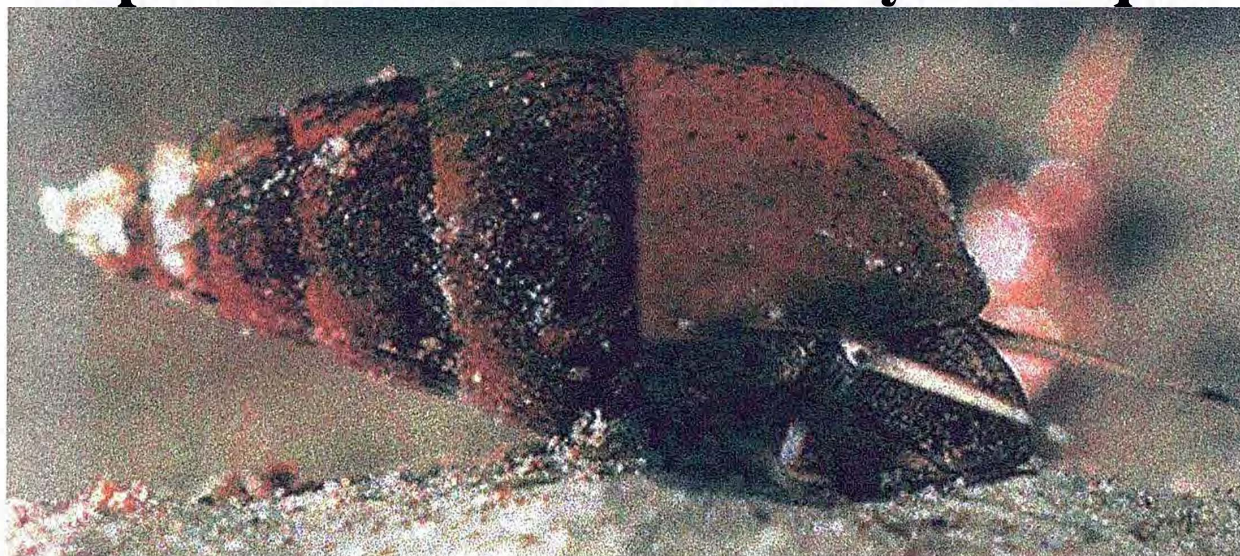


Centre de Recherche en Ecologie et Aquaculture (CREMA)
Place du séminaire, BP 5
17137 L'HOUMEAU
France

Angélique SYGUT

Mémoire de licence de Biologie Générale : Université de La Rochelle
Stage du 05 juin au 31 août 2000

Influence de la coquille du gastéropode *Hydrobia ulvae* sur le seuil critique d'érosion d'un sédiment cohésif : mise en évidence par expérimentations en canal hydraulique



Mollusque Gastéropode : *Hydrobia ulvae* (jusqu'à 8 mm de long)

Responsables du stage : Francis ORVAIN (Ifremer) & Pierre-Guy SAURIAU (CNRS)

RÉSUMÉ

Le modèle biologique *Hydrobia ulvae* a été utilisé afin de déterminer l'influence de sa coquille sur la stabilité de sédiments cohésifs prélevés dans la vasière intertidale de la Baie de l'Aiguillon. Les expériences ont été réalisées en canal hydraulique. Dans une première étape, ont été déterminés, expérimentalement, les profils de courant au dessus d'une population d'hydrobies grâce à un vélocimètre ultrasonore. Des abondances croissantes d'individus ont été testées, et une relation empirique a été établie entre le nombre d'individus par mètre carré et la rugosité de surface du substrat. Dans une seconde étape, a été testée l'influence de l'abondance des hydrobies sur le seuil critique d'érosion en masse d'un sédiment vaseux, à partir de l'interprétation des mesures de turbidité acquises en continu par un turbidimètre.

Ces manipulations ont permis d'étudier l'effet « coquilles » des hydrobies sur les propriétés d'érodabilité d'un sédiment cohésif indépendamment des autres processus de bioturbation générés par cette espèce : enfouissement, reptation en surface, sécrétion de mucus.

REMERCIEMENTS

Dans le cadre de ce stage, j'adresse mes remerciements à Monsieur Patrick GENTIEN, Directeur du CREMA-L'Houmeau, pour m'avoir acceptée au sein de son laboratoire.

Je tiens à présenter mes remerciements à Monsieur Pierre-Guy SAURIAU qui m'a permis de réaliser ce stage, et qui a su me guider en me donnant de précieux conseils lors de la rédaction de ce mémoire.

Je souhaite aussi (et bien évidemment !) remercier Francis ORVAIN avec qui j'ai réalisé l'ensemble des expériences, « pataugé » dans la vasière à la recherche des hydrobies (!!), mixé de la vase en « mouchetant » les murs du labo (!) ...et qui a su être très disponible au moment de l'élaboration de ce rapport malgré la distance (merci Internet)...

Je n'oublie surtout pas l'ensemble des chercheurs, techniciens, thésards et stagiaires qui ont su être présents quand j'ai eu besoin de leur aide, et qui ont su mettre une ambiance fort sympathique : Christine et ses imitations de protistes (!) ; Françoise, Martine et le « s.o.s dépannage » ; Michel et ses conseils « bricolage » ; Lionel et son aide précieuse en informatique ; Alain et ses tours d'avion ; Manu et ses documents à scanner, et tous les autres : Seb, Christelle, Caroline, Bruno, Benoît, Anne-Gaëlle, Aude, Agnès...

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
2. MATÉRIELS & MÉTHODES.....	2
2.1. LE CANAL HYDRAULIQUE.....	2
2.2. PROFILS DE VITESSE DE COURANT	3
2.2.1. <i>Le vélocimètre</i>	3
2.2.2. <i>Les plaques de PVC</i>	3
2.2.3. <i>Acquisition des données</i>	4
2.2.4 <i>Traitement des données</i>	4
2.3. SEUIL CRITIQUE D'ÉROSION EN MASSE.....	5
2.3.1. <i>Le turbidimètre</i>	5
2.3.2. <i>Préparation du sédiment</i>	6
2.3.3. <i>Acquisition des données</i>	7
2.3.4. <i>Traitement des données</i>	7
3. RÉSULTATS & DISCUSSION.....	7
3.1. PROFILS DE VITESSE DE COURANT	7
3.2. SEUIL CRITIQUE D'ÉROSION	10
4. CONCLUSION	13
BIBLIOGRAPHIE	14

1. INTRODUCTION

La baie de Marennes-Oléron a établi son dynamisme économique depuis les années 70 dans le domaine de la conchyliculture par la culture de l'huître creuse japonaise *Crassostrea gigas* (Thunberg). L'huître filtre l'eau de mer et se nourrit de particules présentes dans l'eau qu'elle récupère grâce à ses branchies. Il est classiquement admis que le phytoplancton constitue la part essentielle de son bol alimentaire. Or, sur le site de Marennes-Oléron, il a été démontré grâce au traçage isotopique naturel que la biomasse micro-algale benthique, le microphytobenthos, pouvait majoritairement contribuer à l'énergie assimilée par les huîtres (Riéra & Richard, 1997). Aussi, les processus intervenant dans la dynamique du microphytobenthos des vasières intertidales sont déterminants vis-à-vis de la capacité trophique de la baie. En particulier, les flux de remise en suspension de ce microphytobenthos alimentent la colonne d'eau sus-jacente en biomasse algale, et ces flux sont eux-mêmes directement associés à la dynamique hydrosédimentaire. La stabilité et l'érodabilité d'un sédiment cohésif (vase) sont dépendantes de nombreux facteurs physiques et biologiques comme la teneur en eau (Hawley, 1981), la minéralogie, la granulométrie, la composition en matière organique, l'activité des organismes benthiques et des bactéries (Rhoads *et al.*, 1978). La macrofaune intervient aussi sur les propriétés de l'interface eau-sédiment (bioturbation) et notamment sur le flux d'érosion (Meadows & Tait, 1989; Eckman *et al.*, 1981). Par leur mode de nutrition (Rhoads & Young, 1970), leurs déjections, leurs déplacements, ces espèces modifient les propriétés physiques du sédiment (fluidité et donc érodabilité). Ainsi, des espèces comme *Hydrobia ulvae* (Blanchard *et al.*, 1997), *Macoma balthica* (Willows *et al.*, 1998) entretiennent un flux de particules entre eau et sédiment. *Corophium volutator* (Limia *et al.*, 1997; Grant & Daborn, 1994) est particulier car, d'une part, il creuse son habitat en forme de U, stabilisant ainsi la vase, et d'autre part, par son mode de nutrition dépositif, il contribue aussi à sa déstabilisation. De part ce genre de paradoxe, la richesse spécifique, leurs interactions et les différents types de bioturbation, il semble très délicat d'envisager une classification des espèces par mode d'action (Nowell & Jumars, 1984).

Le gastéropode *Hydrobia ulvae*, dont la taille ne dépasse pas 8 mm de long, par ses fortes abondances dans la baie de Marennes-Oléron (jusque 20 000 individus. m⁻²) (Sauriau, 1987), semble jouer un rôle non négligeable dans les processus de bioturbation, de déstabilisation du sédiment et dans le contrôle des flux de remise en suspension du microphytobenthos. Aussi, l'hydrobie sera notre modèle biologique.

