



OLYMPIADES DE PHYSIQUE
FRANCE 2007-2008

LE BOZO-BOZO

Vincent Bachelet
Thibault Bridel-Lelong
Guillaume Metge

Membres de l'APELH : <http://apelh.free.fr>
Atelier de Physique Expérimentale du Lycée Hoche



Professeurs : Mme Larasse
M. Brasselet



Nous sommes trois élèves de terminale S spécialité Maths, et passionnés de physique. Depuis le début de la première, nous travaillons sur un casse-tête nommé bozo-bozo, à la recherche des mécanismes permettant son fonctionnement. Dans l'optique de se préparer aux Olympiades nationales de Physique, nous avons participé, à la fin de l'année scolaire 2007, au concours Quintesciences Expérimentales organisé par l'académie de Versailles, et obtenu un second prix.

La simple curiosité ayant motivé nos recherches, nous voudrions maintenant les présenter, de manière à pouvoir les partager. C'est pourquoi nous nous sommes inscrits aux Olympiades de Physique France.

Nous remercions différents adultes qui nous ont permis de progresser dans notre démarche, et sans lesquels le dossier tel que nous le connaissons n'existerait pas. Tout d'abord M.THIELOIS, professeur de technologie au collège Hoche, et grâce à qui nous avons pu construire des hélices calibrées qui garantissaient la reproductibilité de nos expériences.

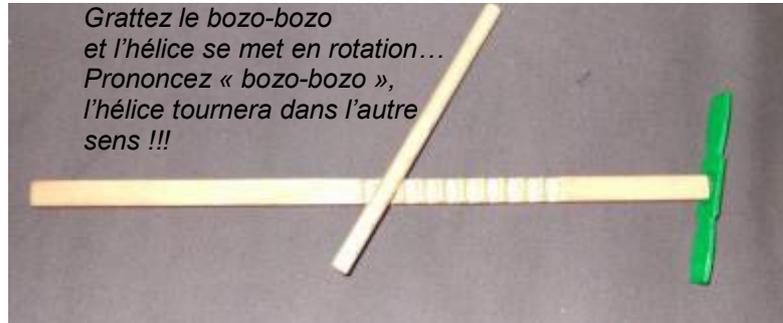
Nous remercions également M.CHEVY, maître de conférence et chercheur à l'ENS, qui nous a éclairé et apporté un regard critique sur nos recherches, permettant ainsi de repérer les points délicats ou flous. Enfin, nous remercions plus particulièrement Mme LARASSE et M.BRASSELET, nos professeurs encadrants, qui nous ont fait découvrir le bozo-bozo et ont su nous transmettre leur passion pour ce jouet, et qui surtout nous ont mis sur la voie de certains points de nos recherches.

SOMMAIRE

Introduction.....	4
Partie 1 - Etude de la mise en mouvement du bozo-bozo.....	5
I. Filmer le phénomène s'avère impossible !	5
II. Etude par un accéléromètre	6
A. Caractéristique de l'accéléromètre.....	6
1°/ Définition.....	6
2°/ Informations attendues	6
B. En pratique.....	7
1°/ Protocole.....	7
2°/ Précautions avant les mesures.....	7
3°/ Résultats et interprétation	8
4°/ Conclusion	12
Partie 2 - Etude de l'entretien du mouvement de rotation de l'hélice.....	13
I. Le bozo-bozo simplifié.....	13
A. Simplification du bozo	13
B. Premières observations et amélioration du système.....	16
C. Utilisation d'hélices calibrées.....	16
II. Maintien de la rotation : le modèle théorique.....	18
III. Confrontation du modèle théorique et des mesures expérimentales.	20
A. Etude d'une courbe confirmant le modèle théorique.....	20
B. Des différences avec le modèle théorique : tentatives d'interprétation.	21
1°/ Variation de la longueur des pales.....	22
2°/ Variations de la différence entre diamètre du clou et diamètre du trou de l'hélice.....	23
Partie 3 - Comment influencer le mouvement du clou	24
Conclusion.....	26
Annexes.....	27



Introduction



Le bozo-bozo est à l'origine un jouet en bois constitué de 4 éléments : une tige crénelée au bout de laquelle est fixé un clou qui maintient une hélice et un petit bâton qui permet de gratter la tige crantée.

Lorsqu'on gratte le bozo-bozo, l'hélice se met en rotation et lorsqu'on prononce le mot magique « bozo-bozo », le sens de rotation s'inverse !!!

Ce simple jouet pour enfant est un véritable casse-tête pour le physicien ! Il amène bon nombre de questionnements et en premier lieu pose la question des paramètres influant sur la rotation de l'hélice.

Dans un premier temps, nous avons listé les différents paramètres que nous pouvons faire varier facilement :

- matériaux constituant la tige et l'hélice
- forme de la tige : cylindrique, parallélépipédique, quelconque
- distance entre les crénelures de la tige
- nombre de crénelures
- dimensions et forme de l'hélice

Nous nous sommes alors lancés dans la production en masse de bozo-bozo grands et petits avec des hélices en bois ou en carton, des tiges crantées en métal, en bois...

Et nous sommes arrivés à la conclusion suivante : peu importe les matériaux, le nombre et l'espacement des crénelures, les formes des tiges et hélices, avec un peu d'entraînement, l'hélice se met en rotation à tout les coups !

Il nous fallait donc restreindre notre étude et nous avons centré nos interrogations sur trois points :

- Comment se fait la mise en rotation de l'hélice ?
- Comment s'entretient son mouvement ?
- Comment choisir le sens de rotation ?

On le voit bien, malgré son apparence simple et discrète, le bozo-bozo amène quantité de questions et permet de faire de la science tout en s'amusant !

Il existe très peu de bibliographie sur le sujet : un article de Courty dans Pour la Science (date) suggérait une analogie avec le houla-hop, la tige jouant le rôle du corps et l'hélice celui du cerceau.

Nous nous sommes appuyés sur cette idée pour mener notre étude. Plus tard M. Chevy nous a transmis un autre article sur le sujet écrit par G. David Scott, publié en 1956 dans la revue American Journal of Physics..

Bozo-bozo



Bozo-bozo en métal



Bozo-bozo en bois

Partie 1 - Etude de la mise en mouvement du bozo-bozo

Pour comprendre l'origine du mouvement du bozo-bozo, il faut tout d'abord chercher à l'observer, et plus particulièrement observer le mouvement de la tige, qui est responsable du mouvement de l'hélice. Ainsi nous pourrions comprendre quel est le mouvement initiateur de la rotation de la pale, et ce qui la fait tourner dans un sens plutôt que dans l'autre.

I. Filmer le phénomène s'avère impossible !

Nous avons tout d'abord cherché à observer la mise en mouvement de l'hélice visuellement. Disposant d'une Webcam pouvant acquérir 90 images par secondes, et zoomant au maximum sur l'hélice et le trou de l'hélice, nous avons espéré tirer des renseignements sur la raison de cette rotation (initiée par le clou). Malheureusement les différentes vidéos n'ont rien donné... Le mouvement du clou paraît trop rapide.



En effet, considérons que pour une observation correcte du mouvement de l'hélice du bozo-bozo, il faille observer dix positions du clou entraînant cette hélice par période.

Le bozo-bozo étant constitué d'une dizaine de crénelures parcourues en environ 0,1 seconde (un mouvement aller du bâton), il en résulte qu'une crénelure (ou un mouvement du clou) est parcourue en 0,01 seconde.

Le passage d'une crénelure étant associée à un aller-retour du clou, pour étudier dix positions du clou par période, il faudrait une image toute les 0,001 secondes ; c'est-à-dire disposer d'une caméra à 1000 images par seconde, bien au dessus de nos moyens...

Ce raisonnement peut aussi s'exprimer ainsi :

- ⊕ Il nous faut 10 positions du clou par période
- ⊕ 1 aller = 10 crénelures \approx 0,1 seconde
- ⊕ Donc un mouvement de clou = 0,01 seconde
- ⊕ Or un mouvement du clou lors du grattage d'une crénelure correspond à une période,
- ⊕ et l'on veut dix positions du clou par période,
- ⊕ on a donc une image toute les 0,001 secondes
- ⊕ soit 1000 images par seconde

L'œil ne percevant que 25 images par seconde et notre caméra 90, nous devons trouver une autre méthode d'observation : l'accéléromètre.

II. Etude par un accéléromètre

A. Caractéristique de l'accéléromètre

1°/ Définition

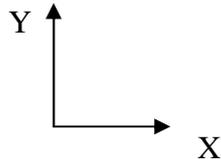
Un accéléromètre, comme son nom l'indique est un détecteur d'accélération. Il mesure celle-ci grâce à une tension dont la relation avec l'accélération est donnée par :

$$U = U_0 + \lambda a$$

Avec :

- ⊕ U la tension mesurée
- ⊕ U_0 une constante correspondant à la moyenne de U
- ⊕ a l'accélération mesurée
- ⊕ et λ un coefficient de proportionnalité donné par le constructeur

Dans la pratique il va nous permettre d'obtenir l'accélération du bozo-bozo selon les axes définis préalablement comme l'axe vertical (axe des Y) et l'axe horizontal (axe des X), en fonction du temps.



L'accéléromètre est fixé sur la tige en bois du bozo : on peut ainsi accéder (après traitement des données brutes) au mouvement de la tige, donc du clou qui la prolonge.

2°/ Informations attendues

L'accéléromètre nous ayant fourni l'accélération au cours du temps, notre objectif est ensuite de convertir ces données en variation de positions, le but étant d'obtenir la trajectoire de l'extrémité de la tige. Pour cela, il suffit de connaître la position et la vitesse initiale de notre bozo-bozo. On considère arbitrairement la première position de coordonnées (0,0) et une vitesse initiale nulle pour commencer. Ainsi on a :

$$Y_{n+1} = Y_n + v_{Y_n} \cdot \Delta t$$

Avec :

- ⊕ Y la position selon l'axe des ordonnées
- ⊕ et v_Y la vitesse selon ce même axe

La vitesse étant elle-même déterminée par :

$$v_{Y_{N+1}} = v_{Y_n} + a_{Y_n} \cdot \Delta t$$

Avec :

- ⊕ v_Y la vitesse
- ⊕ et a_Y l'accélération, tous deux eux aussi selon l'axe des ordonnées

L'opération se répétant pour l'axe des abscisses.

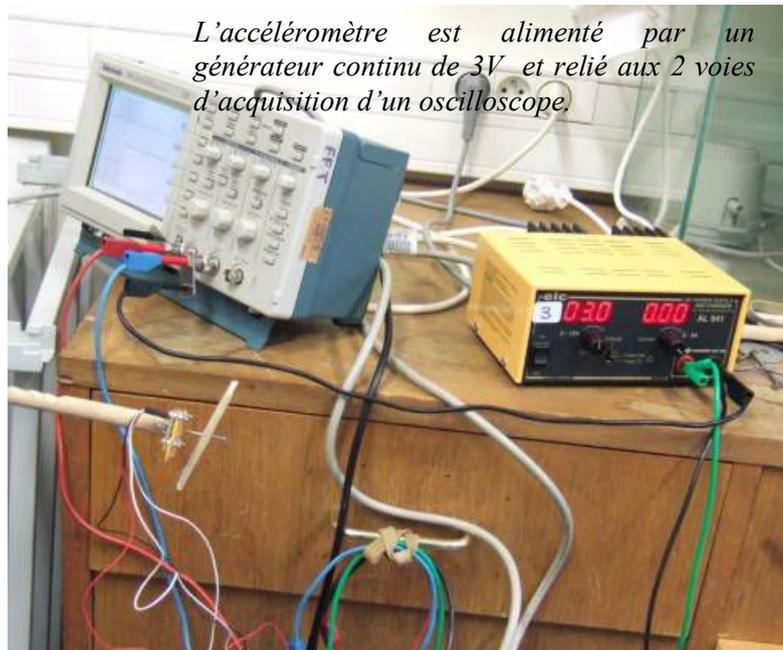
B. En pratique

1°/ Protocole

Nous disposons pour cette acquisition de données d'un accéléromètre fixé à un bozo-bozo, d'un oscilloscope numérique, d'un ordinateur équipé du logiciel Synchronie permettant d'obtenir un tableau des valeurs des tensions acquises par l'oscilloscope au cours du temps, et d'un tableur Excel.

Pour que notre expérience soit reproductible (dans la mesure du possible étant donné que l'on ne peut faire un grattage standardisé), nous ne travaillons que sur un aller simple de grattage et, comme l'erreur est humaine, ne gardons que les acquisitions de données lors desquelles l'hélice du bozo-bozo s'est mise en route, soit dans le sens direct trigonométrique pour l'expérimentateur, soit dans le sens indirect.

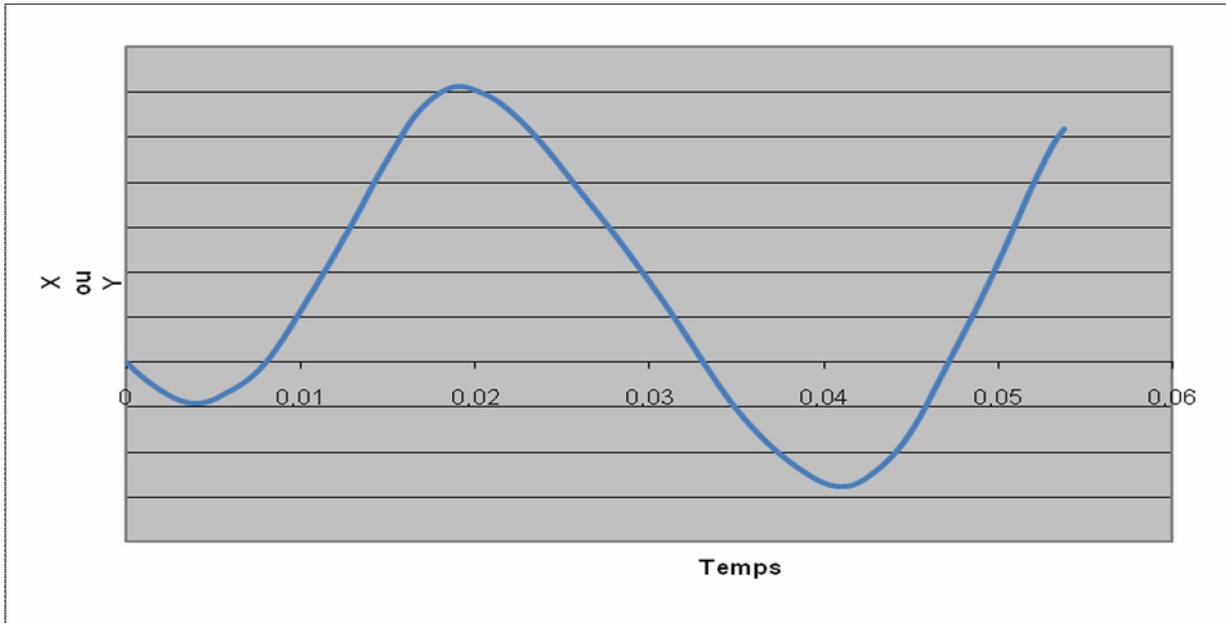
Ces conditions posées, nous faisons deux ou trois mesures dans chaque sens pour limiter le risque d'erreur et pouvoir tirer des conclusions générales. Puis nous traduisons les données obtenues en tableaux de valeurs, dans lesquels nous pouvons modéliser le mouvement de la tige par des graphiques exprimant le mouvement selon l'axe des Y en fonction du mouvement selon l'axe des X.



2°/ Précautions avant les mesures

Avant toute chose, nous devons nous assurer que les vecteurs directeurs des axes de l'accéléromètre et de l'oscilloscope ont le même sens (la direction n'ayant que peu d'importance puisque le mouvement du bozo-bozo est un mouvement de rotation comme nous le verrons plus loin).

