cependant le cylindre était bien ancré dans le sable.

### 3.3. Cylindre avec ailettes

Il y a une multitude de possibilités pour mettre des ailettes sur le cylindre. La figure 5 résume très bien les différents types d'ailette utilisés.

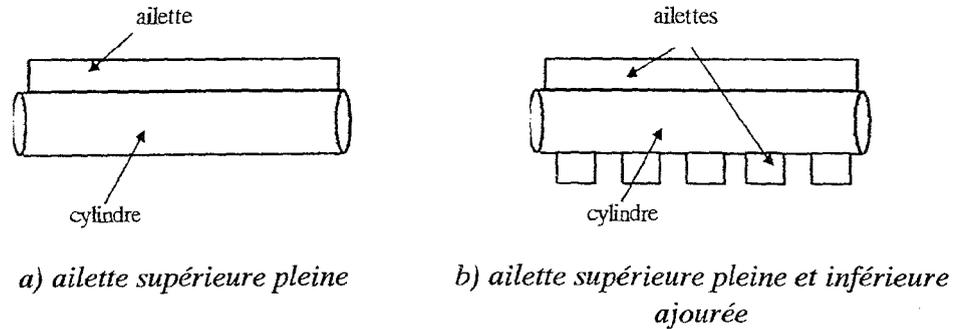


Figure 5 : Disposition des ailettes sur le cylindre.

Le but de l'ailette est d'augmenter le diamètre apparent du cylindre afin d'augmenter la vorticité. L'enfouissement étant proportionnel au diamètre du cylindre, l'érosion était donc plus importante avec l'ajout des ailettes. On peut encore accélérer l'érosion en plaçant l'ailette sous le cylindre. A l'augmentation du vortex horizontal se superpose l'effet d'un vortex d'axe vertical aux extrémités des ailettes (phénomène de bord). Le résultat est représenté sur la figure 6.

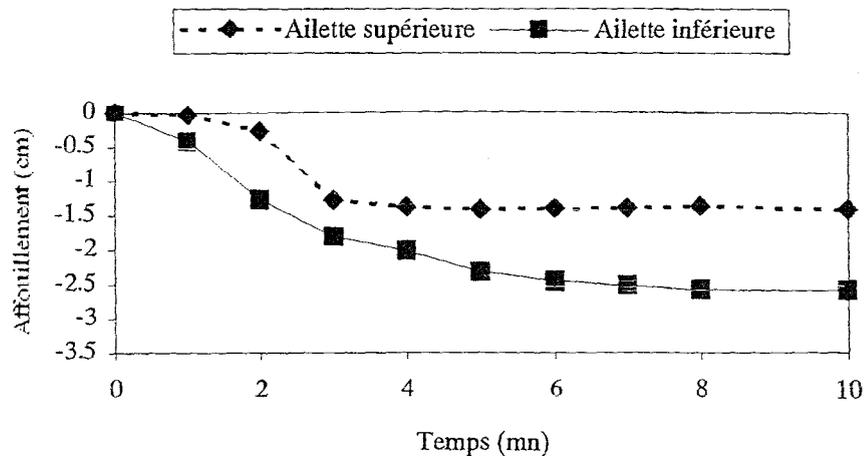


Figure 6 : Affouillement avec ailette supérieure et ailette inférieure

Pour mettre en évidence ce phénomène, nous avons divisé l'ailette (de 2 cm de hauteur) sous le cylindre en 3, puis 5 parties égales. Nous avons ainsi créé plusieurs zones d'érosion sous le cylindre. On peut voir les résultats sur la figure 7. Plus on augmente les discontinuités, plus l'enfouissement augmente. Nous avons ainsi obtenu l'enfouissement le plus grand avec le cylindre de la figure 5b.

Mais une ailette placée à certains endroits peut au contraire réduire l'affouillement. C'est notamment le cas pour des ailettes placées en V inversé sous le cylindre (Dulou, 1997).