Les expériences réalisées dans le cadre de mon stage s'inscrivent dans le sujet de thèse de Francis ORVAIN : il a pour objectif de proposer une modélisation réaliste des facteurs physiques et biologiques intervenant dans la dynamique sédimentaire en milieu littoral, en particulier pour la vasière intertidale de Montportail-Brouage. Pour ma part, j'ai entrepris deux types de séries de manipulations ayant chacune un objectif précis :

- mesurer, expérimentalement en canal hydraulique, les profils de vitesses de courant au dessus d'une population d'hydrobies afin d'étudier l'influence des coquilles sur la rugosité du substrat: tout obstacle à l'écoulement est en effet un site à plus forte turbulence qui se traduit par une accentuation locale de la tension de frottement, ce qui peut se traduire par une facilitation de la remise en suspension du sédiment sous-jacent, uniquement due à la présence des coquilles;

- déterminer, également en canal hydraulique, la modification du seuil critique d'érosion en vase fluide sous l'influence de la présence des coquilles d'hydrobies.

2. MATÉRIELS & MÉTHODES

2.1. Le canal hydraulique



Figure 1: Le canal HYDROBIOS du CREMA L'Houmeau

Ce prototype est un canal à circulation fermée qui fonctionne dans le plan vertical. Sa capacité volumique est de 1.15 m^3 d'eau. Sa longueur est de 4 mètres, sa section est de 40 cm dans la partie supérieure alors qu'elle est de 80 cm dans la partie inférieure (figure 1).

Le canal comporte trois parties :

- la partie inférieure où se trouve le moteur mettant en mouvement deux pompes hélice, fonctionnant en rotation opposée,
- une zone élargie pour tranquilliser les courants d'eau,
- la partie supérieure où se trouve, en amont, une zone avec trois convergents (deux verticaux et un horizontal) et en aval, la section test où il est possible d'installer une boîte remplie de sédiment ou une plaque de PVC.

Avant la section test, les formes concaves du canal (systèmes de convergents) permettent l'établissement d'un régime turbulent rugueux quelle que soit la texture de la vase. Il est également possible d'insérer une structure en nid d'abeille utilisée classiquement dans les canaux benthiques afin de rediriger le flux avant le convergent pour le rendre unidirectionnel. La forme précise du canal à cet endroit a été étudiée afin que les conditions d'écoulement soient complètement stables au niveau de la zone test et pour amoindrir l'effet accélérateur de l'eau dans la zone de remontée de celle-ci.

Ce système est fiable et il permet d'avoir des conditions hydrodynamiques stables, unidirectionnelles et reproductibles qui permettent de simuler les processus de remise en suspension et d'étudier les processus se situant dans la couche limite benthique (Nowell & Jumars, 1987).

Dans la section test, des plaques de PVC avec différents rugosités y sont installées: un vélocimètre ultrasonore (figure 2) à effet Doppler (système MINILAB) avec son portique nous permet de mesurer le profil vertical de courant dans la section test et ce, pour différentes vitesses du moteur.

Il est également possible d'y placer des boîtes contenant le sédiment testé: elles ont été construites afin de régler le niveau du lit de sédiment (surface : 3344 cm²) de manière à éviter la formation d'obstacles qui jouent un rôle capital dans les processus d'érosion. En aval de la section test, un turbidimètre y est installé (figure 3) afin d'assurer l'acquisition en continu des données de turbidité (OBS).

Toutes les expériences sont réalisées avec une hauteur d'eau de 15 cm dans la partie supérieure du canal.

2.2. Profils de vitesse de courant

2.2.1. Le vélocimètre

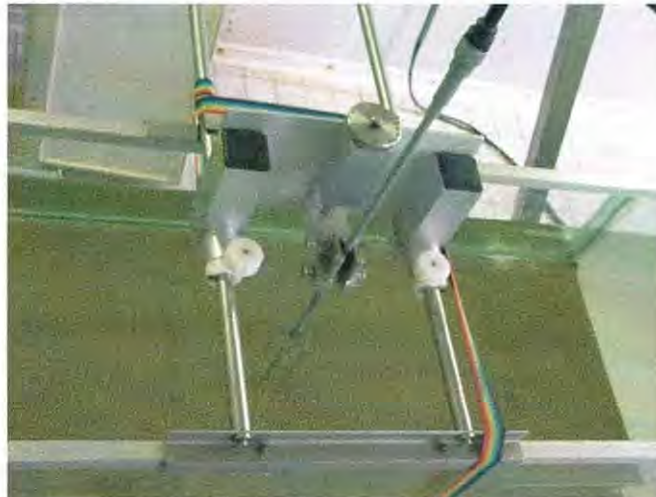


Figure 2: Le dispositif de montage du vélocimètre ultrasonore (MINILAB)

Minilab est un système de mesure ultrasonore à effet Doppler: il mesure le courant en émettant des signaux acoustiques entre deux paires de transducteurs de la sonde situés dans deux directions orthogonales.

Pour l'ensemble des mesures, la sonde a toujours été placée au centre du canal afin d'éviter une hétérogénéité transversale des vitesses dans le canal (Orvain, 2000).

2.2.2. Les plaques de PVC

Afin de ne prendre en compte que l'effet de la coquille des hydrobies sur la rugosité du substrat et de se libérer de l'effet de la bioturbation elle-même, des plaques de PVC ont été mises au point sur lesquelles ont été collées des animaux. Quatre plaques avec des densités d'hydrobies différentes ont été fabriquées, soient 0, 5 000, 17 000 et 50 000 individus. m⁻². Dans chaque cas, de la vase lyophilisée a également été collée afin de respecter l'influence directe de la granulométrie sur la rugosité.

La récolte de la vase s'est faite dans la baie de l'Aiguillon où l'ensemble des propriétés du sédiment (granulométrie, composition minérale et organique) est la même que dans la baie de Marennes-Oléron (Migniot, 1968). Les hydrobies sont récupérées après un tamisage sur 1 mm.

Le collage utilise trois composants:

- la résine polyester
- 1% d'octoate de cobalt qui joue le rôle d'accélérateur
- 4% du catalyseur polyester peroxyde de méthyléthylcétone, qui permet le durcissement de la résine

2.2.3. Acquisition des données

La vitesse de rotation du moteur a été progressivement augmentée grâce au variateur de fréquence (annexe 1). Pour chacune d'elles (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 Hz), et pour chaque distance de la sonde par rapport au fond (35, 36, 38, 40, 45, 55, 65, 75, 85, 115, 145, 175, 225, 325, 425, 535, 1035 mm), 2 000 saisies de vitesse du courant ont été réalisées. Un profil de vitesse de courant a été obtenu à chaque valeur de fréquence (annexe 3).

2.2.4 Traitement des données

Le traitement des données se fait sur un terminal de type "Station Sun", grâce au système d'exploitation "Unix", à travers un module écrit en MATLAB. Trois étapes sont discernables pour chaque saisie de 2 000 données:

1) le "lissage" permet d'enlever les valeurs aberrantes, c'est-à-dire celles n'étant pas comprises dans l'intervalle [moyenne-3*écart-type; moyenne+3*écart-type]; ce lissage est refait en boucle jusqu'à ce que l'écart-type se stabilise: ainsi, il ne varie plus même si des données sont ôtées (annexe 2); les profils verticaux de la vitesse du courant sont alors construits afin de déterminer la distance (z) de la sonde par rapport au fond à partir de laquelle la vitesse de courant libre (U_∞) est déterminée (annexe 3): U_∞ dépend donc uniquement de la vitesse de rotation du moteur ;

2) pour chaque profil, la courbe $\ln(z) = f(\text{vitesse de courant})$ permet de déterminer les limites de la couche logarithmique, correspondant à la portion linéaire (annexe 4) sur laquelle nous travaillons. Rappelons l'équation classique qui montre la relation entre la vitesse de cisaillement (U^*) et la vitesse de courant à une certaine hauteur (z) du fond (Aide mémoire de dynamique sédimentaire, Pierre LE HIR, 1994):

$$(1) \quad U(z) = \frac{U^*}{k} \ln \frac{z}{z_0}$$

avec k étant la constante de Karman : $k = 0.41$ (valeur expérimentale) (Schlichting, 1979).

Cette relation est directement dépendante de z_0 , la longueur de rugosité qui quant à elle est calculée en fonction du coefficient de Nikuradse (k_s) ; ce coefficient est fonction de la nature du fond :

- a) il ne dépend que de la granulométrie dans le cas d'un fond lisse ;
- b) tout obstacle à l'écoulement du fluide, telles que les coquilles d'hydrobies, modifie ce k_s . Dans le cas d'un écoulement turbulent rugueux, c'est-à-dire pour un nombre de rugosité de Reynolds (Re^*):

$$Re^* = \frac{U^* \cdot k_s}{\nu} \geq 3.5$$

(Nowell & Jumars, 1984)

ν : viscosité cinématique de l'eau = $1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

k_s : coefficient de Nikuradse (en m)

(Le nombre de Reynolds traduit l'importance de la turbulence par rapport au flux laminaire). nous avons :

$$(2) \quad z_0 = 0,033 \cdot k_s$$

Nous sommes dans ce cas ; néanmoins nous devons vérifier que nous sommes bien dans les conditions d'écoulement turbulent rugueux par le calcul du nombre de rugosité de Reynolds.

Ainsi, de l'équation (1), est obtenue la relation liant U^* à $U(z)$:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln z - \frac{U^*}{k} \ln z_o$$

cette équation est de type:

$$U(z) = a \cdot \ln z + b$$

avec

$$(3) \quad b = -\frac{U^*}{k} \ln z_o$$

$$(4) \quad a = \frac{U^*}{k} \quad \text{soit} \quad U^* = ka = 0.41a$$

Dans un premier temps, nous déterminons la pente de la portion linéaire, de laquelle nous déduisons U^* (4).

3) connaissant U_∞ et U^* pour chaque profil, la relation $U^* = f(U_\infty)$ [figure 4] permet d'en déduire z_o pour chacune des plaques testées (5) et donc, le k_s correspondant (6) :

$$(5) \quad z_o = \frac{z_\infty}{\frac{k U_\infty}{U^*}}$$

$$(6) \quad k_s = 30 \cdot z_o$$

2.3. Seuil critique d'érosion en masse

2.3.1. Le turbidimètre

Une sonde martec ISI (figure 3) placée dans le canal, après la zone test, permet de mesurer en continue la turbidité (1 donnée d'OBS toutes les 15 secondes).