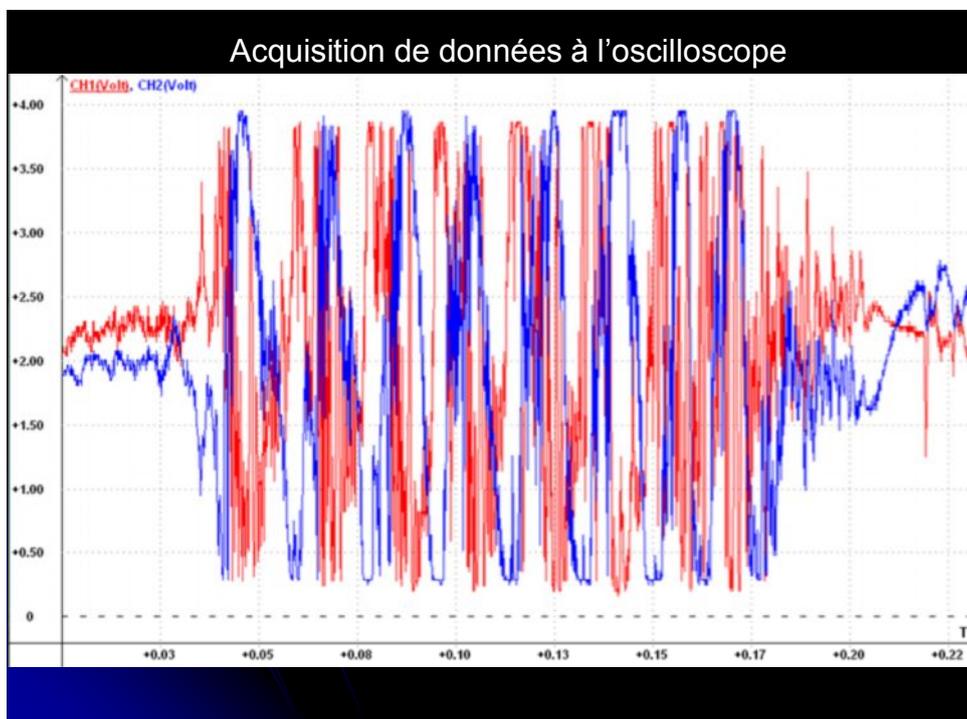
En effet, un sens opposé de quelque axe que ce soit (abscisses ou ordonnées) entraînerait un sens de rotation inverse de celui en réalité ; ce qui pourrait être dramatique pour les conclusions.



Courbe obtenue sur l'oscilloscope lors d'une accélération test d'abord positive puis négative si les deux vecteurs directeurs ont la même direction (si les vecteurs directeurs avaient été inversés, la pente de la courbe aurait d'abord été négative puis positive). Il y a cependant un petit mouvement perturbateur au début, inévitable, et qui n'est pas à prendre en compte

3°/ Résultats et interprétation

Les données de l'accéléromètre pour une rotation dans le sens direct trigonométrique sont transmises à Synchronie...



Courbe brute de l'acquisition de données

Puis transférées à Excel pour les traduire en tableaux de valeurs.

[TScope(S) 2500 Ech.X= 0/ 0.25 Ech.Y= 0.0449/ 2.89]		
CH1	TScope	CH2
Volt	S	Volt
dt=0	dt=0	dt=0
1,21875	0	-1,70703125
1,1796875	0,00010004	-1,6875
1,16015625	0,00020008	-1,6875
1,140625	0,00030012	-1,609375
1,23828125	0,00040016	-1,70703125
1,16015625	0,0005002	-1,6484375
1,21875	0,00060024	-1,62890625
1,21875	0,00070028	-1,62890625
1,140625	0,00080032	-1,609375
1,19921875	0,00090036	-1,6875

Données transférées à Excel

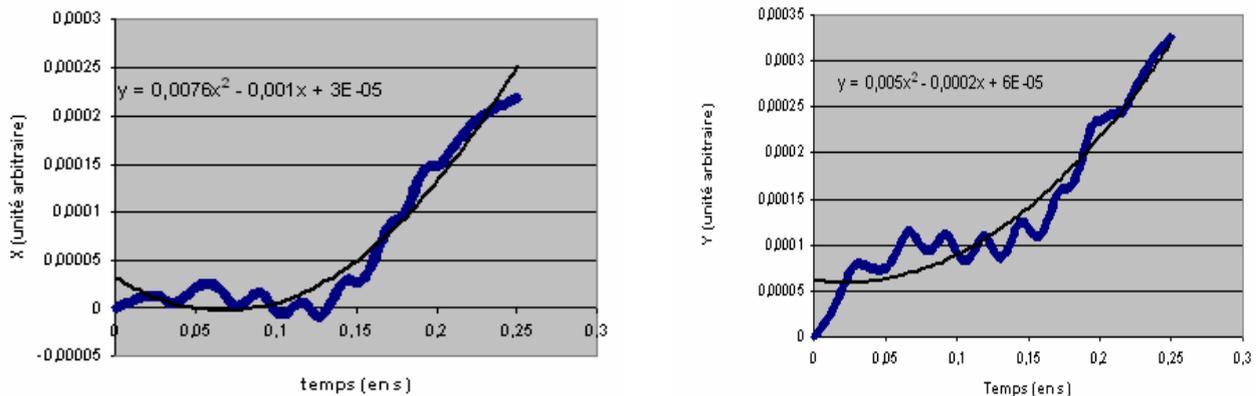
Notre objectif est maintenant de tracer deux graphiques de la position en fonction du temps (un pour chaque axe), pour ensuite en tracer un représentant la position selon l'axe des Y en fonction de la position selon l'axe des X. Ainsi nous aurons modélisé le mouvement du clou du bozo-bozo.

Le premier problème se posant est de réussir à passer d'une tension (mesurée par l'accéléromètre), à une accélération. Pour cela il faut réussir à extraire la constante U_0 de l'expression :

$$U = U_0 + \lambda a$$

On suppose que la tension mesurée au cours d'un simple aller de grattage est autant au-dessus de cette constante qu'en-dessous. On le justifie par le fait que la tension est périodique comme on le voit sur le schéma 1. Cela veut dire que pour supprimer cette constante, il faudra retirer à chaque valeur de tension la valeur moyenne, ce qui nous donnera l'accélération.

On obtient ainsi, après être passé d'une accélération à une vitesse, et d'une vitesse à une position, comme expliqué précédemment, les graphiques :

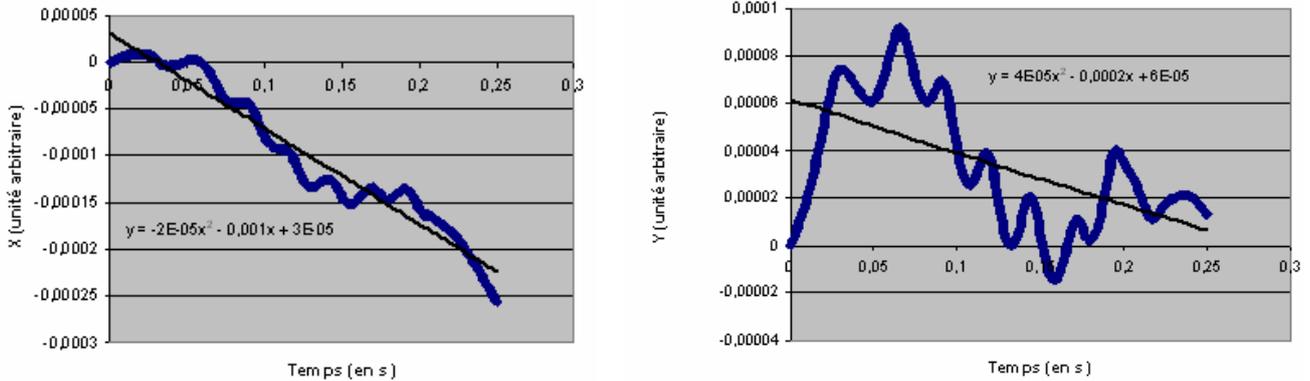


Graphiques des positions du clou en fonction du temps, après retranchement de la moyenne

On peut remarquer que malgré une première approche pour supprimer la constante, les deux graphiques en gardent une trace par leur allure parabolique. Pour remédier à cela, nous devons retirer ou du moins minimiser le coefficient devant le X^2 .

Pour cela on ajoute deux fois ce coefficient devant chaque valeur de l'accélération, ce qui nous donne une accélération corrigée.

On obtient ainsi :

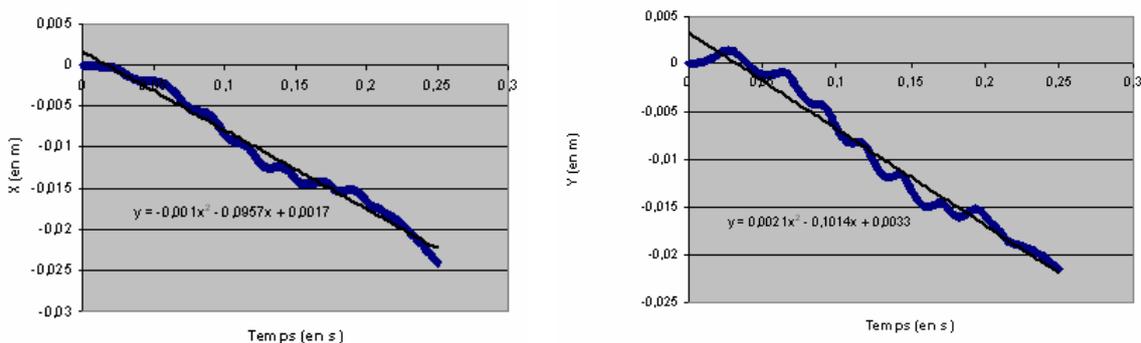


Graphiques de la position du clou en fonction du temps après retranchement du facteur devant le X au carré (schéma 3)

Cependant nous pouvons observer qu'il reste encore un mouvement parasite au mouvement du clou. Nous nous en occuperons ultérieurement, après avoir converti notre échelle, pour que le véritable mouvement du clou soit modélisé, sur le graphique de la position selon Y en fonction de la position selon X, dans ses dimensions réelles. Il suffit de multiplier chaque accélération par $\frac{9,8}{0,17}$.

En effet, la documentation du constructeur nous donne $0,17mV.g^{-1}$ pour la sensibilité de l'accéléromètre. Or $0,17mV.g^{-1} = 0,17mV/9,81m.s^{-2}$

On passe ainsi à :

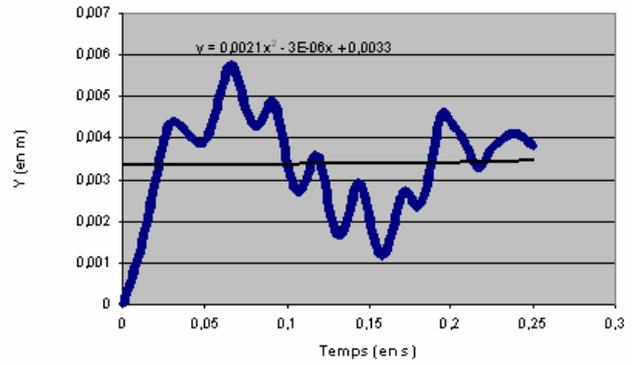
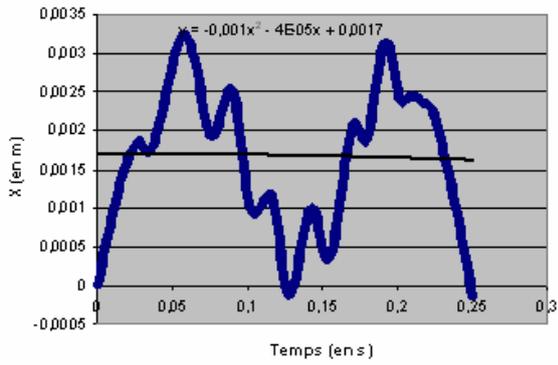


Passage à l'échelle de la réalité (à la véritable dimension du mouvement)

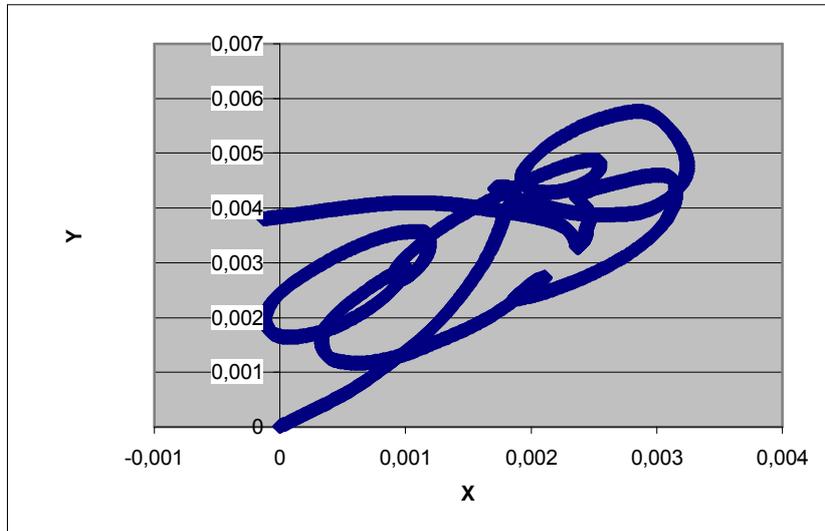
Enfin il ne nous reste plus qu'à supprimer le mouvement de translation parasite que l'on supposera créé par l'utilisateur, et n'ayant aucune incidence sur le mouvement du clou.

Pour cela nous devons supprimer le mouvement moyen de la tige, représenté par les droites noires sur le schéma ci-dessus. Ce qui revient à donner comme vitesse initiale pour les deux axes l'opposé du coefficient devant le X de notre équation.

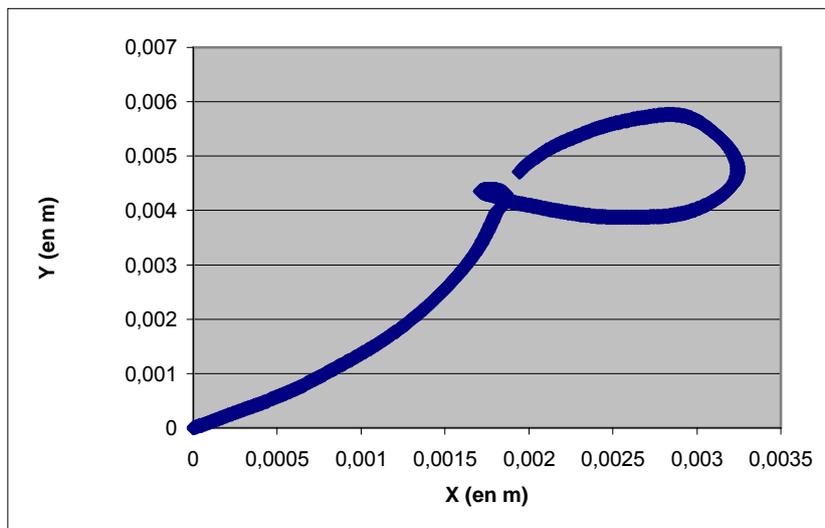
Ainsi on a :



Graphiques des axes respectivement horizontaux et verticaux en fonction du temps sans mouvement parasite et à la véritable échelle



Véritable mouvement du clou lorsque l'hélice tourne dans le sens direct



Mouvement du clou lors des deux premières rotations

On a donc mis en évidence le déplacement du clou dépourvu de tout mouvement parasite. L'utilisation de l'accéléromètre permet d'obtenir 2500 points sur une durée de 250 ms, soit l'équivalent de la mesure grâce à une caméra permettant une acquisition de (2500/0,25) images par seconde, c'est-à-dire une caméra de 10000 images par seconde.

