

Thomas LATERRADE

Pierre METGE

Benjamin MOREAU

Romain ZILAHY

M. CABALLERO

XIIème édition des Olympiades de Physique

ATELIER SCIENTIFIQUE
LYCEE SUD DES LANDES

*ETUDE DU PHENOMENE DE
PROPAGATION DES ONDES ET
CONVERSION DE L'ENERGIE DE LA
HOULE EN ENERGIE ELECTRIQUE*

Année Scolaire 2004 / 2005

Résumé du projet

Un petit bassin de houle ainsi qu'un générateur de vagues sont fabriqués dans le but d'étudier la propagation des ondes mécaniques à la surface de l'eau et de récupérer cette énergie sous forme d'électricité, la forme la plus versatile de l'énergie.

Différents systèmes sont testés; nous avons fabriqué nous-mêmes les dispositifs générateurs en utilisant du petit matériel, de récupération en grande partie, ce qui nous permet de nous familiariser avec le phénomène de l'induction électromagnétique. On compare l'efficacité de la transmission de l'énergie ainsi que du générateur dans les différents cas. Un phénomène de résonance est constaté.

Par ailleurs, nous constatons que ponctuellement, différents prototypes de générateurs existent déjà de par le monde, exploitant une infime partie de cette énergie colossale, que ce soit « on-shore » ou « off-shore ».

SOMMAIRE

Composition de l'Equipe.....	4
Préambule.....	5
1.Le bassin.....	8
2.Le générateur de houle.....	9
3.Système de récupération de l'électricité.....	11
1.Le générateur linéaire.....	11
2.L'alternateur de bicyclette.....	17
4.Résultats.....	19
1.Générateur linéaire.....	19
2.Générateur type « dynamo ».....	19
3.Générateur basé sur le « flux coupé ».....	23
4.Calcul des différents rendements.....	24
5.Conclusion.....	25

Composition de l'Equipe

M. CABALLERO

Professeur de Physique / Chimie au Lycée Sud des Landes
de Saint-Vincent de Tyrosse

Thomas LATERRADE

Romain ZILAHY

Pierre METGE

Benjamin MOREAU

Elèves en Terminale S au lycée Sud des Landes

Préambule

La Côte Landaise. Rien que cette expression évoque pour certains le foie gras, les asperges, le tourisme ou que sais-je mais pour la plupart des gens, elle est synonyme de « spot » pour le surf ou pour tout autre activité basée sur la glisse. En effet, notre côte connaît un immense succès chez la population surfeuse pour ses vagues de superbes qualités. D'ailleurs de nombreuses compétitions WTC s'y déroulent chaque année (Rip Curl Pro, Quiksilver Pro France, ...). C'est ainsi que nous est venue l'idée d'étudier ce phénomène et par la même occasion, compléter nos connaissances en ce qui concerne les ondes, leurs caractéristiques ; ceci étant directement lié avec notre programme de physique de Terminale Scientifique.

M. CABALLERO nous a donc apporté toutes les connaissances nécessaires pour comprendre les phénomènes aussi bien dans le domaine, encore inconnu pour nous, de l'induction mécanique, que de la houle.

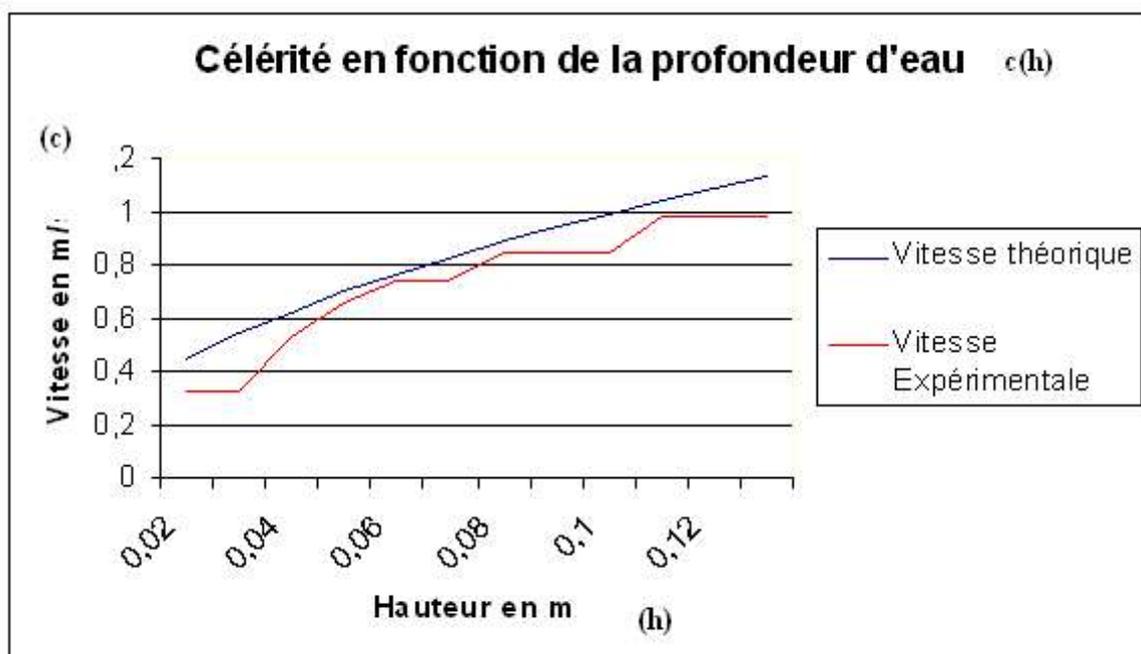
Ce projet a débuté en 2003 et a pu continuer cette année encore grâce à la participation de tous.