Figure 3 : Le turbidimètre ISI

2.3.2. Préparation du sédiment

Un stock de vase est prélevé sur la vasière et ramené au laboratoire où il est tamisé sur 1 mm de manière à retirer la macrofaune benthique. De l'eau est ajoutée à cette vase afin d'accroître sa fluidité jusqu'à une concentration en sédiment d'environ 200g. l⁻¹; en effet, au dessus de cette valeur, il n'y aurait pas d'érosion en masse pour les vitesses utilisées dans le cas des expériences sans hydrobie ; en dessous de cette valeur, la fluidité du sédiment trop élevée rendrait imprécis la détermination des seuils critiques d'érosion en masse en présence d'hydrobies (comm. pers. Orvain). Quatre boîtes en PVC sont remplies de sédiment sur une hauteur de 2 cm, et mises successivement en canal. Le niveau d'eau dans le canal est augmenté jusqu'à une hauteur de 15 cm au-dessus du lit de sédiment: l'eau de mer utilisée est filtrée sur 1,2 µm et la salinité est ajustée à 31‰. Pour deux boîtes, 50 000 hydrobies.m⁻² sont déposées à leur surface, les deux autres boîtes (sans hydrobie) servant de contrôle (tableau 1). L'application du courant est immédiate pour deux raisons :

- les hydrobies quitteraient la zone test car elles sont très actives
- il faut limiter la formation de traces d'hydrobies à la surface du sédiment.

Tableau 1 : Composition des boîtes de sédiment

N° boîte	Concentration en Sédiment (g.l ⁻¹)	Densité d'hydrobies (Individus. m ⁻²)
1	196.08	0
2	196.08	50000
3	223.05	0
4	223.05	50000

2.3.3. Acquisition des données

Dans les deux premières expériences (boîtes 1 et 2), dix paliers à vitesse de courant constante se sont succédés avec chacun une durée de 2 min. L'augmentation de la vitesse s'est faite graduellement, de 5 en 5, à partir d'une valeur de fréquence de 10 Hz.

Dans une seconde série de manipulations (boîtes 3 et 4), davantage de paliers ont été réalisés: au moment de l'érosion en masse observée précédemment, l'augmentation de la vitesse se fait de 2 en 2, ce qui a permis de déterminer plus précisément le seuil de remise en suspension.

Afin d'établir une calibration du turbidimètre, pour chaque boîte, des prélèvements d'eau ont été réalisés au début, en milieu et à la fin des expériences: cette eau de mer est filtrée sur filtres GF/C (1,2 μ m, Whatman) afin de mesurer la quantité de matière en suspension (MES) [2 réplicats par prélèvement].

2.3.4. Traitement des données

Le traitement des données se fait également sur un terminal de type "Station Sun", grâce au système d'exploitation "Unix". Il se passe en quatre étapes:

- ajustement du nombre de 8 mesures pour chaque palier: en effet, dans le cas où le palier a duré moins de 2 min (il manque donc une mesure), nous ajoutons une donnée en reprenant la dernière valeur; dans le cas où il y a plus de 8 mesures, seules les 8 premières sont conservées;

- tracé de la courbe $OBS = f(\text{temps})$, avec 8 données par palier, qui permet de visualiser d'éventuelles valeurs aberrantes: nous choisissons alors le palier pour lequel nous voulons enlever un point; nous le remplaçons par la moyenne de la valeur le précédant et de celle lui succédant;

- les données sont centrées: toutes les premières valeurs sont ramenées à zéro (sans courant);

- étape de calibration: à partir des valeurs d'OBS correspondant aux heures de prélèvement, il est possible d'établir une relation $MES = f(OBS)$ sous la forme d'une fonction affine $y = ax$.

3. RÉSULTATS & DISCUSSION

3.1. Profils de vitesse de courant

Cette approche expérimentale permet d'étudier l'influence des hydrobies sur la tension de frottement en ayant une densité fixe d'individus tout au long de la manipulation.

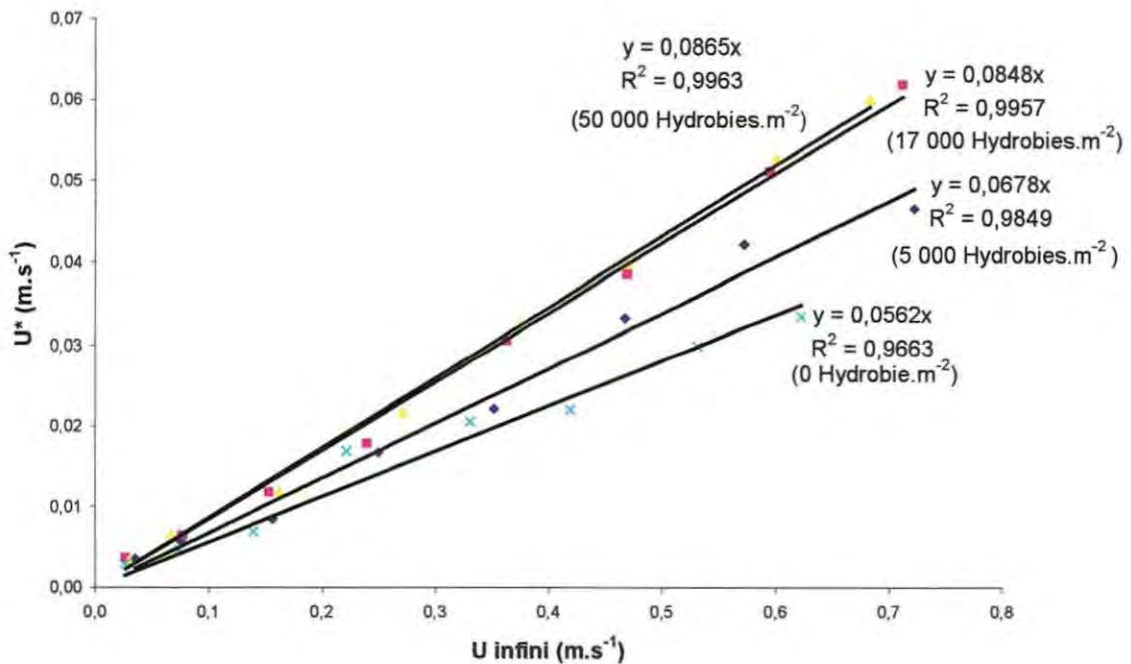


Figure 4 : Relation entre la vitesse de cisaillement (U^*) et la vitesse de courant libre (U_∞) pour quatre densités d'hydrophytes différentes (expériences 2000)

Pour une vitesse de courant libre donnée, la vitesse de cisaillement augmente avec la densité d'hydrophytes. La tension de frottement (τ_f) qui exprime la pression latérale exercée sur le fond, est proportionnelle à U^* :

$$\tau_f = \rho U^{*2} \quad \text{avec } \rho : \text{masse volumique de l'eau en kg. m}^{-3}$$

U^* en m.s⁻¹
 τ_f en N.m⁻²

Aussi, les hydrophytes accentuent, par leur coquille, la tension de frottement, et favorisent localement la remise en suspension de la vase.

Van Rijn (1989) a étudié l'influence des rides sur le coefficient de Nikuradse (k_s):

$$K_s = K_{s0} + \alpha h (h/\lambda) \quad \text{avec } K_{s0}: \text{coefficient de Nikuradse en l'absence de rides}$$

α : terme empirique

h : hauteur des rides

λ : longueur d'onde des rides

A partir de cette relation mise au point pour des rides, il est possible d'utiliser celle-ci pour différents types d'obstacles à l'écoulement, telles que les coquilles d'hydrophytes. Pour notre étude, et afin d'exprimer la relation en fonction de la densité (n) en éléments rugueux plutôt que la longueur d'onde (=distance entre chaque élément), nous pouvons en déduire :

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{n}}$$

soit $K_s = K_{s0} + \beta h^2 \sqrt{n}$ avec β : terme empirique

soit $K_s - K_{s0} = \beta h^2 \sqrt{n}$

n : abondance des hydrophytes

h : hauteur des coquilles d'hydrophytes

K_{s0} : coefficient de Nikuradse en l'absence d'hydrophytes

Cette relation utilisée reste empirique mais peut avoir l'avantage de prendre en compte cette influence très simplement à partir de deux paramètres. D'autres formulations existent dans la littérature pour calculer l'influence de différentes formes d'éléments rugueux sur la rugosité du substrat mais elles nécessitent un effort de paramétrisation plus important (Wooding, 1973). Le modèle théorique déduit des travaux de Van Rijn (1989) va être testé sur nos données.

Avant tout, afin d'augmenter le nombre de données sources, des résultats obtenus antérieurement (Dinard en 1997 et L'Houmeau en 1999) sont exploités. Tout d'abord : quelle est l'influence de l'outil canal sur l'établissement de la relation liant le coefficient de Nikuradse (k_s) à la densité d'hydrobies ?