4°/ Conclusion

L'ensemble des courbes représentant le mouvement du clou $Y = f(X)$, obtenues après traitements des données acquises par l'accéléromètre (*courbes disponibles en annexe*), nous permet de conclure que l'hélice du bozo-bozo tourne dans le sens direct trigonométrique, lorsque la tige (et donc le clou) est soumise elle aussi à une rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre ; et inversement. Ainsi contrairement à ce que l'on pouvait penser, le mouvement du jouet n'est pas strictement rectiligne, mais relativement circulaire.

Nous avons ainsi mis en évidence un point très important :

Le sens de rotation de l'hélice est celui de rotation du clou !
--

L'initiation du mouvement de l'hélice étant comprise, nous allons maintenant nous intéresser à l'entretien de la rotation de l'hélice.

Sur le jouet, une fois le mouvement de l'hélice initié, il suffit de gratter de façon régulière la tige crantée pour entretenir cette rotation... Peut-on relier la vitesse de grattage à celle de rotation de l'hélice ?

Partie 2 - Etude de l'entretien du mouvement de rotation de l'hélice

I. Le bozo-bozo simplifié

Grâce aux différents bozos créés par nos soins, nous nous sommes rendus compte assez rapidement qu'une fois mise en mouvement, de simples translations verticales permettaient d'entretenir la rotation de l'hélice, comme dans le principe du houla-hop.



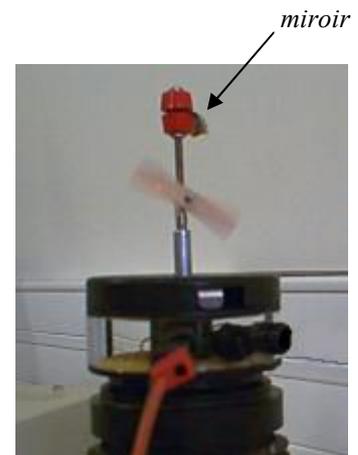
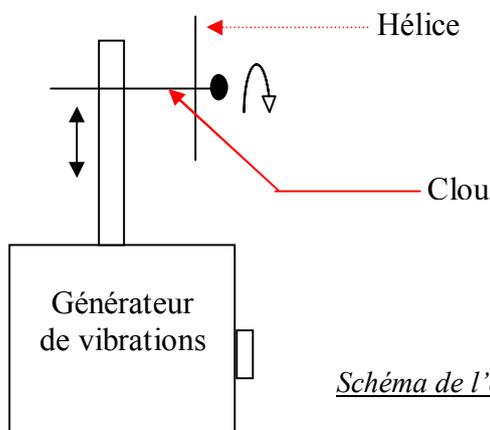
Le mouvement de l'hélice du bozo-bozo se rapproche du houla-hop, le cerceau étant l'équivalent de l'hélice et le bâton, ou le corps, celui du clou.

Or, avec les bozos excités manuellement, cette translation verticale n'est pas constante vu que la « vitesse de grattage » ne l'est pas.

Il est donc nécessaire d'automatiser le mouvement de translation verticale du clou pour pouvoir étudier son influence sur l'entretien du mouvement de rotation de l'hélice.

A. Simplification du bozo

Le bozo a été réduit au minimum nécessaire pour notre étude : un clou et une hélice, le tout monté sur un vibreur imposant une vibration verticale au clou.



Le bozo simplifié (photo 1)

Le vibreur est excité par un GBF, ou Générateur Basse Fréquence, qui permet un réglage précis de la fréquence à laquelle la translation verticale s'effectue. La mesure de cette fréquence est effectuée avec un fréquencemètre.



Un problème s'est posé : pour une amplitude donnée de tension fournie par le GBF, l'amplitude de vibration du clou dépend de la fréquence d'excitation. Il nous faut contrôler l'amplitude du mouvement du clou pour la maintenir constante.

Dans un premier temps, nous avons utilisé un laser et collé un petit miroir sur le vibreur (*cf photo 1*) pour observer l'amplitude du mouvement en regardant la trace du laser projeté au plafond. Mais maintenir cette trace constante s'est avéré difficile.

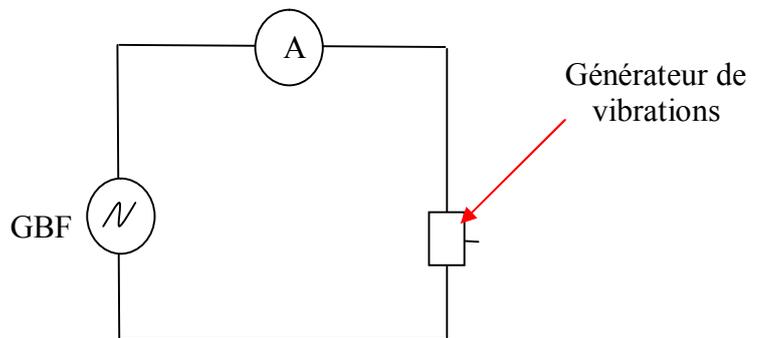
Nous est alors venue l'idée d'utiliser une lunette de visée (elle vise à une dizaine de centimètres devant elle) avec laquelle nous pouvons zoomer sur le clou.

Sur le verre de la lunette est gravé un repère gradué, et grâce à la persistance optique qui nous permet de voir la « trace » du clou, nous pouvons mesurer la taille de cette trace directement et la maintenir constante en jouant sur l'amplitude de la tension fournie par le GBF.

Une autre précaution a dû être prise car l'intensité maximale que peut supporter le générateur de vibrations est de 1 Ampère. Un ampèremètre inséré en série permet de suivre l'intensité de manière à ne pas détériorer le vibreur.

Ces deux contraintes ont imposé l'amplitude du mouvement de vibration lors des expériences : il faut la maintenir constante sur une gamme de fréquences assez large sans jamais dépasser 1A.

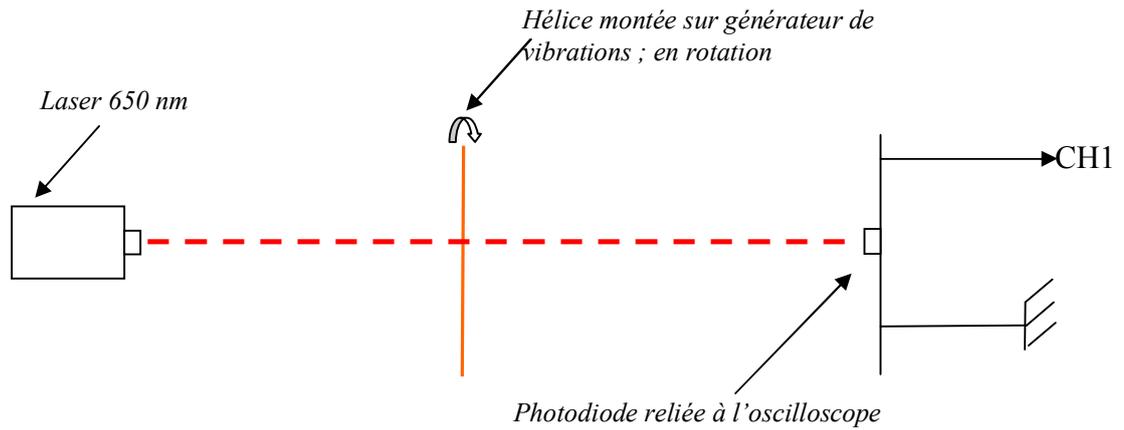
Schéma du circuit permettant l'excitation verticale du clou à amplitude constante pour différentes fréquences f d'excitation.



Il reste à mesurer la vitesse de rotation de l'hélice.

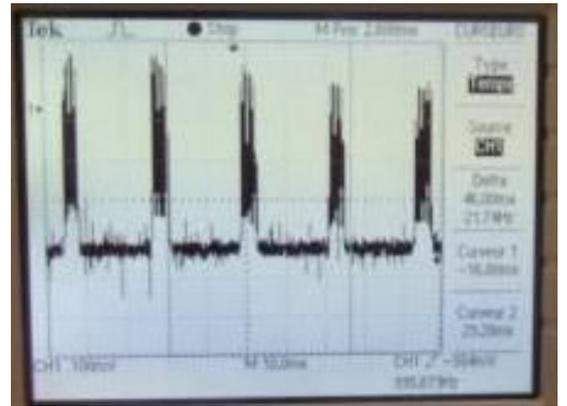
La première idée est d'utiliser un stroboscope pour essayer de fixer l'hélice en réglant la vitesse des flashes mais les mouvements de l'hélice sont trop instables pour obtenir l'immobilité apparente.

Après pas mal de temps de réflexion sur le moyen à utiliser pour mesurer la vitesse de l'hélice nous avons entrevu l'idée d'un système compliqué intégrant un faisceau laser qui couperait l'hélice en rotation avant d'aller exciter une photodiode reliée à un oscilloscope



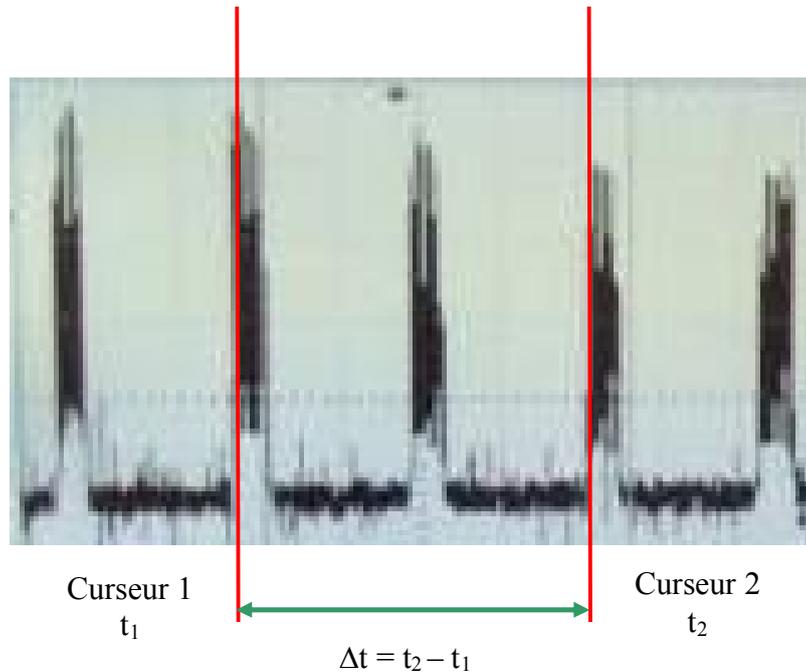
Grâce à ce système, nous pouvons déterminer sur l'oscilloscope la vitesse de rotation de l'hélice. En un tour, l'hélice coupe deux fois le faisceau laser, donc deux pics apparaissent sur l'écran de l'oscilloscope.

Pour calculer la vitesse de rotation de l'hélice il faut donc placer le premier curseur au début d'un des pics, et le second, deux pics plus tard.



Ecran de l'oscilloscope lors de l'acquisition de mesures pour déterminer la vitesse de rotation de l'hélice.

Nous utilisons des curseurs « temps », ainsi, la différence entre le temps indiqué par le deuxième curseur et le temps indiqué par le premier curseur est celui que met l'hélice à faire un tour.



Δt est le temps que met l'hélice pour faire un tour (période de rotation de l'hélice).

La vitesse de rotation de l'hélice étant assez variable (l'hélice peut toucher le vibreur, quitter le clou...etc.), nous avons effectué 5 mesures de vitesse pour chaque fréquence imposée par le GBF, ce qui nous permet de supprimer l'incertitude que l'on a avec une seule et unique mesure.

Le Δt mesuré nous donne la période de rotation, il fallait donc prendre l'inverse de cette période, soit $1/\Delta t$ pour obtenir la fréquence de rotation de l'hélice.

Nous avons ensuite tracé les courbes représentant la vitesse de rotation de l'hélice en fonction de la fréquence d'excitation.

B. Premières observations et amélioration du système

Au début des prises de mesures, nous faisons des relevés avec des clous de diamètre inconnu et des hélices en bois fabriquées par nos soins. Les courbes obtenues étaient intéressantes mais très vite s'est posé le problème de la reproductibilité d'une séance à l'autre !

Nous avons décidé de noter la position des appareils à même la table, pour faciliter leur remplacement à la séance suivante.

Mais il était encore difficile d'interpréter les courbes obtenues et de les comparer entre elles.

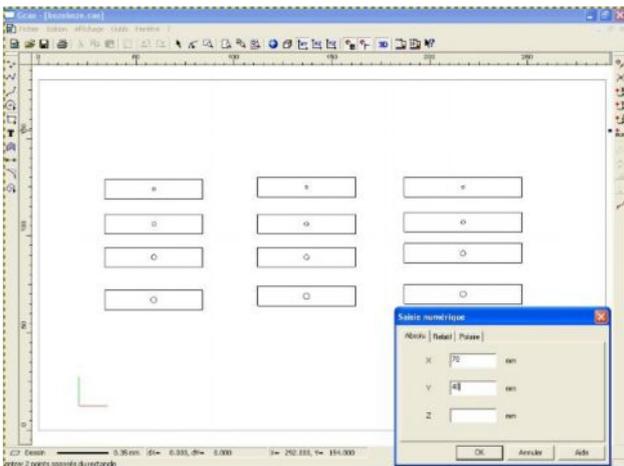
S'en est suivi un questionnement sur les paramètres à fixer pour pouvoir interpréter nos expériences.

Il nous fallait des hélices calibrées, et non pas des hélices faites maison, presque jamais ni de la même taille, ni de la même épaisseur...

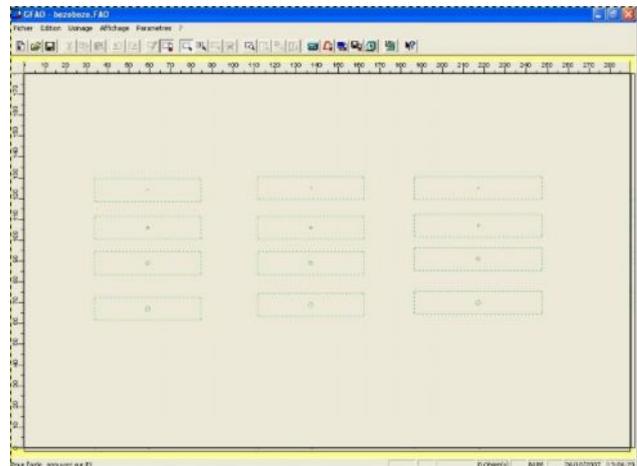
C. Utilisation d'hélices calibrées

Nous avons demandé à M.Thielois, professeur de technologie du collège, s'il disposait du matériel nécessaire pour fabriquer des hélices calibrées.

Il nous a expliqué le fonctionnement du logiciel permettant de programmer la découpe de plexiglas et nous avons pu fabriquer tout un jeu d'hélices rectangulaires de différentes dimensions percées en leur centre d'un trou de diamètre déterminé.