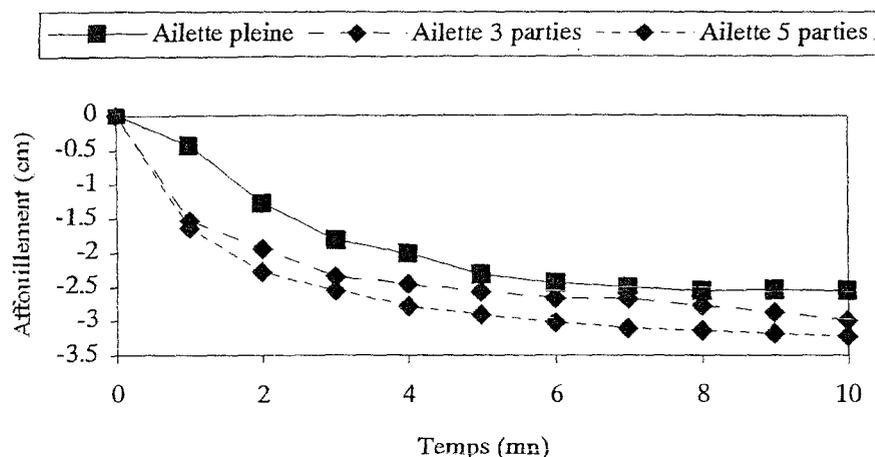


Figure 7 : Affouillement suivant le type d'ailette inférieure

#### 4. Erosion autour d'un support de pipeline

##### 4.1. Etude du champ des vitesses

La pose d'un pipeline sur le fond tend à favoriser l'érosion. Pour remédier à cet effet ou en présence de fonds accidentés, il est parfois nécessaire de surélever le pipeline du fond par un dispositif de blocs support ou berceaux tels que ceux figurant sur la figure 8.

Profitant du dispositif expérimental mis en place pour les essais d'érosion précédemment présentés, nous avons effectué quelques tests sur fond sableux de l'ensemble cylindre + support. Ces essais visuels viennent compléter une étude plus complète du champ des vitesses autour d'un tel obstacle dans le cas d'une houle déferlante (Chevalier, Lambert et Bélorgey, 1998).

Lors de cette étude, nous avons mesuré le champ des vitesses autour d'un cylindre seul surélevé du fond et au-dessus d'un ensemble pipeline + support selon l'axe médian du berceau (cf. figure 8). La surélévation par rapport au fond était de 17 mm pour un cylindre de 4 cm de diamètre, la profondeur d'eau locale de 20 cm et la houle générée déferlante glissante de période  $T = 1,7$  s pour une hauteur de vague de 15,5 cm au-dessus du cylindre. La plage utilisée lors de cette expérience avait une pente constante égale à 5 %. Les mesures se font à l'aide d'un vélocimètre laser 2 composantes et un traitement par vagues moyennes permet d'obtenir l'évolution des vitesses pour différentes phases de propagation de la houle (Lambert, 1994). La figure 9 présente un exemple de champ des vitesses obtenu pour une phase après le passage de la crête dans le cas de l'ensemble cylindre + support.

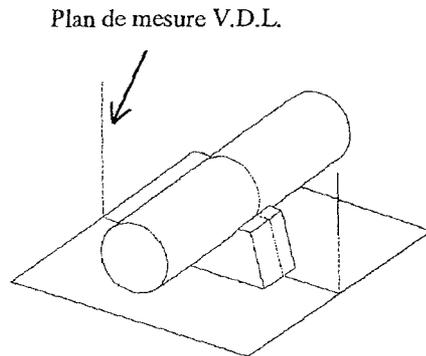


Figure 8 : Support de pipeline

Figure 9 : Exemple de champ des vitesses au-dessus du support de pipeline obtenu par V.D.L.

La comparaison entre les deux champs des vitesses, avec ou sans support, permet de mieux comprendre l'écoulement en houle déferlante. Le premier point intéressant à noter dans les deux cas est la dissymétrie existant entre le passage de la crête, événement bref avec présence des vitesses les plus importantes, et la phase de reflux, d'une durée plus longue avec des vitesses moindres. Dans le cas du cylindre seul, cette dissymétrie se retrouve au niveau de la formation de tourbillons contrarotatifs amont et aval, les premiers étant nettement moins prononcés que les seconds. Dans ce même cas, les vitesses les plus importantes sont situées en dessous et au-dessus du cylindre. L'étude de l'écoulement dans l'axe médian du berceau montre une formation tourbillonnaire de nature différente. Nous avons ainsi pu mettre en évidence la création d'un unique tourbillon aval lors du passage de la crête déferlante (voir figure 9). L'importance des vitesses mesurées au fond en aval peut également être à l'origine d'une forte érosion au-delà du berceau.