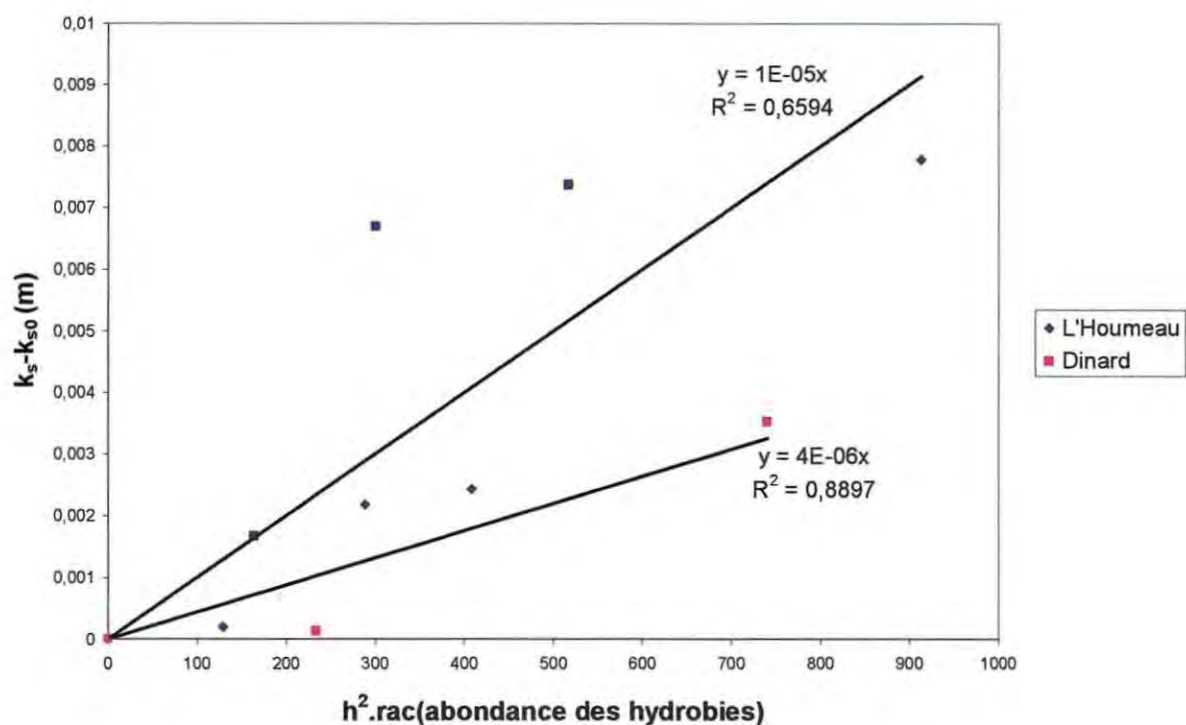


Figure 5 : Détermination de l'effet « canal »
(les carrés bleus représentent les résultats obtenus au cours de mon stage)

Dans ce modèle à deux paramètres, la corrélation est :

- significative à 5% pour L'Houmeau ($R_{\text{calculé}} = 0,812$, et $R_{5\%, \text{ddl}=6} = 0,707$)
- non significative pour Dinard ($R_{\text{calculé}} = 0,943$, et $R_{5\%, \text{ddl}=1} = 0,997$) car il n'y a que trois points. D'après ces statistiques, aucune différence éventuelle ne peut être établie entre les deux canaux; néanmoins, avec plus de données concernant Dinard et si la tendance se confirmait, nous pourrions affirmer que l'écoulement dans le canal de Dinard est moins turbulent (pente de la courbe de tendance plus faible) que dans celui de L'Houmeau. Aussi dans le bénéfice du doute, nous conservons les données issues du même outil, à savoir du canal de L'Houmeau.

Dans ces calculs, une estimation (tableau 2) de la hauteur moyenne par population (Dinard, L'Houmeau 1999 et L'Houmeau 2000) a été calculée ; en effet, d'après l'analyse statistique réalisée sur la taille des hydrobies (annexe 5), il existe un effet significatif du facteur population sur celle-ci.

Tableau 2 : Détermination des tailles moyennes des hydrobies
Hauteur moyenne des hydrobies
(mm)

Dinard	1,5301
L'Houmeau 1999	2,0204
L'Houmeau 2000	1,5197

Etant donnée la faible gamme de variation de la variable 'h' ($\Delta h \cong 0,5$) comparée à celle de la variable de 'n' ($\Delta n = 50\ 000$), il est intéressant de tester un modèle plus simple, à un paramètre : n ; s'il venait à être validé, cela permettrait d'obtenir une relation ne mettant pas en jeu la hauteur des hydrobies, évitant ainsi la longue étape de mesures.

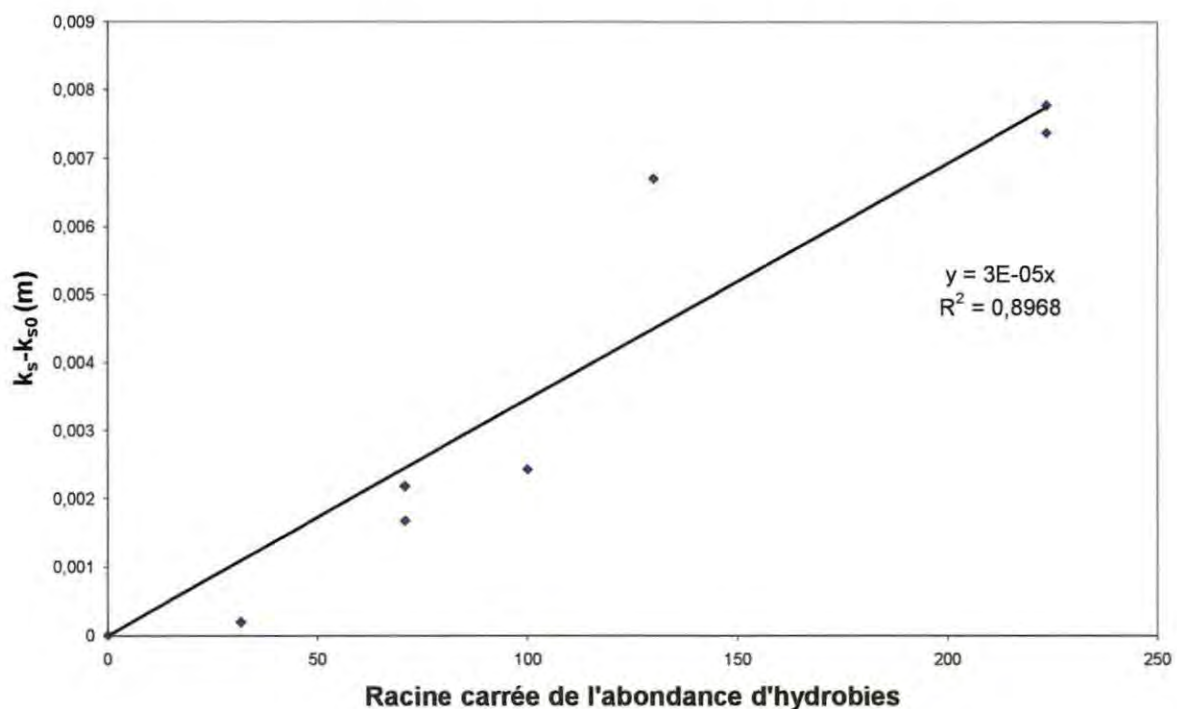


Figure 6 : Détermination de l'effet « taille des hydrobies »

Avec ce modèle, le coefficient de corrélation est très hautement significatif ($R_{\text{calculé}} = 0,947$, et $R_{0,1\% ; ddl=6} = 0,925$) : le terme 'h' est donc négligeable dans la relation liant le coefficient de Nikuradse à la densité d'hydrobies.

Ces résultats expérimentaux aboutissent à l'équation empirique suivante :

$$K_s = K_{s0} + \beta \cdot \sqrt{n} \quad \text{avec } \beta = 3E-05 \text{ m}$$

3.2. Seuil critique d'érosion

Les expériences mettant en jeu un lit de vase et des hydrobies vivantes permettent de valider les conclusions précédentes concernant l'influence de leur coquille sur les propriétés d'érodabilité du sédiment, tout en se rapprochant des conditions naturelles.

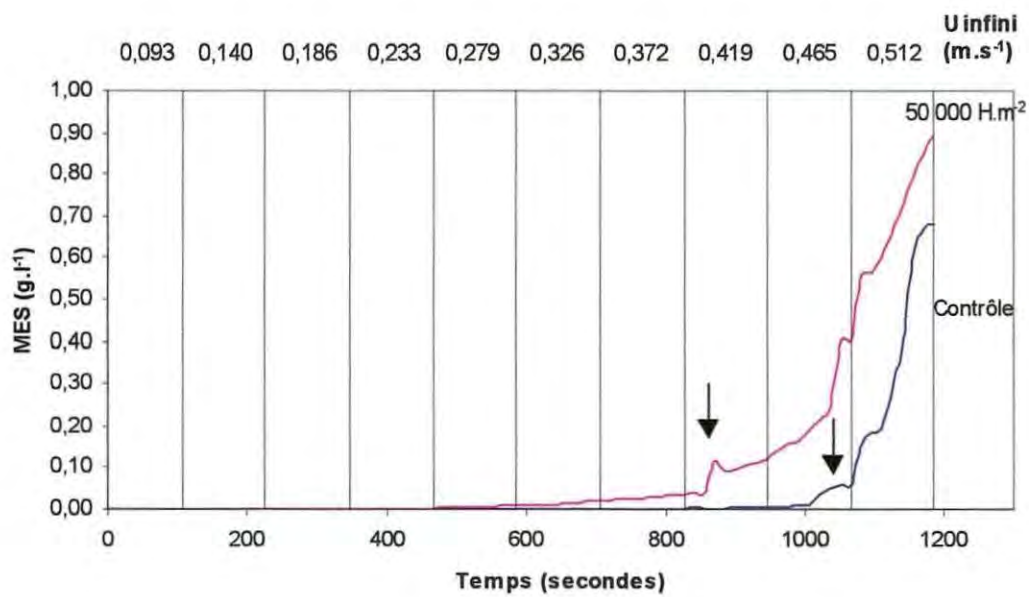


Figure 7 : Détermination du seuil critique d'érosion en masse ($C_{séd} = 196,08 \text{ g.l}^{-1}$; contrôle et $50\,000 \text{ hydrobics.m}^{-2}$)