Logiciel GCAO pour concevoir les formes



Logiciel GFAO pour paramétrer l'usage



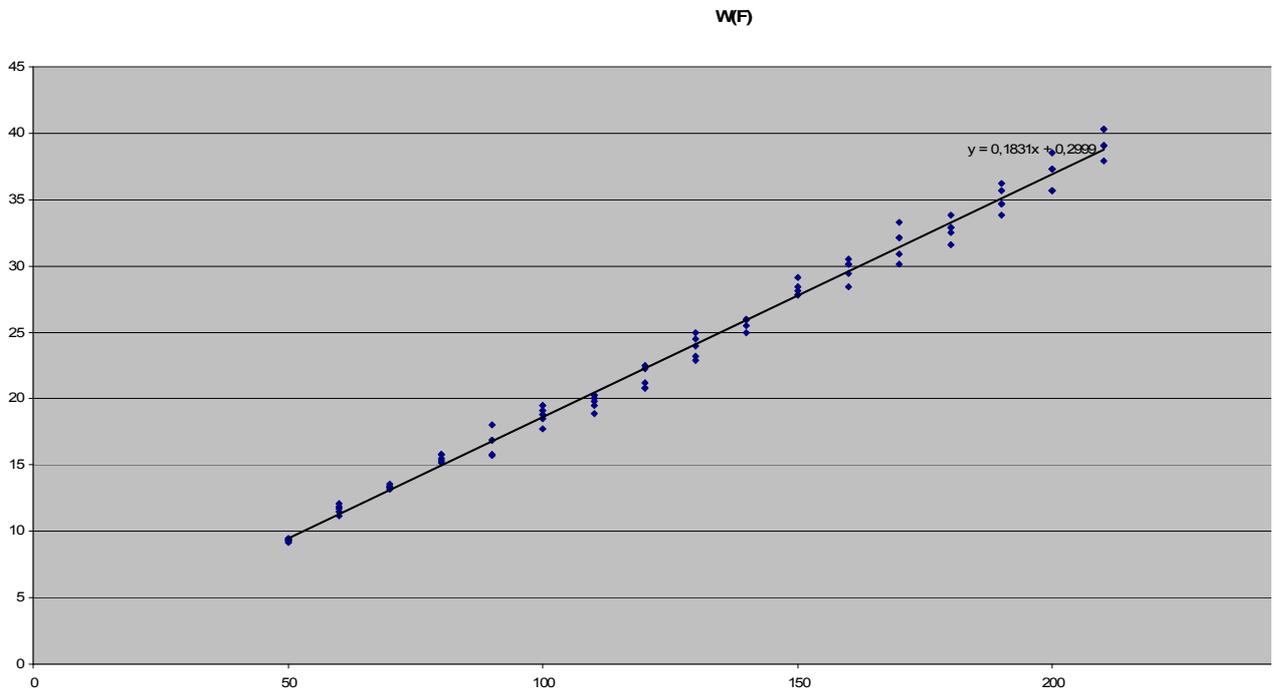
Logiciel de découpe et fraiseuse



Gros plan sur la fraiseuse

Nous reprenons alors nos séries de mesures en utilisant les hélices calibrées et en mesurant le diamètre du clou à l'aide d'un palmer avant chaque expérience.

Sur les premiers graphes tracés, comme sur celui-ci dessous, nous remarquons une certaine linéarité : les courbes obtenues étaient des droites, qui passaient en plus ostensiblement par l'origine !



L'un des premiers graphes obtenus : une droite de proportionnalité entre la fréquence imposée et la vitesse de rotation de l'hélice

Nous avons donc bien entendu cherché à interpréter ces courbes, ce qui nous a amené à concevoir un modèle théorique, reposant sur des hypothèses simplificatrices, certes, mais tout de même acceptables.

II. Maintien de la rotation : le modèle théorique.

On envisage les hypothèses suivantes pour tenter d'établir un modèle théorique permettant de décrire nos observations :

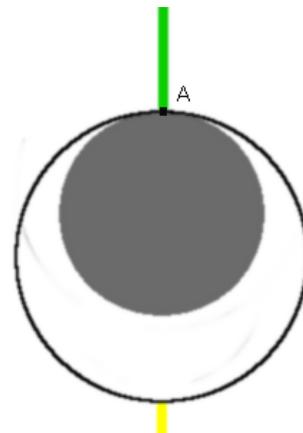
- ⊕ les frottements sont suffisants pour que l'hélice roule sans glisser sur le clou
- ⊕ en une oscillation verticale du clou, le point de contact entre le trou de l'hélice et le clou effectue un tour du clou (comme pour le houla-hop).

On nomme R_1 le rayon du clou et R_2 le rayon du trou de l'hélice.

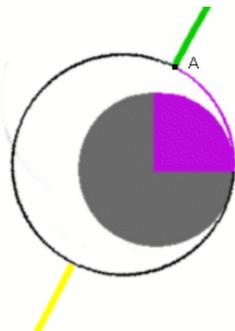
Soit f la fréquence d'excitation du clou (en hertz) et W la vitesse de rotation de l'hélice (en hertz).

Dans ces conditions, on cherche à savoir quelle distance parcourent les pales de l'hélice en "une période" du clou :

Sur le schéma ci-contre (réalisé sans considération d'échelle), on visualise de face, les deux pales de l'hélice, respectivement et vert et en jaune, le trou de l'hélice (grand cercle) et le clou (petit cercle gris). On nomme A le point d'intersection entre le clou et l'hélice à leur position initiale.



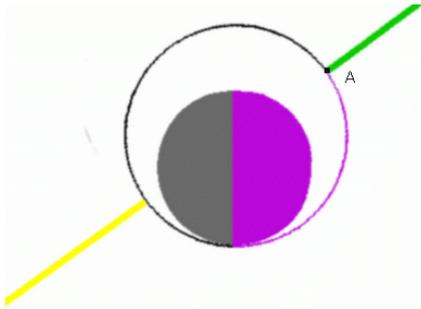
Position initiale de l'hélice et du clou



Position seconde de l'hélice

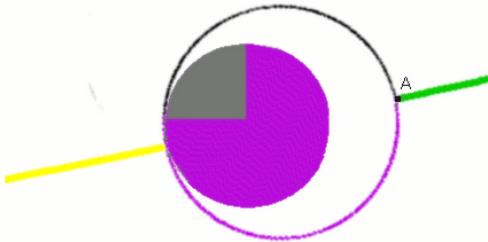
Quelques instants plus tard, l'hélice s'est « décollée » du clou sur un quart du périmètre de celui-ci.

Ce « décolllement » est marqué par la coloration violette. La partie d'hélice colorée en violet est la partie qui est déjà entrée en contact avec le clou.



Position troisième de l'hélice

Puis l'hélice se « décolle » d'un nouveau quart de périmètre, c'est la troisième position...

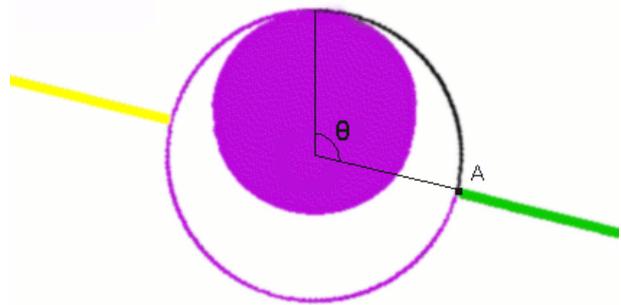


Position quatrième de l'hélice

Puis elle se « décolle » encore d'un nouveau quart de position, elle s'est donc « décollée » de trois quarts de tour autour du clou...

Pour finir, l'hélice a fait un tour de clou. On se trouve donc dans cette configuration :

On remarque que par rapport à sa position initiale, le point A a parcouru l'angle θ , soit la distance en noir sur l'hélice.



Position finale de l'hélice et du clou

On en déduit que lors d'un aller-retour du clou, le point de contact initial A' entre le trou de l'hélice et le clou parcourt la distance $L = 2\pi(R_2 - R_1)$. Donc l'angle décrit vaut :

$$\theta = \frac{2\pi(R_2 - R_1)}{R_2} = 2\pi \cdot \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right).$$

La vitesse angulaire du point initial de contact A' vaut alors $\omega = f \cdot 2\pi \cdot \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)$ en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$, soit

$W = f \cdot \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)$ tours d'hélice par seconde (en hertz). Car le clou effectue f allers-retours par seconde.

Le modèle théorique prévoit donc que : $W = f \cdot \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)$.

Si l'on trace la vitesse de rotation de l'hélice en fonction de la fréquence d'excitation du clou, on devrait donc obtenir une droite passant par l'origine et de coefficient directeur égale à $\left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)$.

De plus R_2 est toujours supérieur à R_1 , la vitesse de rotation de l'hélice devrait augmenter quand la fréquence excitation du clou augmente.

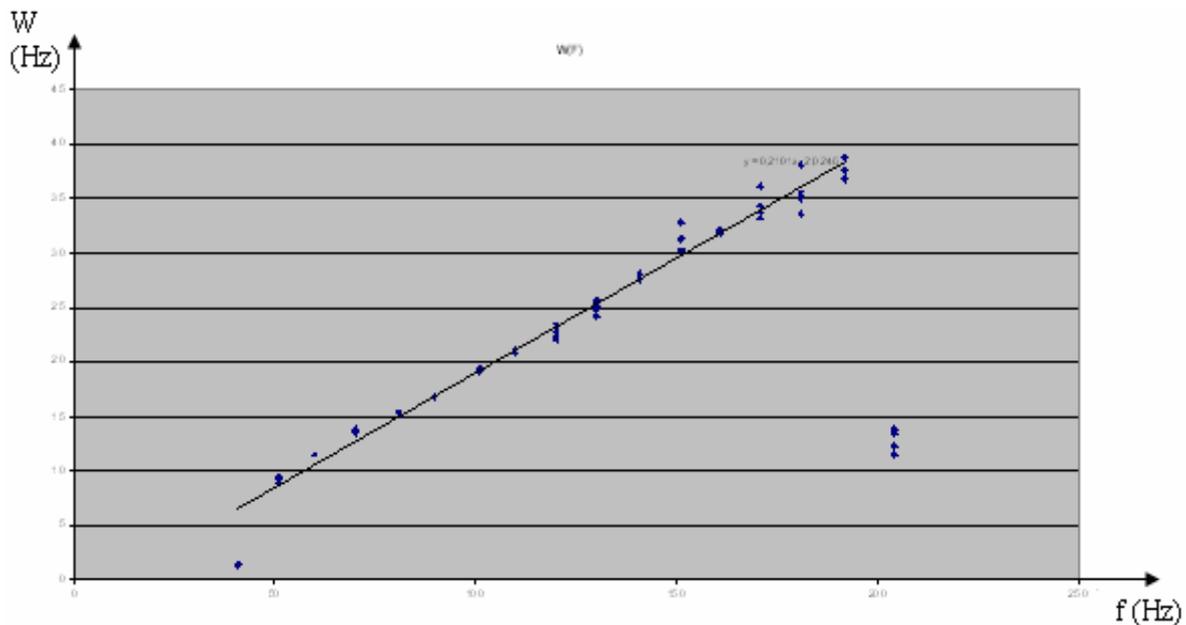
III. Confrontation du modèle théorique et des mesures expérimentales.

Grâce aux expériences réalisées, on peut confronter modèle théorique et mesures expérimentales.

A. Etude d'une courbe confirmant le modèle théorique.

Tout d'abord, on constate que le modèle théorique établi est bien vérifié expérimentalement, même s'il faut y ajouter parfois quelques restrictions.

Prenons un exemple parmi l'ensemble des courbes obtenues :



Cette expérience a été réalisée avec :

- ⊕ un clou de diamètre $D_1 = 2,0$ mm,
- ⊕ une hélice calibrée avec un trou de diamètre $D_2 = 2,5$ mm
- ⊕ des pales de longueur $L = 50,0$ mm.
- ⊕ l'amplitude du mouvement du clou est maintenue constante.

En modélisant le nuage de points, on obtient une droite d'équation : $W = 0,21f - 2,0$

Avec

- ⊕ f la fréquence d'excitation du clou, et
- ⊕ W le nombre de tours d'hélice par seconde.

Commentaires :

Par rapport aux vitesses de rotation mesurées, de l'ordre de la dizaine de hertz, l'ordonnée à l'origine paraît négligeable.

La pente attendue avec le modèle théorique est de : $1 - \frac{2,0}{2,5} = 0,20$.

L'écart relatif entre la valeur théorique et la valeur expérimentale est donc de 5%: le modèle est validé sur cet exemple.

Cependant, on remarque que les résultats attendus ne sont obtenus qu'entre $f = 50Hz$ et $f = 200Hz$. En dessous et au dessus de ces valeurs, le nombre de tours d'hélice par seconde baisse brutalement.

On note donc que le bozo-bozo ne fonctionne de manière optimale qu'entre certaines valeurs de fréquence d'excitation du clou.

B. Des différences avec le modèle théorique : tentatives d'interprétation.

Les résultats obtenus avec l'ensemble de nos mesures sont résumés dans les tableaux ci-dessous. Les expériences ont été réalisées en faisant varier différents paramètres :

- ⊕ Le diamètre du clou D_1 .
- ⊕ Le diamètre du trou de l'hélice D_2 .
- ⊕ La taille des pâles de l'hélice L .

Bozo n°	Diamètre trou D_2 (mm)	Diamètre clou D_1 (mm)	Pâles L(mm)	Amplitude (unité arbitraire)
1	3,0	1,07	50,0	0,4
2	2,5	2,00	40,0	0,4
3	2,5	2,00	50,0	0,4
4	2,5	2,00	50,0	0,4
5	2,5	2,00	60,0	0,4
6	2,5	1,07	50,0	0,4
7	2,4	1,07	inconnues	0,5
8	2,0	1,07	50,0	0,4
9	1,5	1,07	50,0	0,4

Bozo n°	Allure de la courbe	Equation de la courbe le cas échéant	Pente obtenue	Pente attendue	Ecart relatif
1	Nuage de points	-	-	0,64	-
2	Droite origine	$W = 0,17.f - 1,04$	0,17	0,20	15,0%
3	Droite origine	$W = 0,18.f + 0,30$	0,18	0,20	10,0%
4	Droite origine	$W = 0,21.f - 2,02$	0,21	0,20	5,0%
5	Droite origine	$W = 0,19.f - 5,03$	0,19	0,20	5,0%
6	Portion de droite puis nuage	$W = 0,55.f + 0,61$	0,55	0,57	3,8%
7	Portion de droite et nuage	$W = 0,59.f - 15,98$	0,59	0,55	6,5%
8	Droite mais points éparpillés	$W = 0,39.f - 5,02$	0,39	0,47	16,1%
9	Droite origine	$W = 0,25.f - 0,26$	0,25	0,29	12,8%

Les courbes représentant les résultats obtenus sont présentées en annexe.
La courbe étudiée en exemple est celle obtenue avec le bozo-bozo simplifié numéro 4.

Les différents résultats obtenus nous permettent de confirmer le modèle théorique mais aussi de préciser ses limites.

Tout d'abord, on peut noter que les courbes numéro 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 9 vérifient bien le modèle théorique en ce qui concerne la pente de la droite obtenue et que l'ordonnée à l'origine est bien négligeable pour les courbes 2, 3, 4, 6, 9 aux incertitudes expérimentales près.

On remarque que non seulement il existe des incertitudes sur la mesure de vitesse de rotation de l'hélice au cours d'une expérience (erreurs que l'on a minimisé en effectuant systématiquement 5 mesures de vitesses) mais aussi d'autres incertitudes expérimentales comme l'illustrent les courbes 3 et 4 obtenues dans les mêmes conditions expérimentales, mais à une semaine d'intervalle.

Nous sommes donc satisfaits de notre modèle théorique qui permet bien de rendre compte de nos observations expérimentales. Néanmoins, il reste à comprendre les écarts observés sur certaines courbes.

1°/ Variation de la longueur des pales.