#### 4.2. Etude de l'érosion autour du support

Afin de mieux comprendre le processus d'érosion, nous avons réalisé plusieurs tests sur fond sableux dans le cas d'un cylindre + support pour une houle d'incidence normale. Les essais ont été menés pour des houles non déferlantes pour éviter les problèmes de déficit de sable dans la cuve en cours d'essai.

Dès les premières vagues, on note que l'érosion débute aux quatre coins du support de façon identique entre l'amont et l'aval alors que l'on remarque une légère accumulation de sable dans le plan médian du berceau au pied de celui-ci. Ceci s'explique par la présence de larges tourbillons amont et aval qui favorisent l'érosion au-delà de l'obstacle et le dépôt de sédiments au pied de celui-ci (voir figure 9 dans le cas d'une houle déferlante). Sous le cylindre, on note une zone d'érosion identique à celle observé pour un cylindre fixé à une certaine distance du fond.

Plus le nombre de vagues augmentent, plus l'érosion aux angles du berceau se fait importante, se propageant transversalement vers le plan médian du berceau et longitudinalement. Les zones érodées sous le support finissent par occuper la totalité de la surface portante de celui-ci d'où un déchaussement dans le cas où le cylindre est fixé aux parois du canal. Par la suite, la descente du support se poursuit. Dans le cas où le cylindre est libre verticalement, l'ensemble descend à la vitesse du support.

Le processus d'érosion est très complexe et présente un caractère tridimensionnel aux arêtes du berceau. Par ailleurs, l'observation sur fond sableux n'est pas aisée. Nous avons donc procédé à une série de visualisations sur un fond sableux de faible épaisseur pour mieux comprendre le phénomène dans sa première phase.

#### 4.3. Visualisation du processus d'érosion

Lors de ces essais, une fine couche de sable (2 à 3 mm) a été disposée sur un fond horizontal puis l'ensemble cylindre + support est mis en place sur cette couche. L'épaisseur et les dimensions de cette couche étant faibles, il n'y a pas trop de sable en mouvement et il est plus aisé de repérer les zones érodées où le sable manque. Nous pouvons ainsi mettre en évidence le développement de l'érosion autour du berceau. La figure 10 présente ce processus.

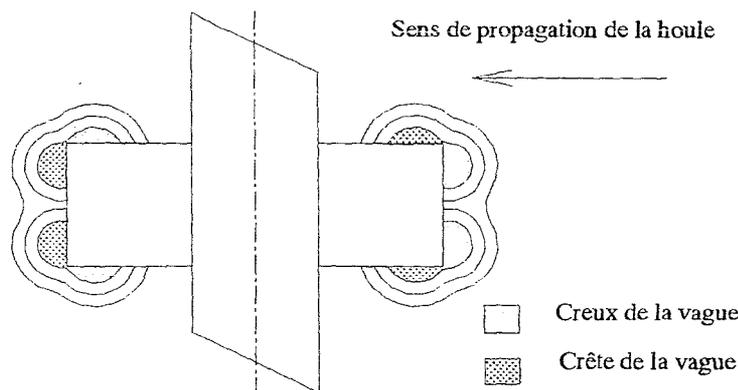


Figure 10 : Processus d'érosion au pied du support

On note ainsi que l'érosion à un coin du support se fait en deux temps lors du passage de la crête et du creux respectivement. Ainsi, si l'on considère par exemple le côté aval, lors de la phase de flux, l'érosion se fait derrière le berceau alors que lors de la phase de reflux, l'érosion s'effectue le long du berceau avec une intensité moindre. Peu à peu, les différentes zones d'érosion augmentent et finissent par se rejoindre. Le même phénomène se produit en amont du berceau, seules les phases de la houle étant inversées.

Ce processus d'érosion est plus compréhensible si l'on observe d'un peu plus près le mouvement des sédiments qui permet de mettre en évidence les

tourbillons générés par les arêtes du support. Leur projection sur le fond est schématisée sur la figure suivante pour deux phases caractéristiques de la houle. Nous retrouvons là des résultats comparables à ceux obtenus pour des piles verticales dans la houle (Sumer, Christiansen et Fredsøe, 1993).