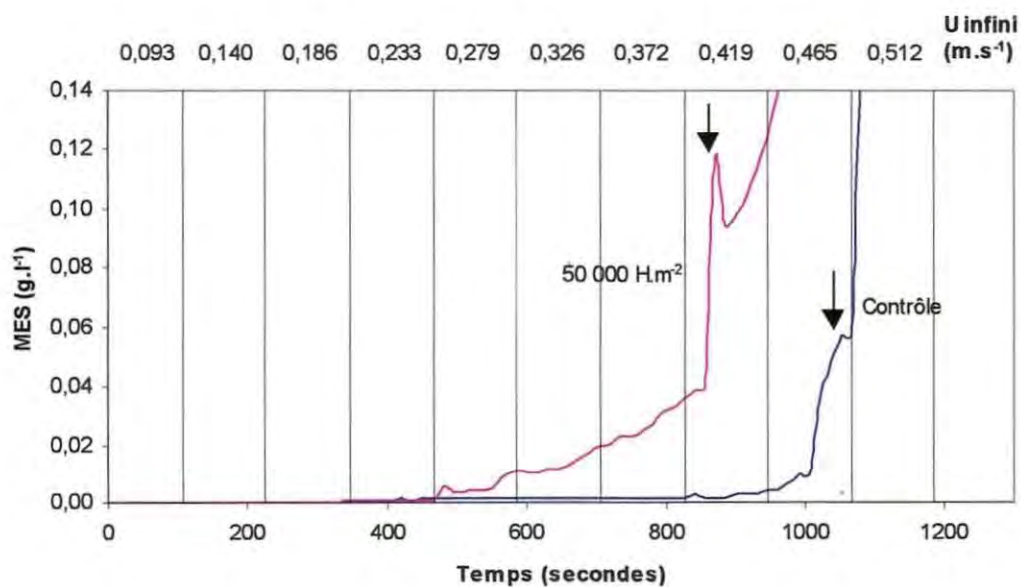


Figure 8 : Seuil critique d'érosion en masse ($C_{séd} = 196,08 \text{ g.l}^{-1}$; contrôle et $50\,000 \text{ hydrobics.m}^{-2}$) [zoom de la figure 7]

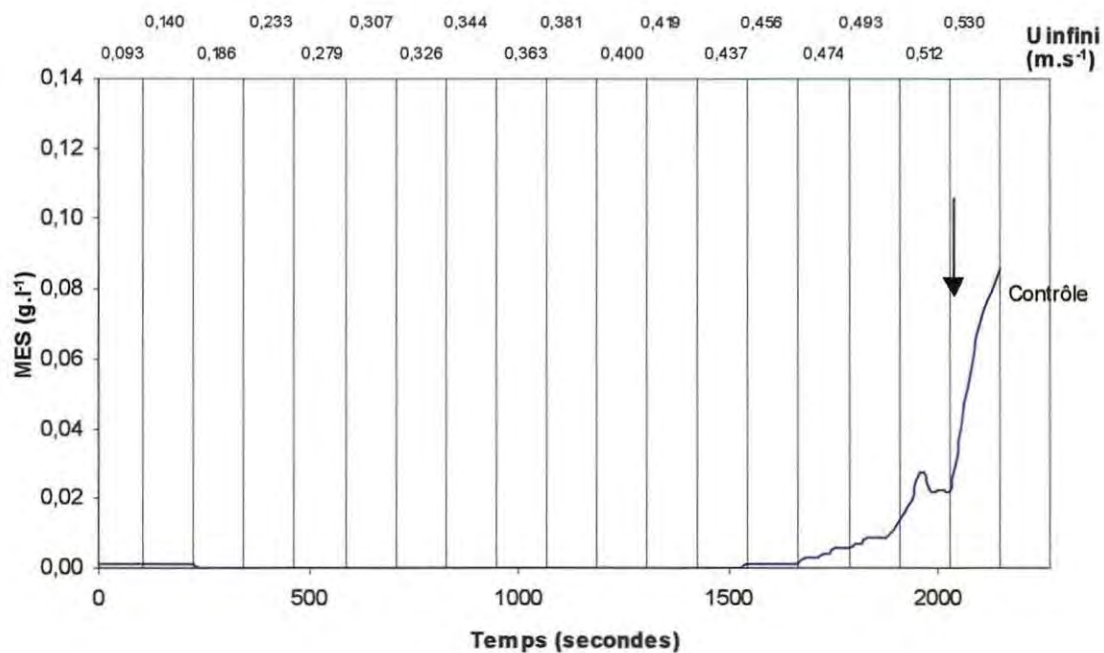


Figure 9 : Détermination du seuil critique d'érosion en masse ($C_{séd} = 223,05 \text{ g.l}^{-1}$; contrôle)

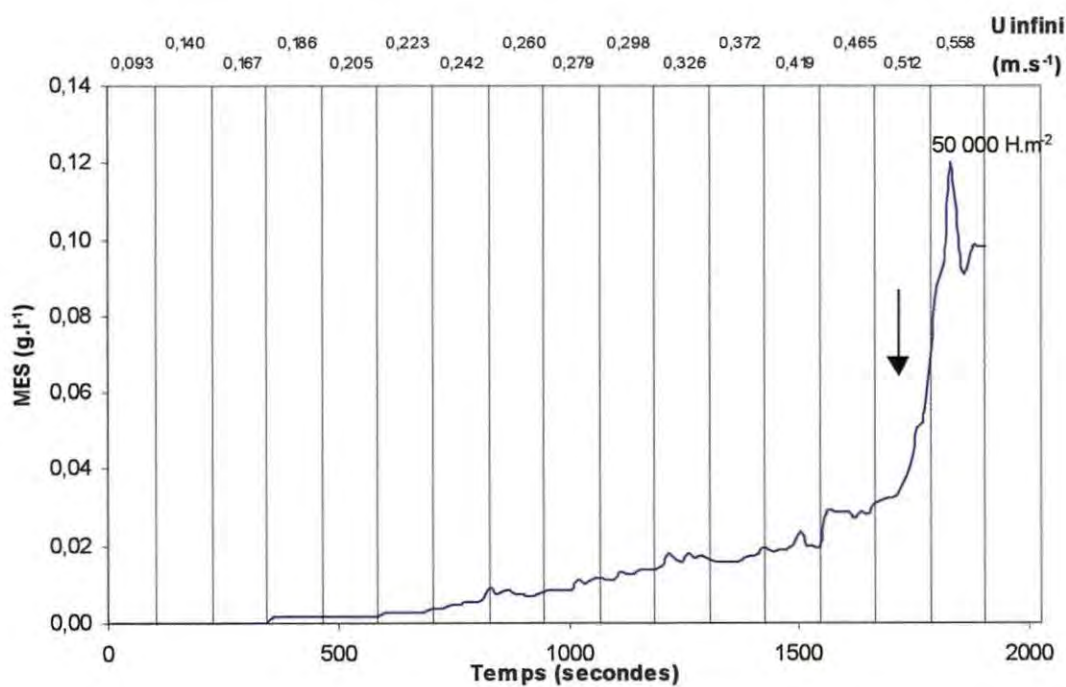


Figure 10 : Détermination du seuil critique d'érosion en masse ($C_{séd} = 223,05 \text{ g.l}^{-1}$; 50 000 hydrobies. m^{-2})

Ces expériences d'érosion en masse permettent, tout d'abord, de déterminer la tension critique pour l'érosion (σ_{ce}) à partir des boîtes sans hydrobies (figures 7, 8 et 9); en effet, à chaque palier correspond une vitesse de courant libre (U_{∞}) calculée dans le premier type de manipulations (annexe 1); aussi, nous pouvons déterminer la vitesse de courant pour laquelle il y a un début d'érosion en masse, nommée $U_{\infty ce}$, dans les deux cas: les boîtes sans hydrobies ($U_{\infty ce \emptyset}$) et celles avec hydrobies ($U_{\infty ce H}$). A $U_{\infty ce \emptyset}$ correspond une vitesse de cisaillement ($U_{ce \emptyset}^*$) [figure 4]; or, il y a début d'érosion en masse si la tension de frottement (τ_f) est égale à σ_{ce} (et flux d'érosion quand $\tau_f > \sigma_{ce}$), donc

$$\tau_f = \sigma_{ce} = \rho U_{ce \emptyset}^{*2}$$

Tableau 3 : Détermination de la tension critique pour l'érosion (σ_{ce})

Densité (hydrobies. m^{-2})	Concentration en sédiment ($g. l^{-1}$)	$U_{\infty ce \emptyset}$ ($m. s^{-1}$)	$U_{ce \emptyset}^*$ ($m. s^{-1}$)	σ_{ce} ($N. m^{-2}$)
0	196,08	0,465	0,026133	0,683
0	223,05	0,53	0,029786	0,887

La tension critique pour l'érosion est plus faible pour la boîte ayant la concentration en sédiment la plus faible; aussi, la teneur en eau d'une vase influence le seuil critique d'érosion: une vase fluide est moins stable et donc plus facilement érodable. σ_{ce} dépend de la teneur en eau du sédiment vaseux. Ces observations sont en accord avec les travaux de Migniot (1968).

Où se situe le seuil critique d'érosion lorsque 50 000 hydrobies. m^{-2} sont déposées à la surface de la vase? (figures 7, 8 et 10)

Tableau 4 : Détermination de la vitesse de courant: $U_{\infty ce H}$

Densité (hydrobies. m^{-2})	Concentration en sédiment ($g. l^{-1}$)	$U_{\infty ce H}$ ($m. s^{-1}$)
50 000	196,08	0,419
50 000	223,05	0,512

En présence d'hydrobies, l'érosion en masse survient beaucoup plus tôt qu'en leur absence (pour une vase ayant la même concentration en sédiment); nous l'observons pour des vitesses de courant libre plus faibles. Ceci illustre bien l'action déstabilisatrice de ces animaux vis-à-vis du sédiment cohésif.