En premier lieu, on peut étudier l'influence de la taille des pales de l'hélice sur la vitesse de rotation de l'hélice. Les courbes 2, (3), 4 et 5 le permettent :

- ⊕ mêmes diamètres de trous d'hélice
- ⊕ même clou
- ⊕ mais des longueurs d'hélice de 40,0 mm, 50,0 mm et 60,0 mm

Les mesures ayant permis de tracer les courbes 2, 4 et 5 ont été réalisées le même jour (conditions expérimentales le plus reproductibles possibles) et on constate une ordonnée à l'origine négative de plus en plus grande en valeur absolue en fonction de la taille de l'hélice.

On pourrait expliquer cette baisse des valeurs obtenues par l'effet du poids, qui va toujours exercer une force de même norme sur une hélice de même masse, et peut la ralentir. En effet celui-ci est plus important pour une hélice de 60 mm qu'une de 50 mm ou de 40 mm.

2°/ Variations de la différence entre diamètre du clou et diamètre du trou de l'hélice.

En second lieu, d'autres différences avec le modèle théorique sont observables sur les courbes 1, 6, 7 et 8. Elles présentent toutes une sorte de nuage de points, au moins à partir de certaines valeurs de fréquence d'excitation du clou.

En observant les différences Δ entre diamètre du clou D_1 et diamètre du trou de l'hélice D_2 pour ces différentes courbes, on constate que plus celle-ci est importante plus les nuages de points ont tendance à apparaître.

En effet :

- ⊕ Pour le bozo-bozo 1 : $\Delta = 1,9$ mm et la courbe entière est un nuage de points.
- ⊕ Pour le bozo-bozo 6 : $\Delta = 1,4$ mm et un nuage de points apparaît pour une fréquence d'excitation du clou supérieure à 100 Hz.
- ⊕ Pour le bozo-bozo 7 : $\Delta = 1,4$ mm et un nuage de points apparaît pour une fréquence d'excitation du clou supérieure à 150 Hz.
- ⊕ Pour le bozo-bozo 8 : $\Delta = 0,93$ mm, il n'y a pas véritablement de nuage de points mais les différents points obtenus sont assez éparpillés, même si l'on peut deviner une droite derrière ceux-ci.

De plus, on notera que la chute de vitesse de rotation de l'hélice qui apparaît à partir d'une certaine fréquence dans la courbe 4, notifiée plus haut, n'est pas sans faire penser à la courbe 6 et à la courbe 7.

On peut penser que ces nuages de points sont dus à l'une des hypothèses admises dans le modèle théorique.

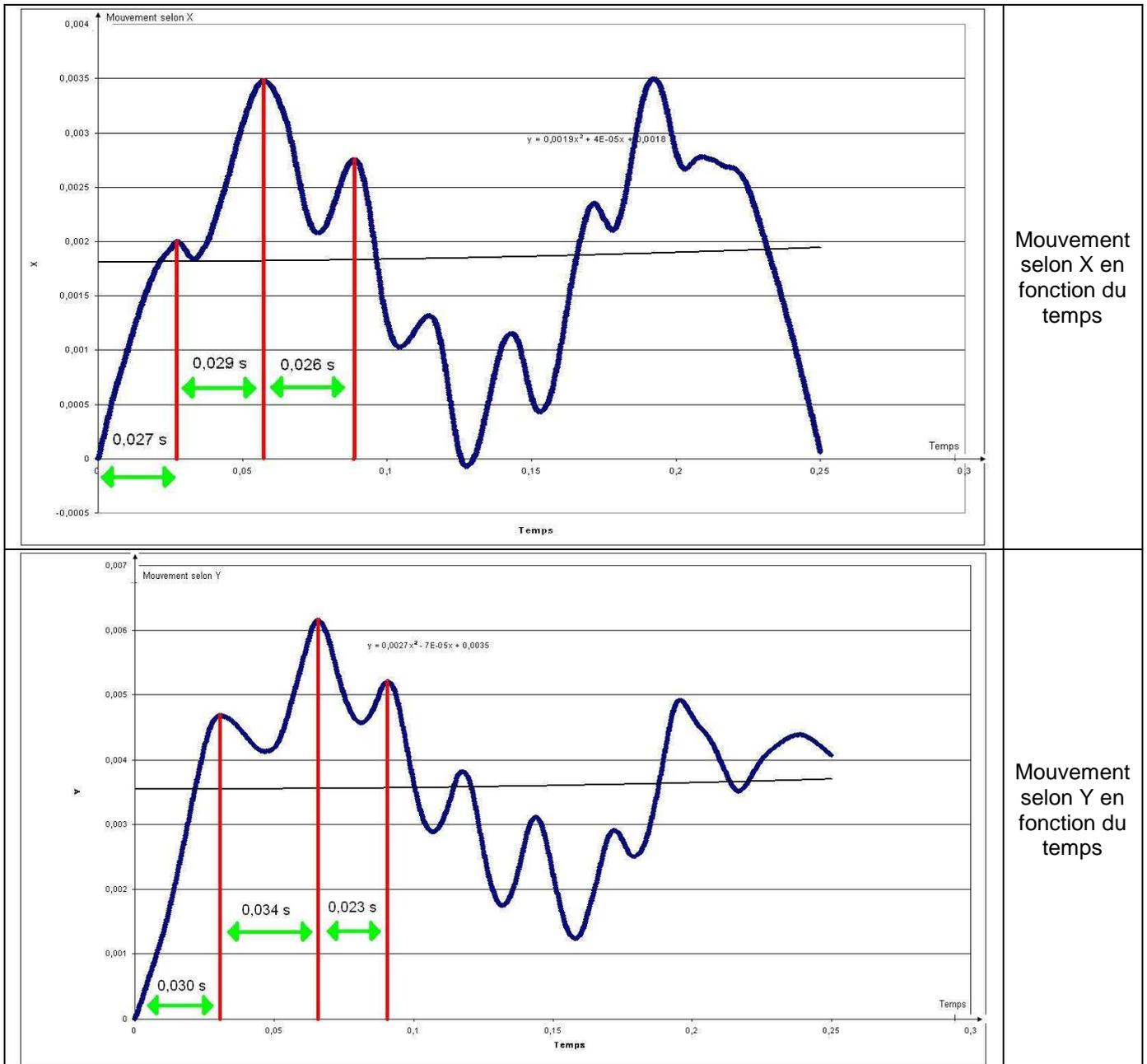
En effet, nous avons postulé l'inexistence de glissement entre hélice et clou, mais il est clair que plus le trou de l'hélice sera grand face au diamètre du clou, plus l'hélice aura de liberté pour bouger, plus il y aura de glissements.

Ceux-ci ralentiraient d'un côté l'hélice avec des forces de frottement, d'où les chutes observées dans les graphiques 6, 7 et peut-être 4.

Ils auraient aussi pour effet d'intégrer un effet aléatoire dans le mouvement du bozo-bozo, car on ne peut prévoir quand aura lieu un glissement. Cet effet est traduit par l'éparpillement des points observé dans toutes les courbes.

Partie 3 – Comment influencer le mouvement du clou ?

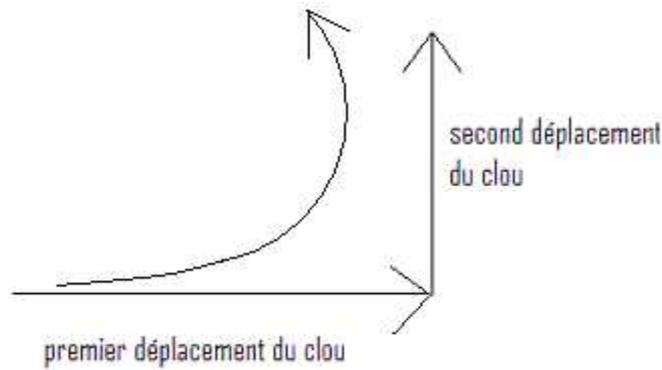
Il reste donc encore à comprendre pourquoi l'hélice du bozo-bozo peut changer de sens de rotation. L'étude du mouvement du clou, là encore, peut amener des éléments de réponse.



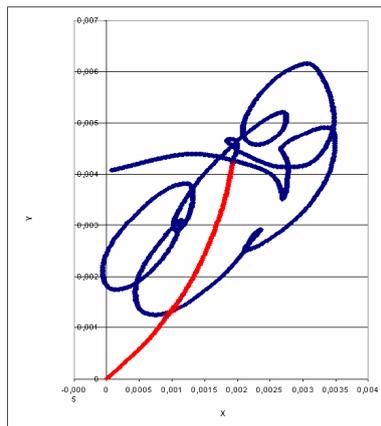
Mouvement selon X en fonction du temps

Mouvement selon Y en fonction du temps

On remarque ainsi que généralement, le mouvement selon X précède le mouvement selon Y, dans le cas de cette acquisition de données. On obtiendrait donc, un mouvement horizontal suivi d'un vertical, ce qui impliquerait un mouvement circulaire du clou comme tel :

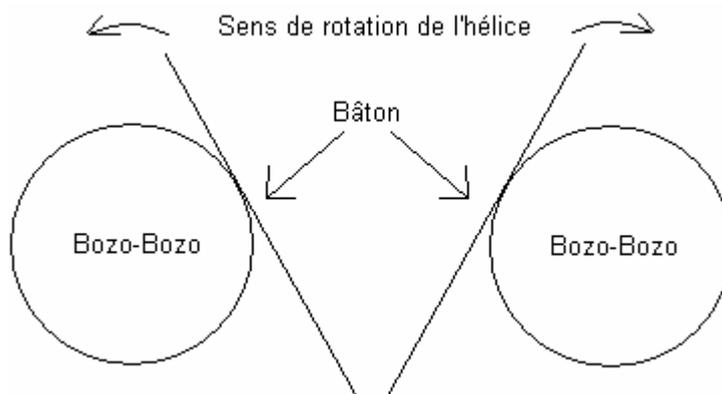


Et c'est bien le mouvement observé :



L'hélice se met alors en rotation dans le sens direct trigonométrique pour l'expérimentateur.

Mais concrètement, comment fait-on pour choisir le sens de rotation de l'hélice ? Il existe diverses techniques de grattage engendrant la rotation de l'hélice dans le sens choisi par l'expérimentateur et il est temps de vous livrer la plus efficace ! Tout tient dans l'inclinaison (discrète normalement mais exagérée sur les schémas ci-dessous) du bâton qui frotte la tige.



Lorsque l'on gratte la tige crénelée, il arrive en fait des instants, où le bâton qui gratte perd le contact avec la tige lors du passage au dessus d'un creux, entre deux crans. Comme il exerçait précédemment une force sur le bozo-bozo, celui-ci réagit par un déplacement en sens contraire, qui est stoppé quelques instants plus tard lorsque le bâton qui gratte retrouve contact avec un cran du bozo-bozo.

Le « déplacement en sens contraire » est la composante horizontale qui décide du sens de rotation du clou.

Conclusion

Ainsi, l'analyse des deux grands éléments que sont le démarrage et le maintien du mouvement du bozo-bozo nous permet de décrire pourquoi l'hélice de ce jouet tourne.

En premier lieu, le grattage engendre des vibrations qui se propagent jusqu'au clou. L'observation du mouvement de ce dernier grâce aux acquisitions à l'accéléromètre, nous a permis de conclure qu'au démarrage, l'extrémité de la tige, et donc le clou sont en rotation.

En reprenant l'analogie avec le houla-hop, de tels mouvements engendrent le démarrage de l'hélice, dans un sens qui dépend du sens de rotation du clou.

Le maintien du mouvement est ensuite assuré par de simples translations du clou (il n'est plus nécessaire d'incliner la bâton de grattage). Des relations de proportionnalité entre la vitesse de translation du clou (et donc de grattage de la tige) et la vitesse de rotation de l'hélice ont pu alors être mises en évidence sous certaines conditions :

- une vitesse minimale de grattage est nécessaire pour entretenir le mouvement,
- plus on gratte vite, plus l'hélice tourne vite...jusqu'à une certaine fréquence de grattage (très dure à obtenir manuellement) où l'hélice ne parvient plus à suivre le mouvement du clou.

De plus, nous avons pu comprendre physiquement comment choisir le sens de rotation du clou entraînant l'hélice.

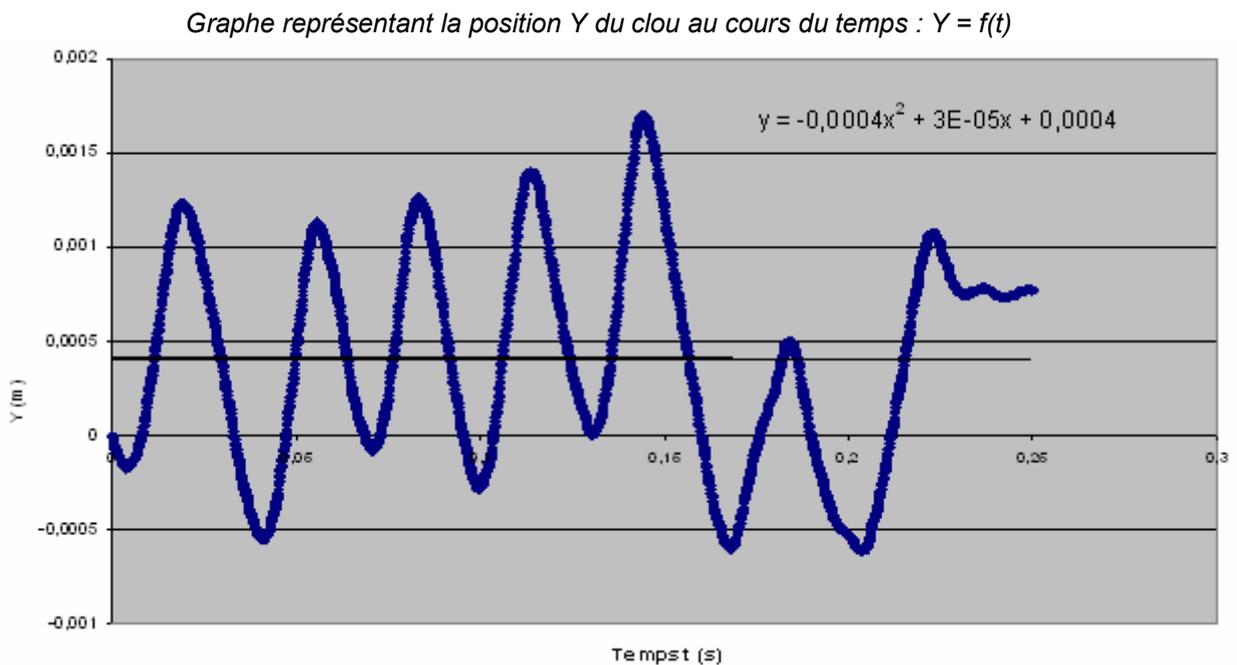
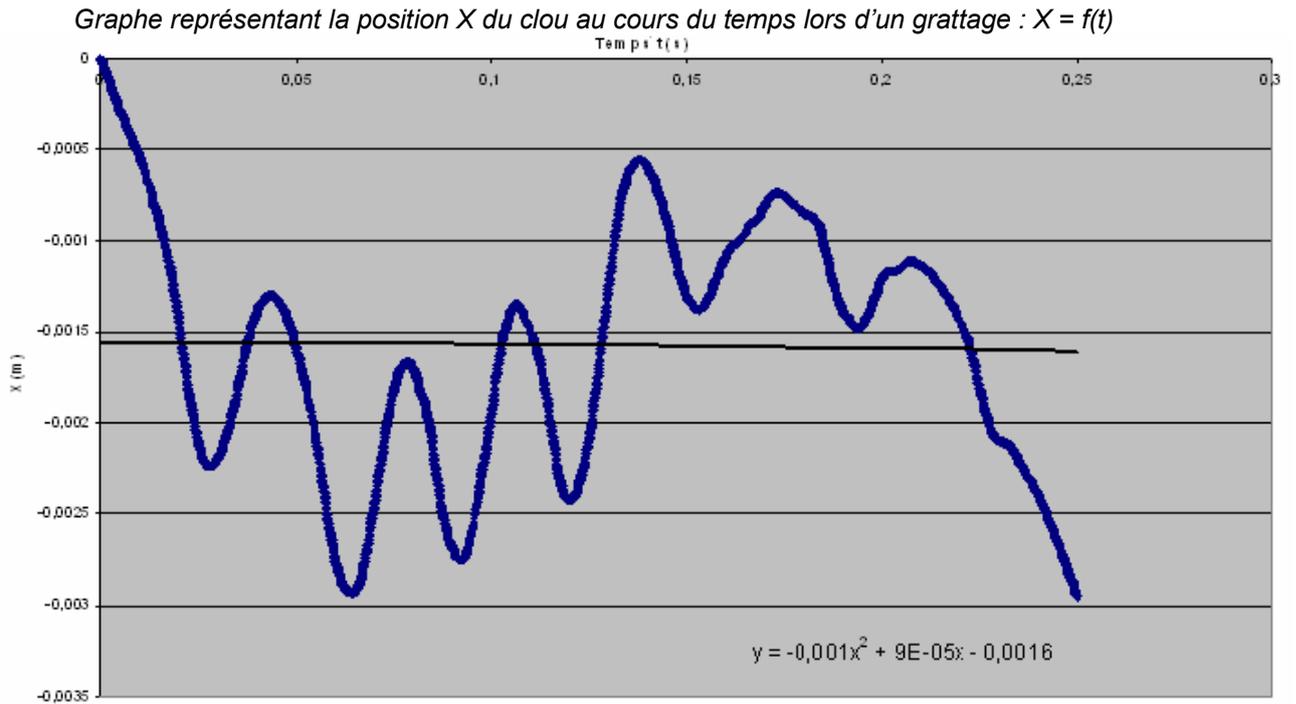
Une partie des énigmes du bozo-bozo a donc été expliquée !