Durant notre scolarité de Première Scientifique, nous nous sommes efforcés de tester notre bassin que nous avons eu assez tard dans l'année. Nous avons pris contact avec le matériel (initiation à Synchronie 2003, utilisation de séquences numériques pour étudier ce phénomène, etc...).

Ainsi, nous avons pu rapidement tracer la courbe de la vitesse de la houle en fonction de la hauteur d'eau ; vérifiant par la même occasion la relation suivante valable pour des ondes de longueur d'onde grande devant la profondeur h :

$$c = \sqrt{g \times h} \quad \text{avec } g = 9,81 \text{ SI}$$

Voici les mesures que nous avons réalisées grâce à notre webcam. A l'aide de Synchronie 2003, nous avons relevé les positions occupées par les crêtes de l'onde entre deux images successives. La célérité a été mesurée pour différentes profondeurs h .



avec vitesse théorique = $\sqrt{(g \times h)}$

Après avoir vérifié la capacité du bassin à répondre à nos attentes, nous nous sommes lancés dans la réalisation d'un système de récupération

énergétique. C'est ainsi que nous avons réalisé le premier prototype du générateur linéaire, après un cours théorique sur l'induction électromagnétique.

L'année s'est terminée rapidement et nous avons repris les expériences en Septembre. Le but fixé était de produire une tension significative en améliorant tout d'abord le générateur de houle.

Nous vous proposons donc de découvrir nos travaux, nos remarques, nos déceptions (et oui comme toute expérience scientifique, nous n'avons pas été toujours pleinement satisfaits !).

1.Le bassin

Grâce à un bassin construit par nos soins, nous étudions le phénomène de la houle, identique à celui de l'océan. Il possède une fenêtre de plexiglass qui se situe au niveau du déferlement (au niveau où la vague se casse). Nous attendions du bassin qu'il reproduise avec le plus de fidélité possible les phénomènes océaniques. C'est pour cela que nous avons choisi une très grande longueur, pour avoir plusieurs longueurs d'ondes visibles à la fois (3,30 m) et une très faible largeur (30 cm). Nous l'avons peint de façon à ajouter une petite touche esthétique même si la peinture peut créer de faibles frottements. A son extrémité, le plan incliné permet de supprimer le phénomène de réflexion qui viendrait perturber nos mesures. Nous avons équipé le plan incliné d'un paillason pour le réduire encore plus.



2. Le générateur de houle

En ce qui concerne le générateur de houle, nous avons utilisé au début un moteur d'essuie-glace de camion, fonctionnant sur une tension de 24V. Sur l'axe du moteur, nous avons relié un bras permettant de transformer le mouvement circulaire périodique du moteur en translation périodique. L'extrémité du bras était fixée à un batteur en plexiglas dont la base collée au fond du bassin.

Malheureusement, nous nous sommes vite rendu compte que ce système ne convenait pas du tout à nos attentes à cause de l'irrégularité des mouvements fournis. Nous nous sommes alors contenté de produire des vagues manuellement à la fréquence la plus facile à mettre en œuvre : 1Hertz.

Dès la rentrée 2004, notre projet était bien ciblé, à savoir trouver un système pour rendre la production des vagues plus régulière et ainsi pouvoir régler l'amplitude et la fréquence du mouvement. Notre choix s'est alors tourné vers une perceuse de 500W. Afin d'éviter tout risque d'électrocution nous utilisons un adaptateur de type alternostat capable de transformer le courant électrique délivré par EDF (230V) en tension alternative de valeur efficace ajustable. Ainsi, nous travaillons avec une tension de 50V.