4. Conclusion

Des simulations mathématiques de l'influence de la bioturbation due à *Hydrobia ulvae* sur le seuil critique d'érosion en masse ont d'ores et déjà été réalisées, à partir d'un modèle 1DV (unidimensionnel sur la verticale) (Orvain, 1997): elles s'appuyaient sur des expériences combinant les deux effets, à savoir, d'une part, le facteur « coquilles » sur la rugosité du substrat, et d'autre part, le facteur « traces » dû aux déplacements de ce gastéropode. Il serait donc maintenant intéressant de procéder à une simulation des expériences réalisées au cours de mon stage puisque seul l'effet « coquille » intervient dans celles-ci, permettant ainsi une estimation indépendante des deux effets.

BIBLIOGRAPHIE

- Blanchard, G.F., Sauriau, P.-G., Cariou-Le Gall, V., Gouleua, D., Garet, M.-J. & Olivier, F. 1997. Kinetics of tidal resuspension of microbiota: testing the effects of sediment cohesiveness and bioturbation using flume experiments. *Marine Ecology Progress Series* **151**, 17-25.
- Eckman, J.E., Nowell, A.R.M. & Jumars, P.A. 1981. Sediment destabilization by animal tubes. *Journal of Marine Research* **39**, 361-374.
- Grant J. & Daborn G., 1994. The effects of bioturbation on sediment transport on an intertidal mudflat. *Neth. J. Sea Res.*, 32 : 63-72.
- Hawley N., 1981. Flume Experiments on the Origin of Flaser Bedding. *Sedimentology*, vol.28, 5 : pp. 699-712.
- Le Hir P., 1996. Aide mémoire de dynamique sédimentaire. *Rap. IFREMER-DEL, Brest* : 48
- Limia J. & Raffaelli D., 1997. The effects of burrowing by amphipod *Corophium volutator* on the ecology of intertidal sediments. *J. Mar. Biol. Ass.*, 77 : 409-423
- Meadows P.S. & Tait J., 1989. Modification of sediment permeability and shear strength by two burrowing invertebrates. *Mar. Biol.*, 101 : 75-82.
- Meadows P.S. & Tait J., 1989. Modification of sediment permeability and shear strength by two burrowing invertebrates. *Mar. Biol.*, 101 : 75-82.
- Migniot C., 1968. Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *Houille Blanche*, 7: 591-620.
- Nowell A.R.M. & Jumars, P.A. 1984. Flow environments of aquatic benthos. *Annual Review of Ecology and Systematics* **15** , 303-328.
- Nowell A.R.M. & Jumars, P.A. 1987. Flumes : theoretical and experimental considerations for simulation of benthic environments. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 25, 91-112
- Orvain F., 1997. Quantification de l'activité de bioturbation de l'interface eau-sédiment en système tidal par le gastéropode *Hydrobia ulvae*. Rapport de DEA. Université de Caen :33 p
- Orvain F., 2000. Modélisation de la bioturbation et de ses conséquences sur les flux de remise en suspension : application à la baie de Marennes-Oléron. Rapport d'activité (de seconde année de thèse). 39 p
- Riéra P. & Richard P., 1997. Temporal variation of delta 13C in particulate organic matter and oyster *Crassostrea gigas* in Marennes-Oléron bay (France): effect of freshwater inflow. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 147 : 105-115
- Rhoads D.C., Yingst J.Y. & Ullman W., 1978. Seafloor stability in central Long Island Sound, 1. Seasonal changes in erodability of fine-grained sediments, p 221-244. *In* M.L. Wiley [ed.], *Estuarine interactions*. Academic.

Rhoads D.C. & Young D.K., 1970. The influence of deposit-feeding organisms on sediment stability and community trophic structure. *J. Mar. Res.*, 28 : 150-178.

Sauriau P.-G., 1987. Les Mollusques non-cultivés du bassin de Marennes-Oléron : quantification et répartition géographique des stocks. *Haliotis*, 16 : 527-541.

Schlichting H., 1979. Boundary-Layer Theory. McGraw-Hill Classic Textbook Reissue Series

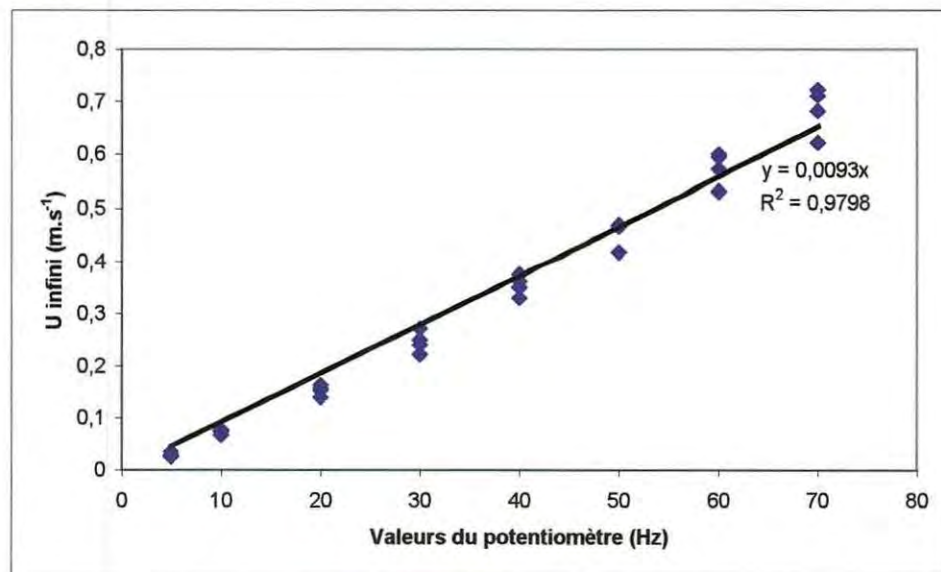
Willows R.I., Widdows J. & Wood R.G., 1998. Influence of an infaunal bivalve on the erosion of an intertidal cohesive sediment : a flume and modeling study. *Limnol. Oceanogr.*, 43 : 1332-1343.

Wooding, R.A., Bradley, E.F. & Marshall, J.K. 1973. Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry. *Boundary-Layer Meteorology* 5, 285-308.

ANNEXES

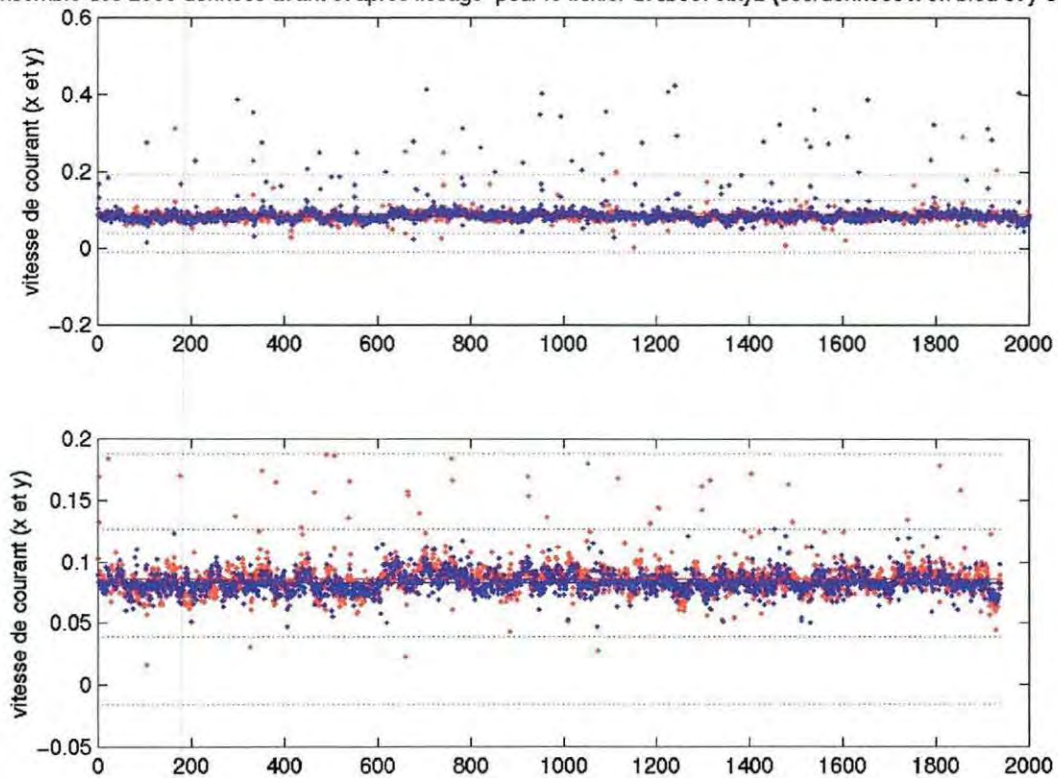
Profils de vitesse de courant

Annexe 1 : Relation liant les valeurs du potentiomètre à la vitesse du courant libre : $U_{\infty}(3\text{cm})$