En tout cas, n'hésitez pas à vous fabriquer votre bozo-bozo pour épater petits et grands : il vous suffit d'un morceau de bois que vous crantez avec une lime, d'un clou et d'une hélice en carton ! Pour un bon fonctionnement, il suffit de jouer sur la dimension du trou de l'hélice.

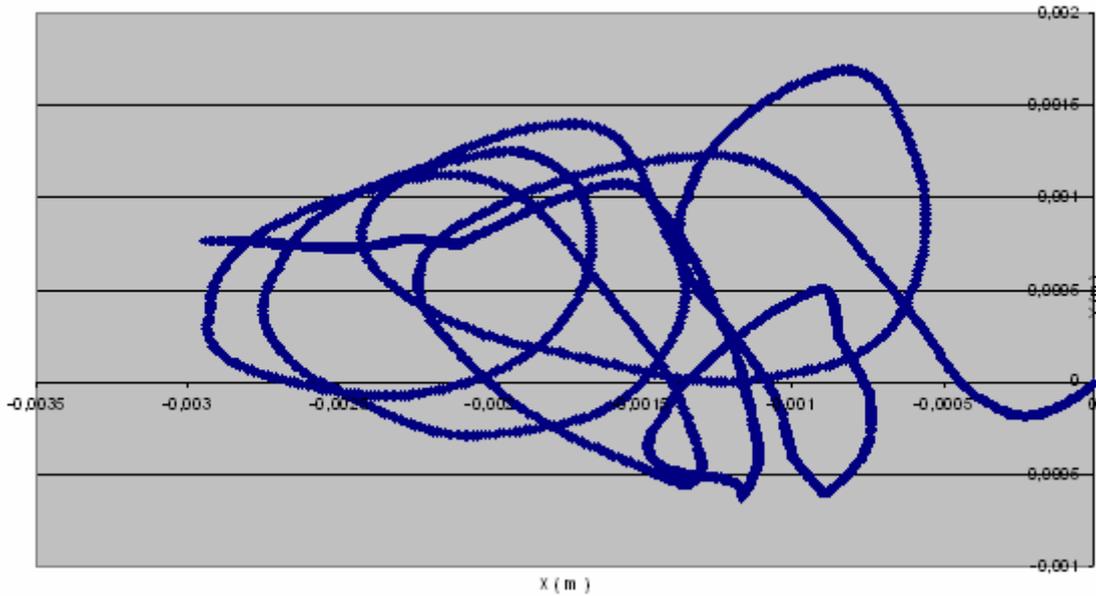
Annexes

ANNEXE 1 : Courbes représentant le mouvement du clou, obtenues après traitement complet des données acquises par l'accéléromètre, lors d'un grattage de la tige ayant entraîné un mouvement de l'hélice dans le sens direct

Enregistrement 1 :



Grphe représentant le mouvement du clou $Y = f(X)$

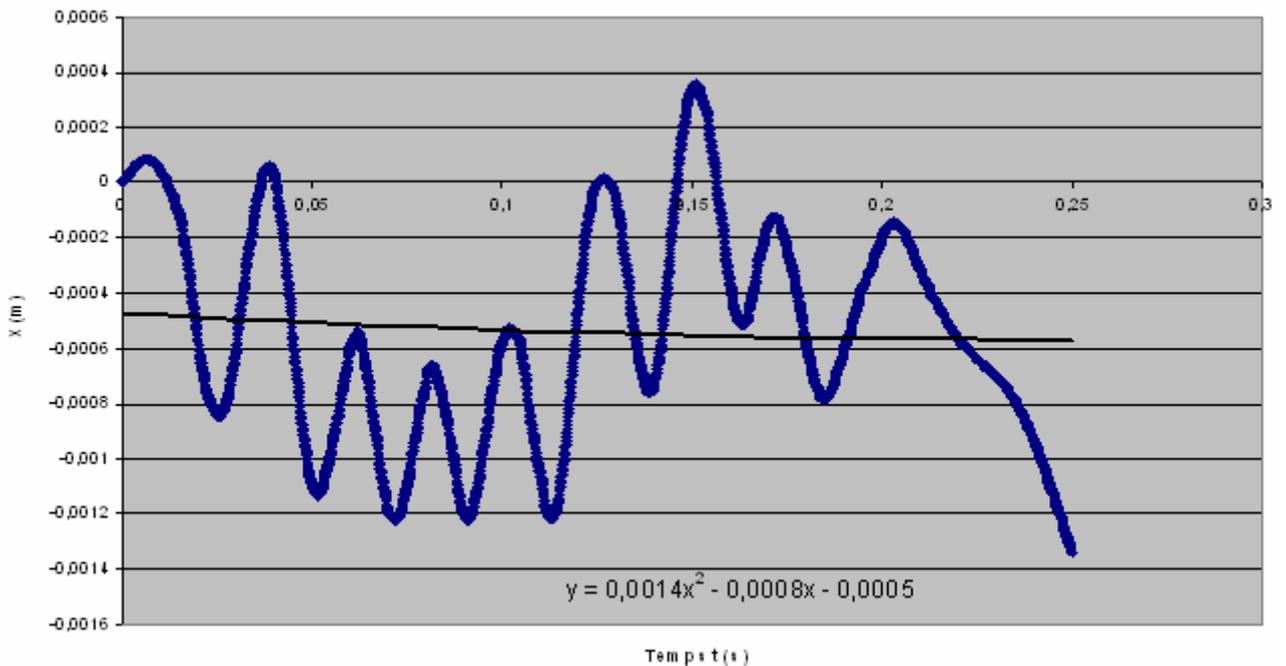


A tout début, le clou semble amorcer une rotation dans le sens indirect, mais finalement son mouvement se fait dans le sens direct trigonométrique.

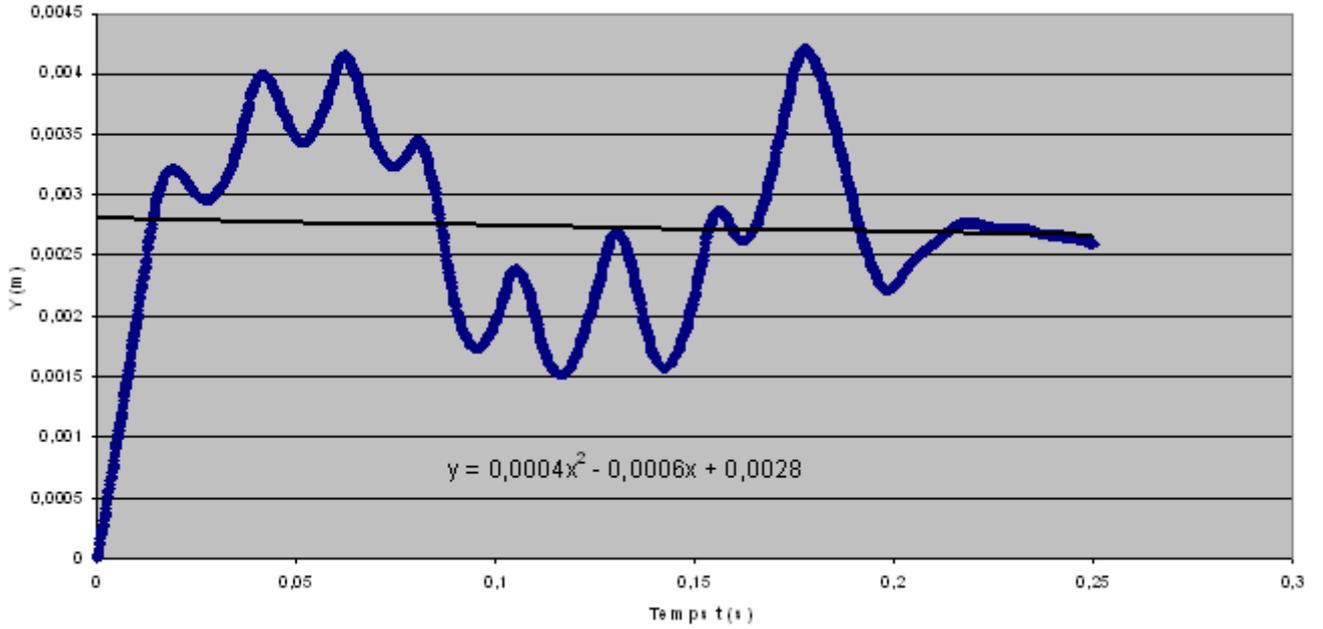
Enregistrement 2 : C'est l'enregistrement choisi pour expliquer la démarche de traitement des données dans notre dossier.

Enregistrement 3 :

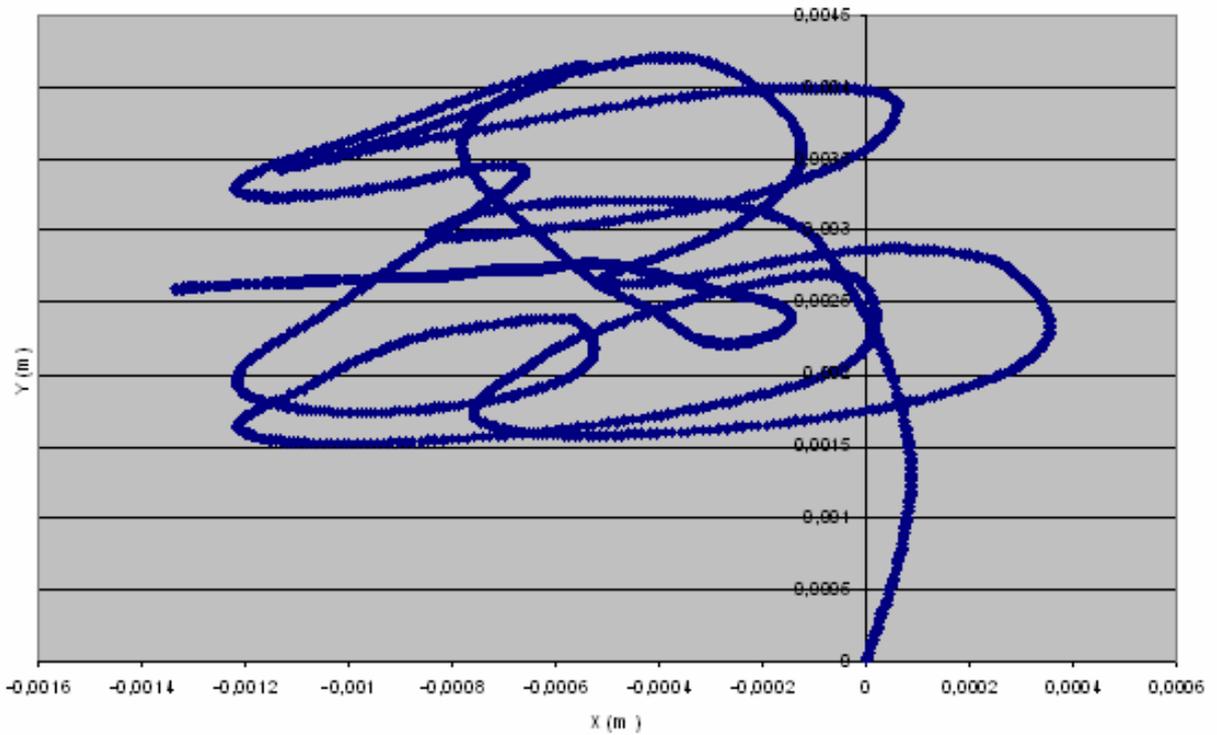
Grphe représentant la position X du clou au cours du temps lors d'un grattage : $X = f(t)$



Grphe représentant la position Y du clou au cours du temps lors d'un grattage : $Y = f(t)$



Grphe représentant le mouvement du clou $Y = f(X)$

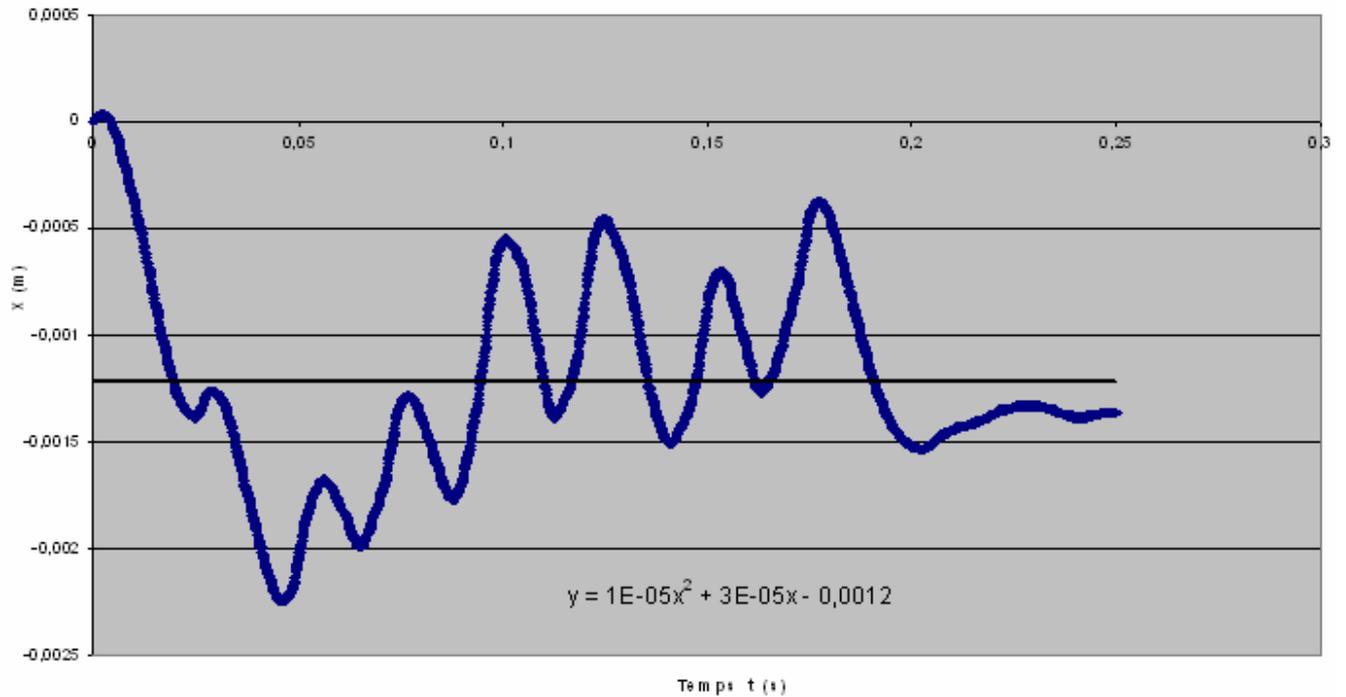


Le mouvement du clou s'amorce dès le départ dans le sens direct trigonométrique.