Alternostat

Nous avons donc mis en place un système sur l'axe de la perceuse permettant de transformer la rotation de la perceuse en translation



Système de la perceuse

Comme vous pouvez le voir sur ces photos, nous avons réalisé plusieurs trous à des distances différentes de l'axe pour pouvoir faire varier l'amplitude de la houle. En ce qui concerne la fréquence, il suffira de faire varier la tension d'alimentation de la perceuse grâce à l'alternostat.



Système une fois fixé à l'extrémité du bassin

3. Système de récupération de l'électricité

1. Le générateur linéaire

Nous avons installé un prototype permettant la production d'électricité grâce à l'induction électromagnétique.

Pour ceci, nous utilisons une bobine (photo 1). Nous avons récupéré un aimant d'un agitateur magnétique (photo 2) lequel nous avons monté sur un flotteur (photo 3).

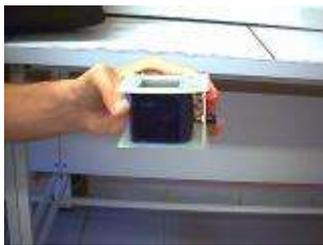


Photo 1



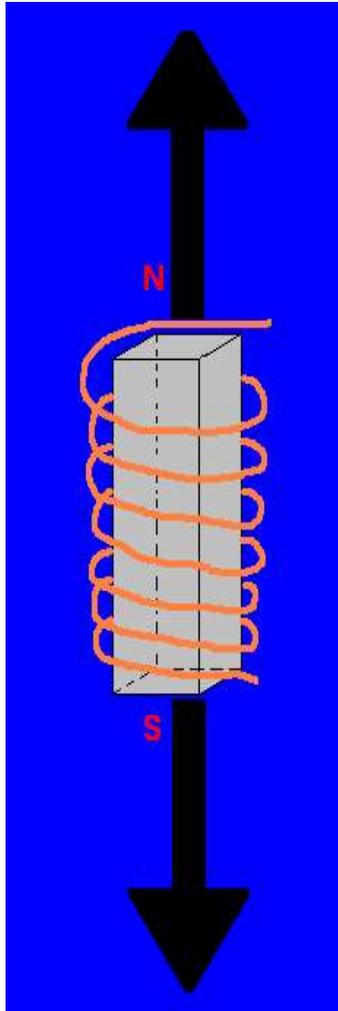
Photo 2



Photo 3

Ainsi, par la translation périodique de l'aimant au sein de la bobine fixe, nous avons réussi à détecter une faible tension. Par contre, notre souci majeur a été le « bruit » puisque tous les appareils fonctionnant sur le secteur émettent des ondes de 50 Hertz qui sont venues fausser nos résultats (ordinateur, perceuse, néons, ...).

D'un point de vue purement théorique, nous pouvons schématiser le générateur linéaire de cette façon :



Schématisation du système aimant / bobine

La tension recueillie étant faible, pour l'étudier il était commode d'utiliser une acquisition assistée par ordinateur : une carte SYSAM-PCI avec un boîtier interface BORA le tout commandé par le logiciel SYNCHRONIE 2003.

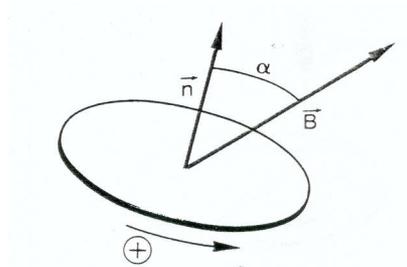
Nous avons aussi utilisé le champ radial produit par un aimant de haut-parleur, associé éventuellement à un aimant droit situé dans l'axe de symétrie du système. La tension recueillie est plus importante.

Pour mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans ce générateur, il est judicieux de faire un petit point de théorie sur l'induction électromagnétique.

La force électromotrice est due :

- soit à la variation du champ magnétique au voisinage du circuit induit;
- soit à une modification de la surface du circuit induit;
- soit à une modification de son orientation dans le champ magnétique inducteur.