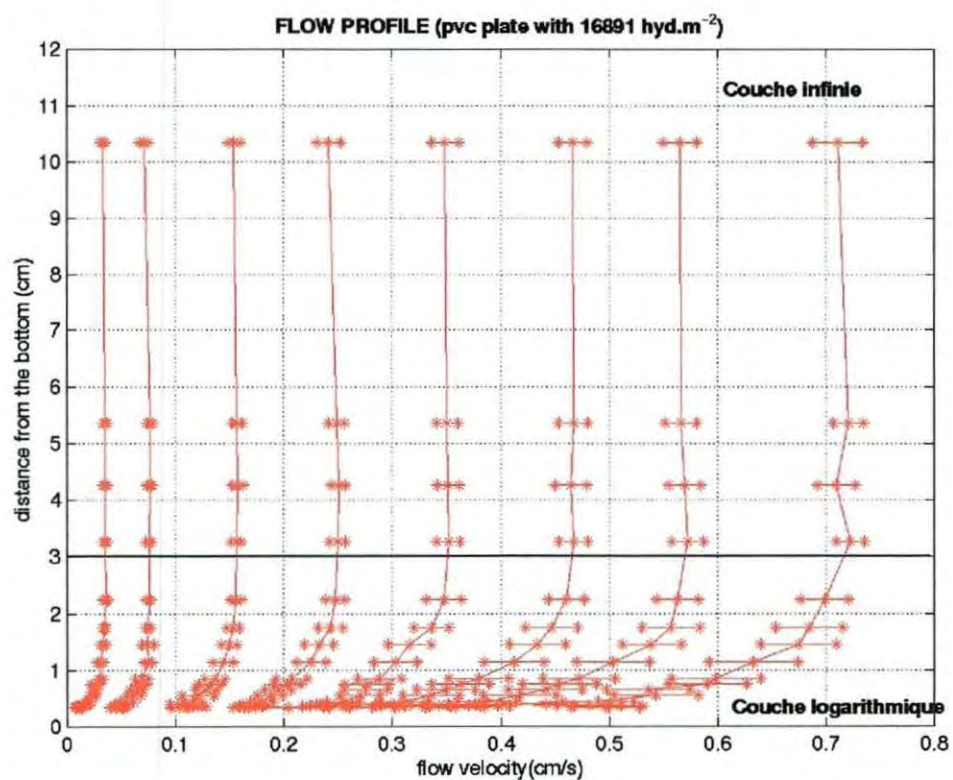
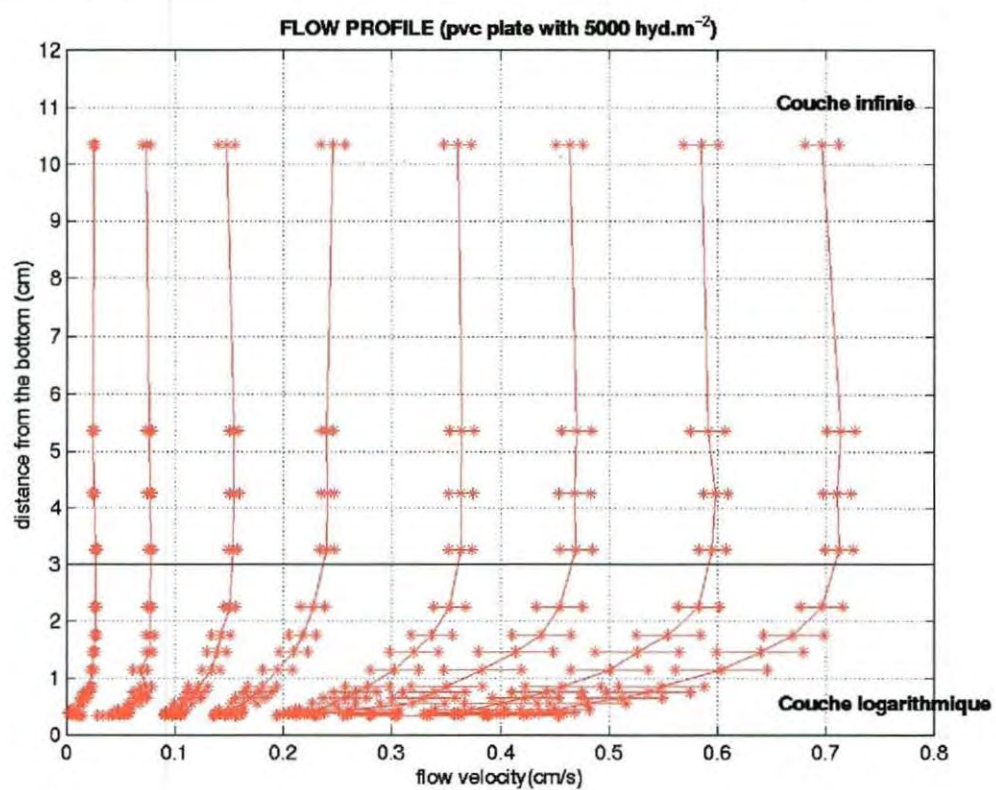


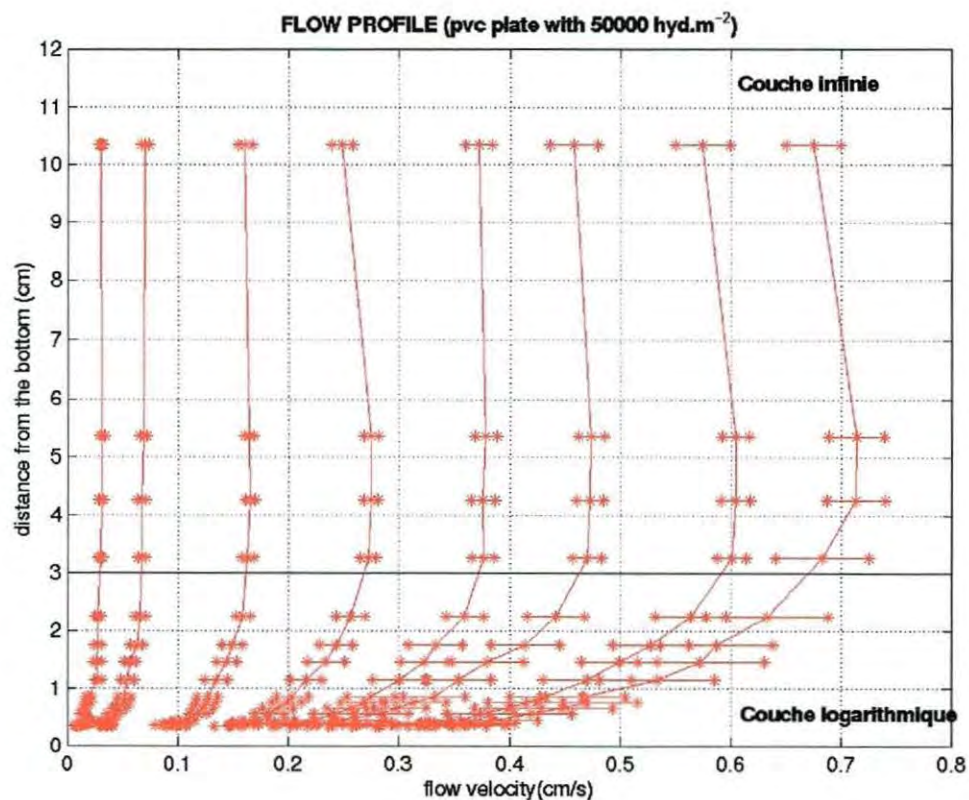
Annexe 2 : Exemple d'une saisie de 2000 données avant et après lissage

ensemble des 2000 données avant et après lissage pour le fichier dvcb0075.xyz (coordonnées x en bleu et y en rouge)

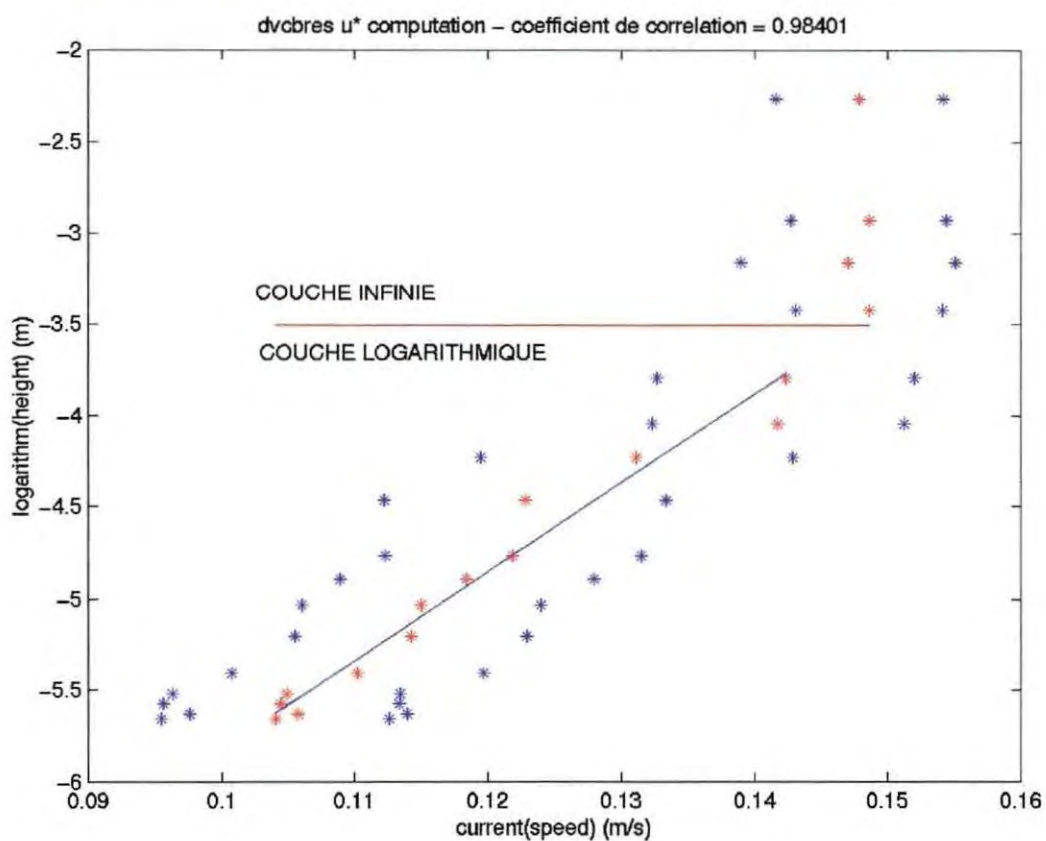


Annexe 3 : Détermination de la vitesse de courant libre (U_∞) dans la couche infinie





Annexe 4 : Détermination des limites de la couche logarithmique (les croix bleues représentent l'écart-type)



Annexe 5 : analyse statistique sur la taille des hydrobies

Nous réalisons une ANOVA à 3 facteurs qui sont : la population récoltée (Dinard pour les expériences réalisées en 1997, L'Houmeau 1 pour celles de 1999, et L'Houmeau 2 pour celles de 2000), la plaque de PVC sur la quelle il y a une certaine densité d'hydrobies, et le mesureur (Francis ou moi-même).