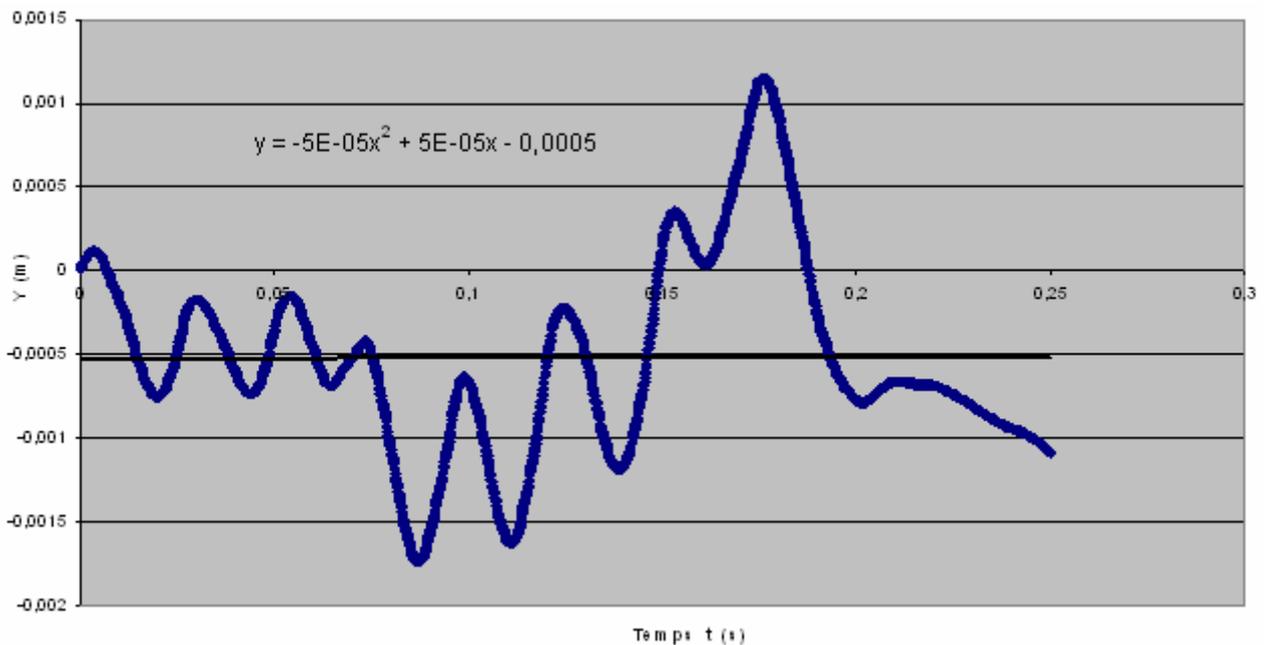
ANNEXE 2: Courbes représentant le mouvement du clou, obtenues après traitement complet des données acquises par l'accéléromètre, lors d'un grattage de la tige ayant entraîné une rotation de l'hélice dans le sens indirect.

Enregistrement 1 :

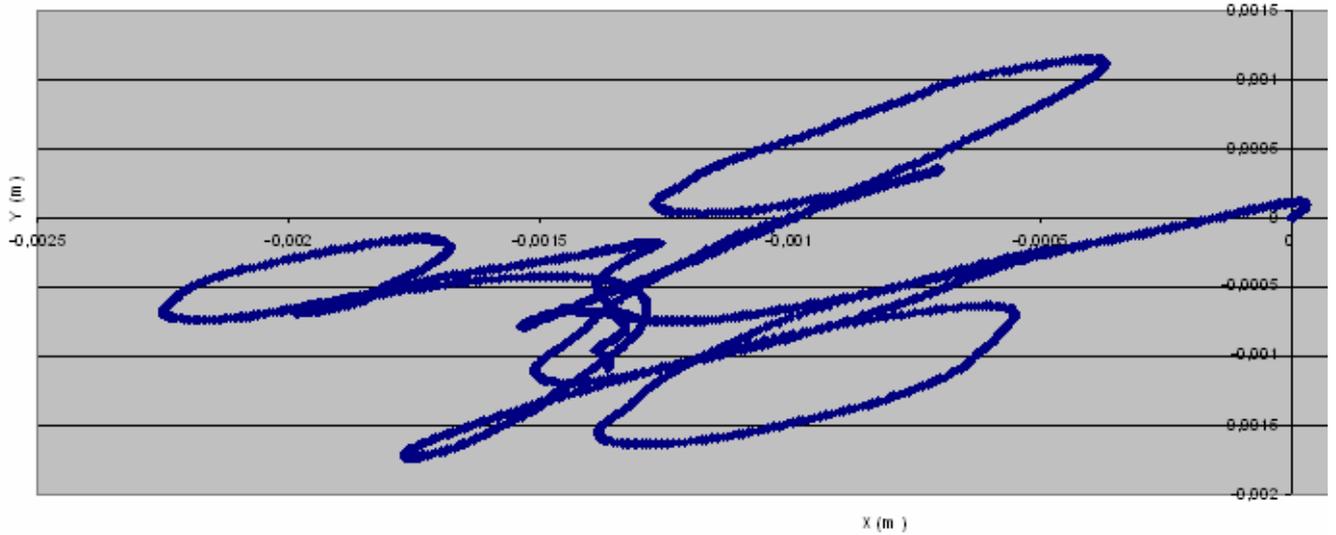
Graphe représentant la position X du clou au cours du temps lors d'un grattage : $X = f(t)$



Graphe représentant la position Y du clou au cours du temps lors d'un grattage : $Y = f(t)$



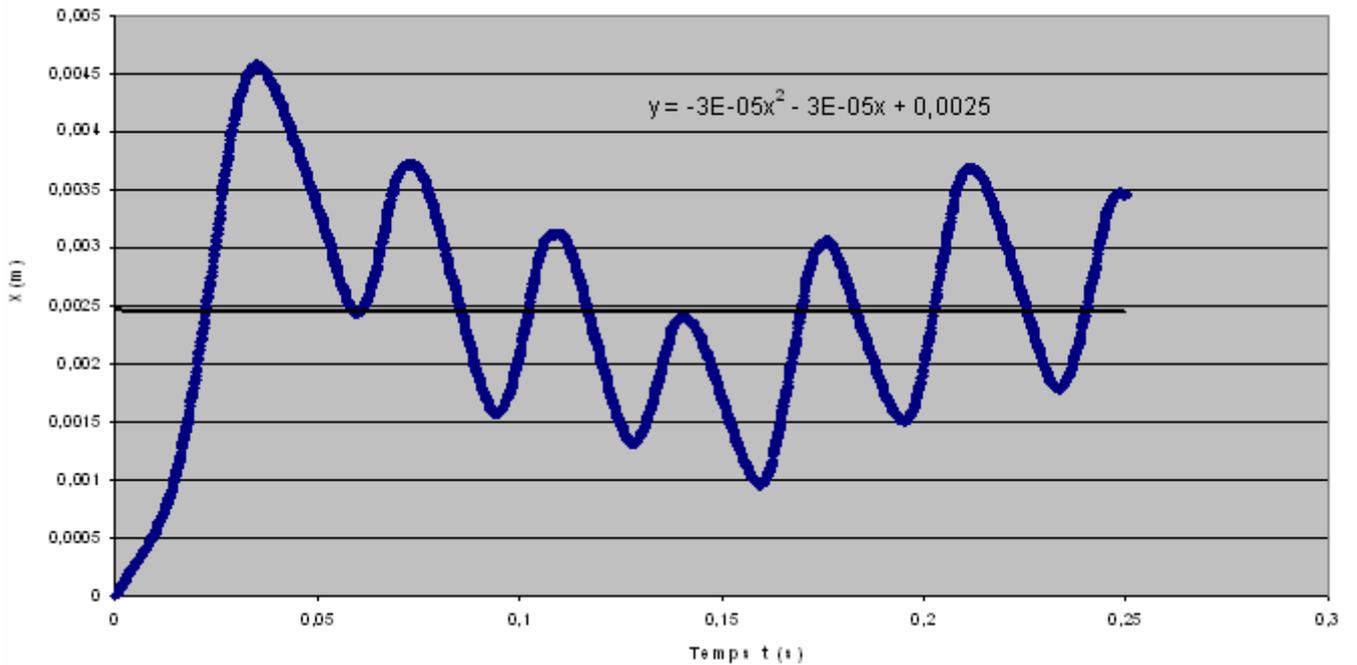
Grphe représentant le mouvement du clou $Y = f(X)$



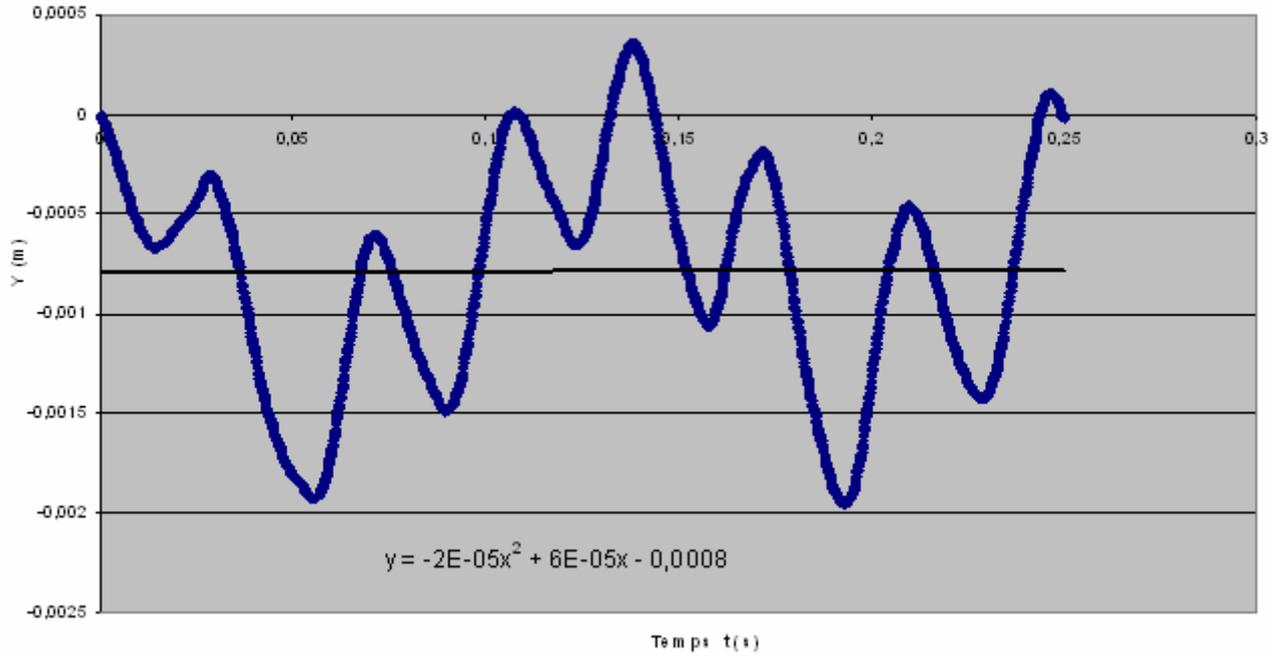
Après une légère amorce dans le sens direct, le clou se met en mouvement de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre (sens indirect) pour la plupart des rotations avec cependant quelques inversions de sens : cet enregistrement étant peu lisible directement (les courbes se chevauchent trop), nous avons du le « découper » en plusieurs échantillons de points afin de voir apparaître le mouvement du clou.

Enregistrement 2 :

Grphe représentant la position X du clou au cours du temps lors d'un grattage : $X = f(t)$



Grphe représentant la position Y du clou au cours du temps lors d'un grattage : $Y = f(t)$



Grphe représentant le mouvement du clou $Y = f(X)$



Le mouvement du clou se fait dans le sens indirect du début à la fin de l'enregistrement.

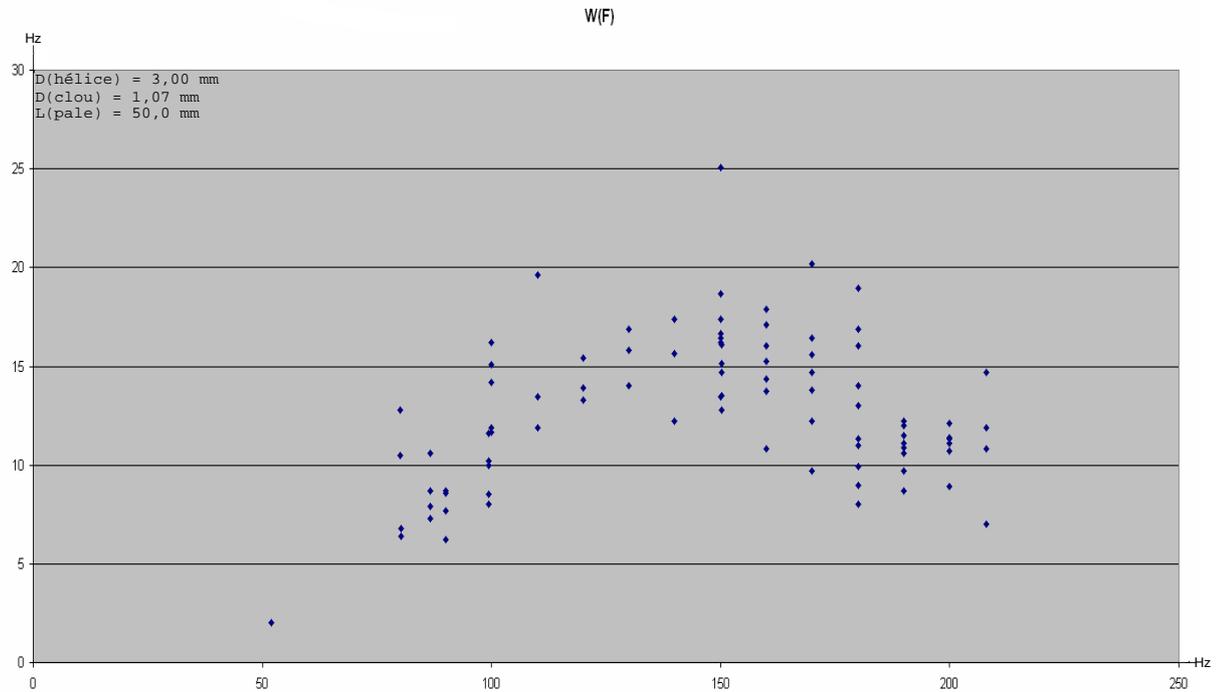
ANNEXE 3 :

Entretien de la rotation de l'hélice : Courbes représentant la vitesse de rotation W de l'hélice en fonction de la fréquence f d'excitation verticale du clou.