Or on sait qu'il existe une grandeur liée à la fois au champ magnétique, à la surface d'un circuit et à son orientation : le flux du champ magnétique est défini pour un circuit plan par :



$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = \|\vec{B}\| \times \|\vec{S}\| \times \cos(\vec{B}, \vec{n})$$

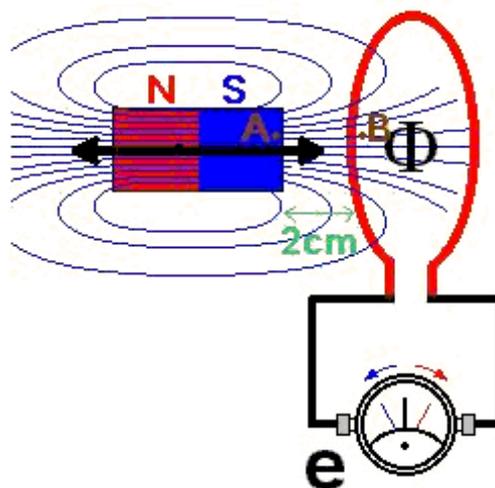
Il y a apparition d'une tension induite chaque fois que le flux magnétique inducteur à travers le circuit induit varie.

La force électromotrice d'induction est à chaque instant égale à l'opposé de la variation du flux inducteur par unité de temps :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

La tension induite dépend donc de la vitesse de variation du flux magnétique à travers le circuit et sera donc proportionnelle à la fréquence du mouvement de l'aimant

On vient de voir l'équation générale du flux du champ magnétique.
Appliquons le maintenant à notre situation comme le décrit le schéma suivant :



Calcul **approché** pour une spire circulaire de rayon 1cm et pour un aimant droit en ticonal :

$$\vec{B} \cdot \vec{S} = \|\vec{B}\| \times \|\vec{S}\| = 0,1 \cdot \Pi \cdot (10^{-2})^2 \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ Wb}$$

$$A: \|\vec{B}\| = 0,1 \text{ T à } 1 \text{ cm du pôle}$$

$$B: \|\vec{B}\| = 0,01 \text{ T à } 2 \text{ cm du pôle}$$

Entre deux positions extrêmes A et B correspondant à une demi-période du cycle

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \approx \frac{\Phi_A - \Phi_B}{t_B - t_A} = 3 \times 10^{-4} \times \frac{10^{-1} - 10^{-2}}{T/2}$$

$$e = f \times (2 \cdot 10^{-1}) \times 3 \cdot 10^{-4}$$

$$e \simeq 6 \times 10^{-5} \times f \quad \text{avec} \quad f = 2 \text{ Hz}$$

$$\text{on a} \quad e \simeq 0.1 \text{ mV}$$

Comme vous pouvez le constater, nous ne sommes pas encore en mesure de remplacer les centrales nucléaires de EDF ! Mais bon, c'est déjà un bon début

Notre bobine comportant environ 50 spires, la f.e.m. devient proche de 5 mV maximum (les spires ne « voyant » pas toutes la même valeur du champ magnétique)

Conclusion :

Nous ne vous cacherons pas que devant la faible tension produite et devant tenir compte des « bruits », nous avons été quelque peu déçus et nous avons décidé d'expérimenter un autre générateur basé sur une autre technologie.

Toutefois, le générateur linéaire peut se révéler un moyen efficace de produire de l'énergie si l'on rajoute le phénomène de résonance.

2. L'alternateur de bicyclette

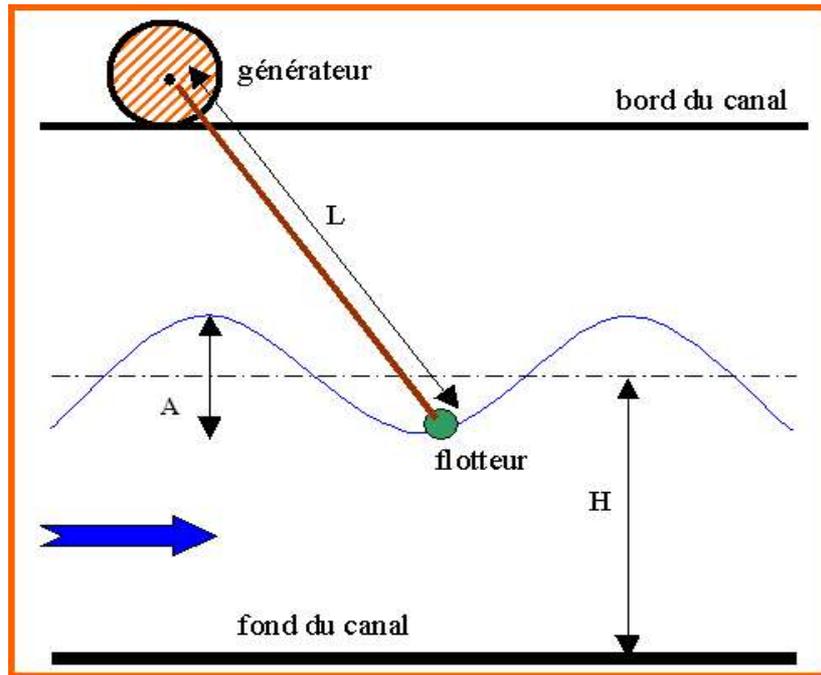
Ce dispositif est composé de :

- Un flotteur en polystyrène ;
- Une tige cylindrique de 30 cm légère et résistante ;
- Une « dynamo » (alternateur).