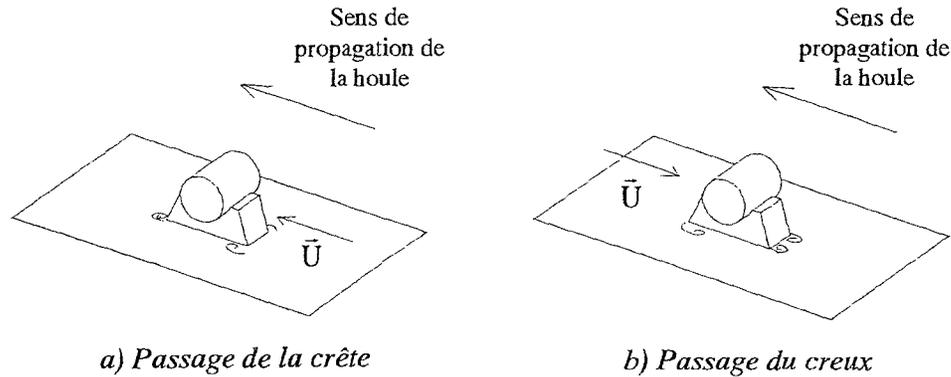


Figure 11 : Détachement tourbillonnaire aux arêtes des supports.

## 5. Conclusion

Dans notre étude, nous avons pu retrouver les résultats de Sumer et Fredsøe (1990) pour un cylindre fixé et reposant sur le sable ( $e = 0$ ). Mais nous avons également pu comparer l'affouillement sous un cylindre fixé, à l'enfouissement qui est plus important, d'un cylindre libre verticalement. Cette dernière expérience fut très intéressante car nous avons pu suivre le cylindre lors de son enfouissement.

Nous avons ajouté des ailettes sur le cylindre et il s'est avéré que le cylindre s'enfouissait encore plus dans le sable. Mais on a remarqué aussi qu'une ailette placée à certains endroits pouvait au contraire limiter l'enfouissement.

Ainsi un certain nombre d'enseignements ont été tirés de ces expériences. La campagne principale d'essais a mis en évidence que la durée des essais effectués devait être prolongée, surtout avec le cylindre non fixé. C'est en effet avec cette configuration que la position d'équilibre fut difficile à déterminer et une prolongation des essais aurait confirmé certains résultats. La position d'équilibre pouvait être atteinte en 10 mn, ou ne pas être atteinte dans le cas du cylindre avec ailettes.

Concernant les essais d'érosion autour d'un support de pipeline, les expériences menées ont permis de mieux comprendre le développement de l'érosion autour d'un tel obstacle. Associés à des mesures du champ des vitesses, ces essais permettent d'expliquer le début du processus et peuvent aider à une optimisation des formes des blocs supports ou bien à la protection des berceaux actuels. Le phénomène est ici très complexe du fait de l'interaction des tourbillons développés par la structure horizontale cylindrique avec ceux développés aux arêtes du support.

## **6. Références**

CHEVALIER C., LAMBERT E. et BELORGEY M. (1998) - *Velocity field around a pipeline in breaking waves*, ISOPE 1998, Montréal.

DULOU C. (1997) - *Etude de l'érosion autour d'un cylindre horizontal à proximité du fond*, Rapport de D.E.A. de Génie Civil, Université du Havre.

HULSBERGEN C.H. (1984) - *Stimulated self-burial of submarine pipelines*, Offshore Technology conference, OTC 4667, Houston, Texas, may 7-9, 1984.

LAMBERT E. (1994) - *Analyse des effets de proximité dans l'action de la houle sur un couple de cylindres horizontaux*, Thèse de Doctorat de l'Université du Havre.

LEEUWESTEIN W. (1984) - *Scour around submarine pipelines*, Proc. Offshore Pipeline Conference, The Hague, January 1984.

OZKAN CEVIK E. et YUKSEL Y. (1997) - *Local scour around submarine pipelines under wave conditions*, Proceedings of the seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, mai 25-30, Vol II, pp 269-272.

SUMER B.M. et FREDSE J. (1990) - *Scour below pipelines in waves*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., ASCE, Vol 116, No. 3, pp. 15-31, 1990.

SUMER B.M., CHRISTIANSEN N. et FREDSE J. (1993) - *Influence of cross section on wave scour around piles*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 119, No. 5, September/October, 1993.