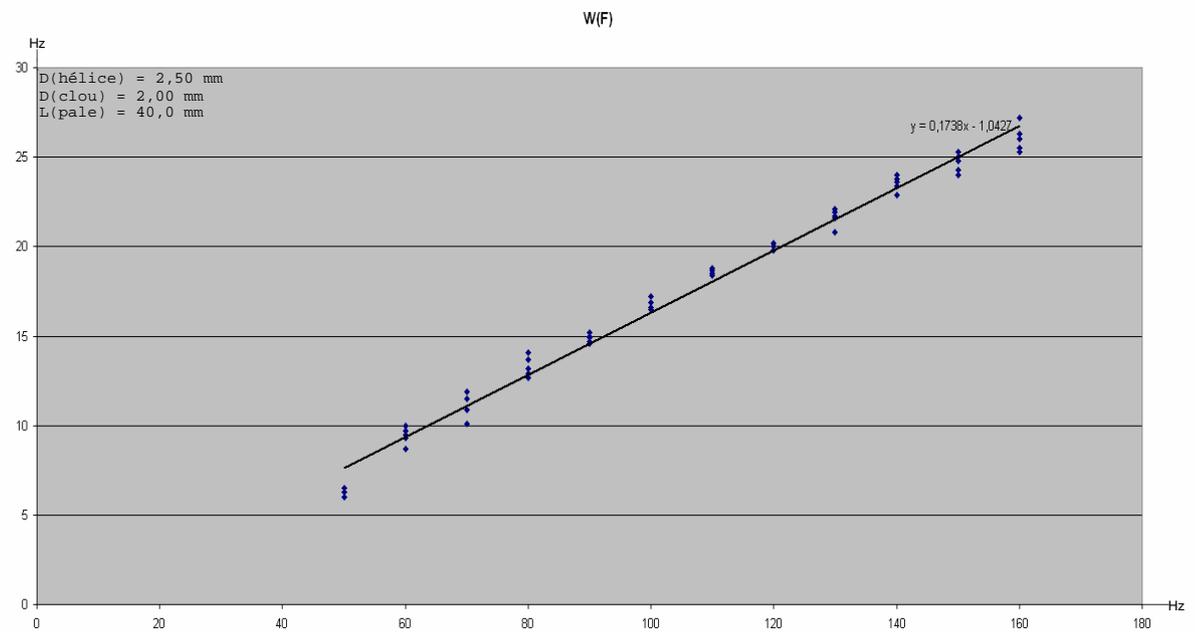
Numéro
courbe :

Courbe :

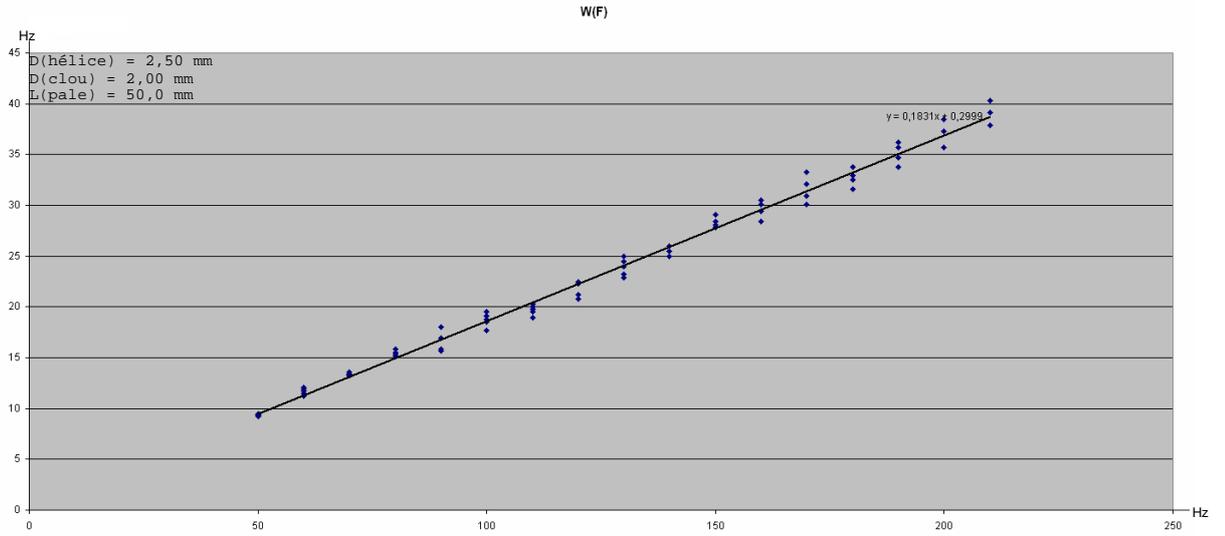
1



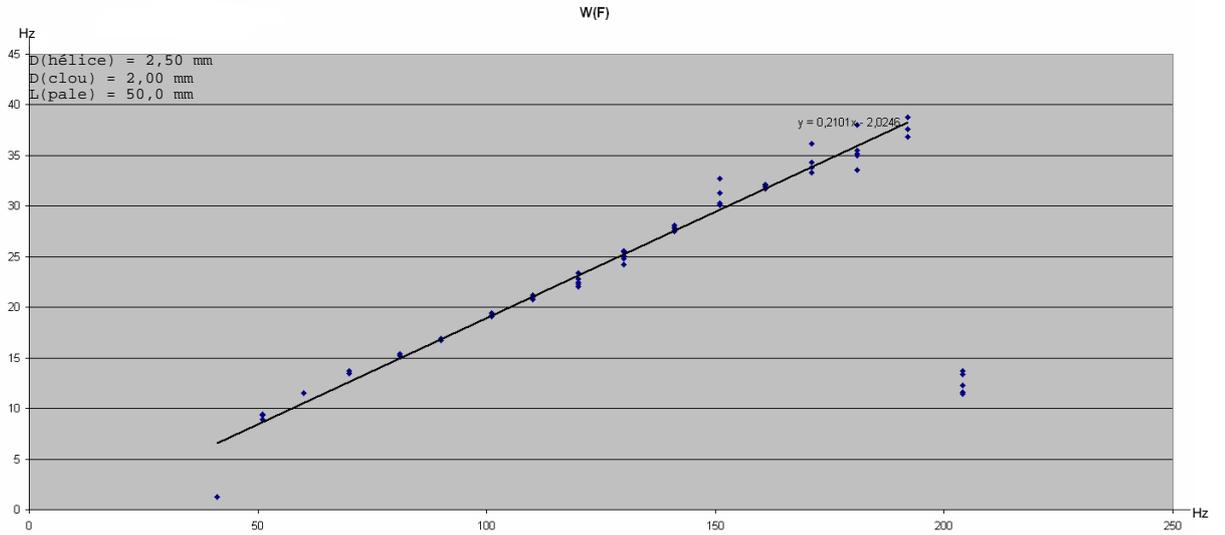
2



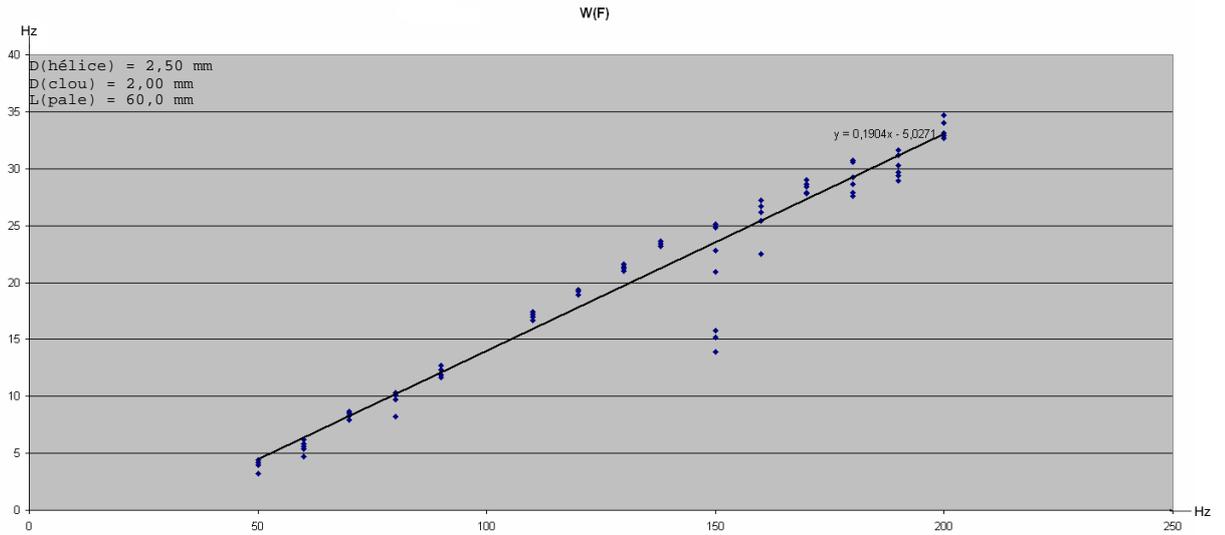
3



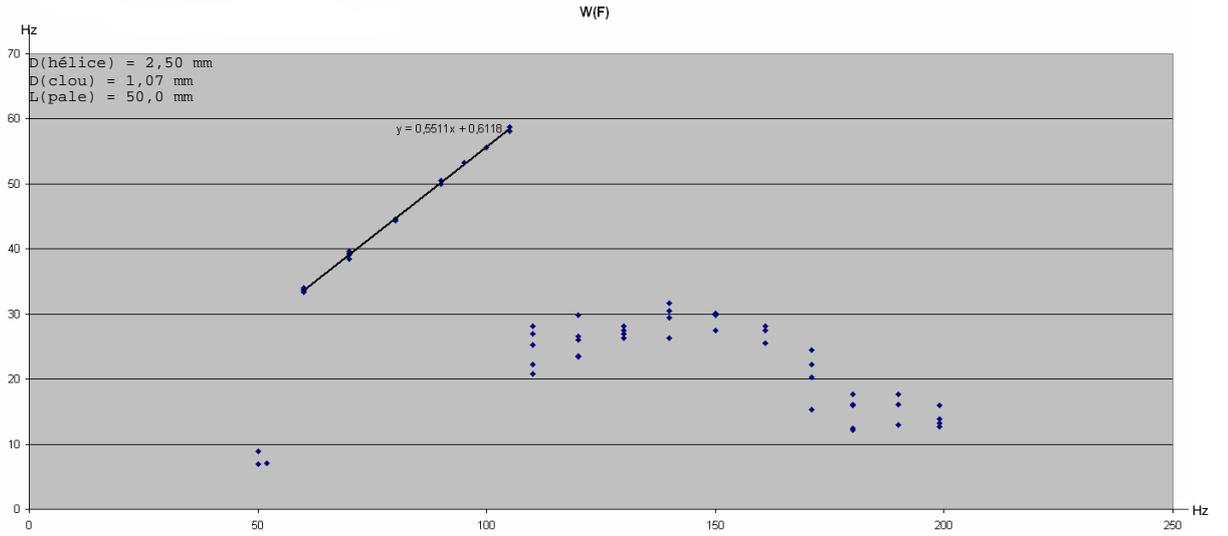
4



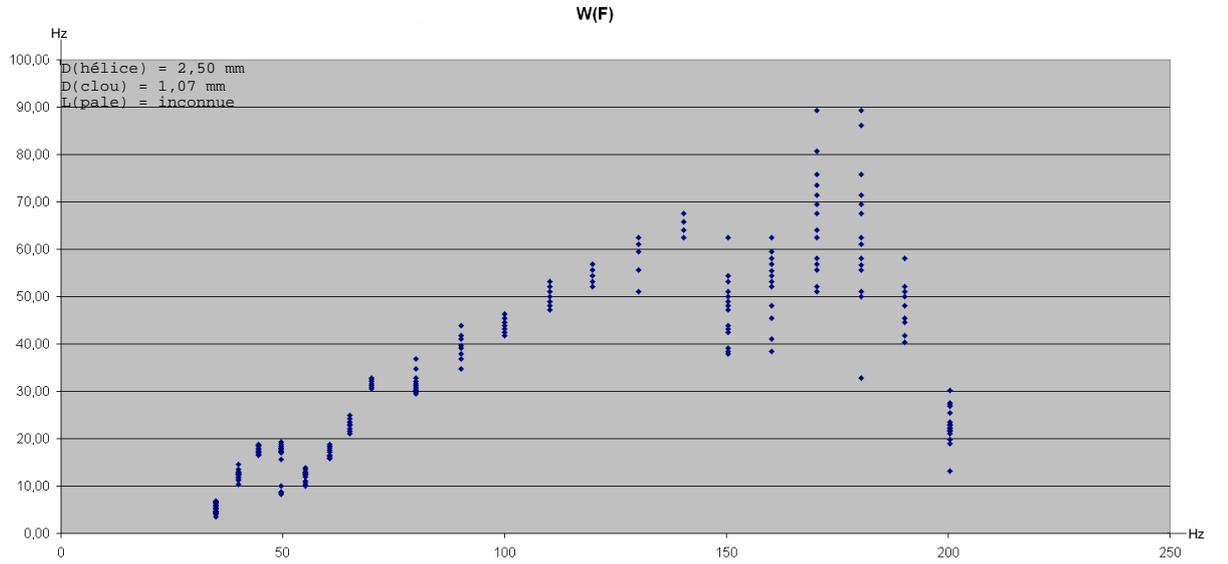
5



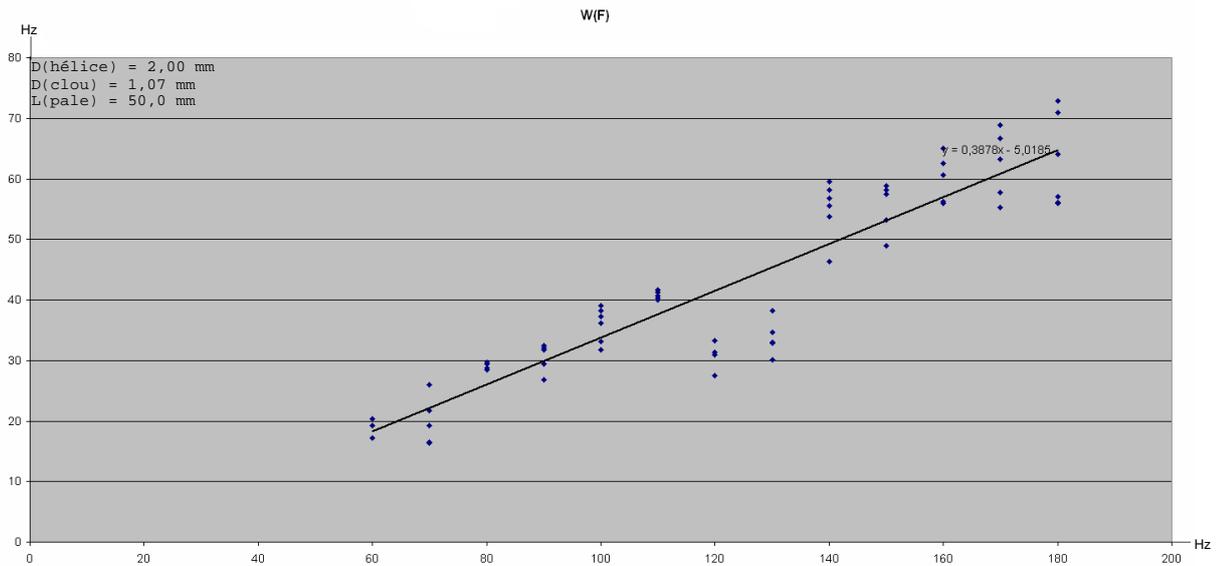
6



7



8



9