Trois hypothèses sont soumises à une épreuve de vérité :

H_0 : le facteur population n'a aucun effet sur la taille des hydrobies

H_0 : le facteur plaque n'a aucun effet sur la taille des hydrobies

H_0 : le facteur mesureur n'a aucun effet sur la taille des hydrobies

Les hypothèses alternatives s'écrivent :

H_1 : le facteur population a un effet sur les résultats

H_1 : le facteur plaque a un effet sur les résultats

H_1 : le facteur mesureur a un effet sur les résultats

Les facteurs sont tous fixes.

Quatre conditions doivent être remplies pour pouvoir réaliser cette ANOVA :

1) l'indépendance des mesures : les échantillons ont bien été mesurés au hasard ; les plaques sont indépendantes ; il en est de même pour les trois populations et les deux mesureurs ;

2) l'homogénéité des variances, aussi appelée homoscedasticité : elle est testée par le test de Bartlett :

H_0' : toutes les variances sont égales

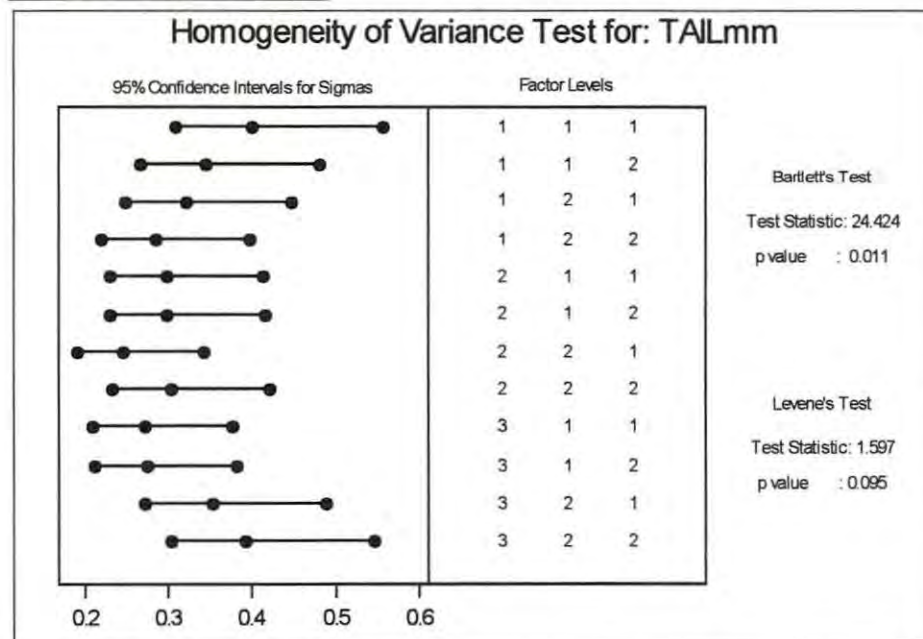
H_1' : toutes les variances ne sont pas égales

Le test de Bartlett est très sensible aux données non normales ; aussi, le test du χ^2 est réalisé en prenant un risque $\alpha=1\%$. Si la valeur de 'p' (probabilité d'accepter H_0) était inférieure à $\alpha=1\%$, il faudrait procéder à une transformation de variable (Scherrer, 1984).

Bartlett's Test (normal distribution)

Test Statistic: 24.424

p value : 0.011

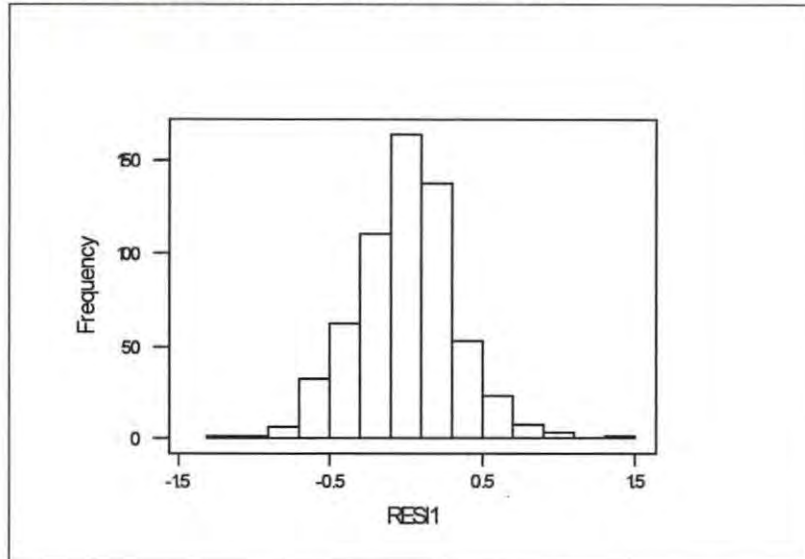


Ici, 'p' est supérieure à $\alpha = 0.01$, autrement dit, H_0 est accepté avec un risque α de 1% de se tromper : toutes les variances peuvent être considérées comme égales .

3) la distribution normale des résidus :

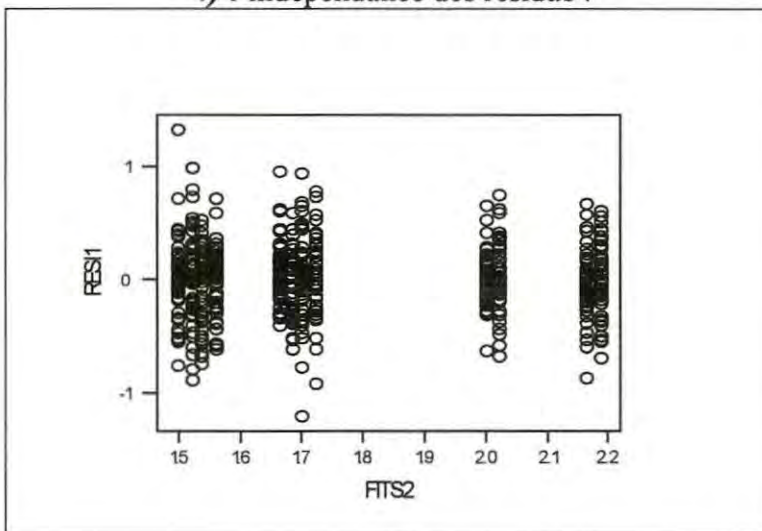
Variable	N	Mean	Median	StDev	SEMean
	(nombre d'échantillons)	(moyenne)	(médiane)	(écart-type des valeurs)	(écart-type des moyennes)
RESI1	600	-0.0000	0.0038	0.3176	0.0130

Variable	Min	Max	Quantiles	
			Q1 (25%)	Q3 (75%)
RESI1	-1.2097	1.3210	-0.1875	0.1941



La moyenne des résidus (RESI1) est nulle ; et les résidus sont distribués normalement autour de zéro.

4) l'indépendance des résidus :



Le modèle linéaire sous-jacent à l'analyse de variance s'ajuste bien aux données : les résidus sont indépendants car il n'apparaît pas de tendance dans les résidus (RESI1) en fonction de la variable calculée (FITS2).

Les quatre conditions d'application de l'ANOVA sont donc remplies : l'analyse de variance peut être réalisée :

Factor	Type	Levels	Values
POP	fixed	3	1 2 3
PLAQUE	fixed	2	1 2
MESURE	fixed	2	1 2

Analysis of Variance for TAILmm

Source	DF	SS	MS	F	P
POP	2	31.0652	15.5326	152.97	0.000
PLAQUE	1	3.9788	3.9788	39.19	0.000
MESURE	1	0.0817	0.0817	0.80	0.370
Error	595	60.4160	0.1015		
Total	599	95.5416			

Avec DF : degré de liberté

SS : somme des carrés

MS : somme des carrés moyens ($MS = SS/DF$)

F : valeur de Fisher

P : probabilité d'accepter H_0

Nous comparons la valeur de 'p' au risque $\alpha = 0.05$; quand $p < 0.05$, H_0 est rejeté : il y a alors un effet significatif du facteur étudié. Quand $p > 0.05$, H_0 est accepté : les variations des moyennes sont alors uniquement dues aux fluctuations d'échantillonnage.

Nous pouvons constater que les facteurs 'plaque' et 'population' ont un effet significatif :

- l'effet 'plaque' peut s'expliquer par la densité d'hydrobies se trouvant à la surface de chacune d'elles : à forte densité, seule l'hydrobie la plus grosse du groupe d'individus se trouvant sous le pied à coulisse est mesurée ; nous avons donc une meilleure estimation de la moyenne des hauteurs sur les plaques à plus faible densité
- lorsque nous avons besoin de la hauteur moyenne des hydrobies (cf 3.1), nous devons considérer une moyenne par population.

Expériences d'érosion en masse

Annexe 6 : Calibration de la sonde OBS