Le flotteur, relié à l'arbre du générateur par l'intermédiaire de la tige cylindrique, suit les mouvements de la houle, ce qui crée un bras de levier en entrée de générateur. De même que pour le générateur linéaire, nous utilisons SYNCHRONIE 2003.

Le sens de rotation de la dynamo change périodiquement à la fréquence de l'onde.

Nous pouvons donc schématiser notre montage de la façon suivante :



Les premiers résultats que nous avons obtenus sont au-delà de toutes nos espérances. Nous atteignons ainsi une tension significative qui va nous permettre de les exploiter pleinement.

Nous décidons de coupler plusieurs dynamos en série et en dérivation.

4. Résultats

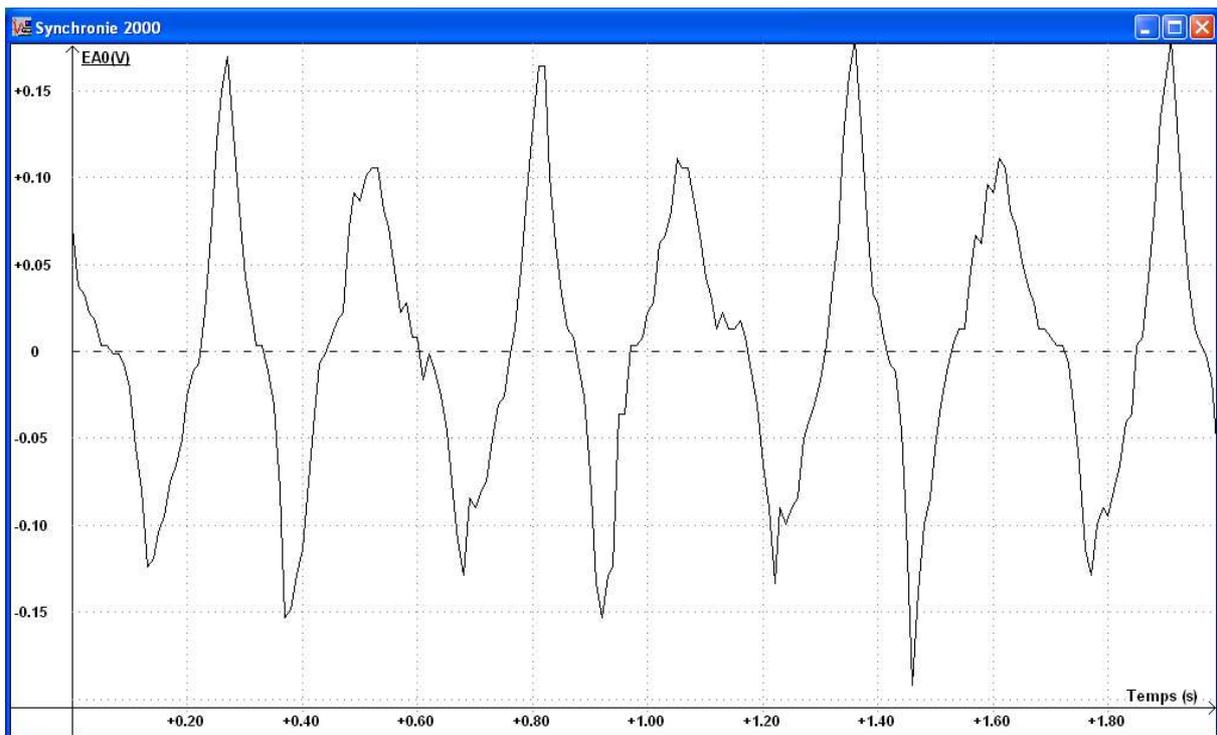
1. Générateur linéaire

Dans les meilleures circonstances, on enregistre un signal d'environ 0,5 V de crête à crête.

Améliorations possibles : aimant plus puissant (néodyme), flotteur et bobine sur-dimensionnés.

2. Générateur type « dynamo »

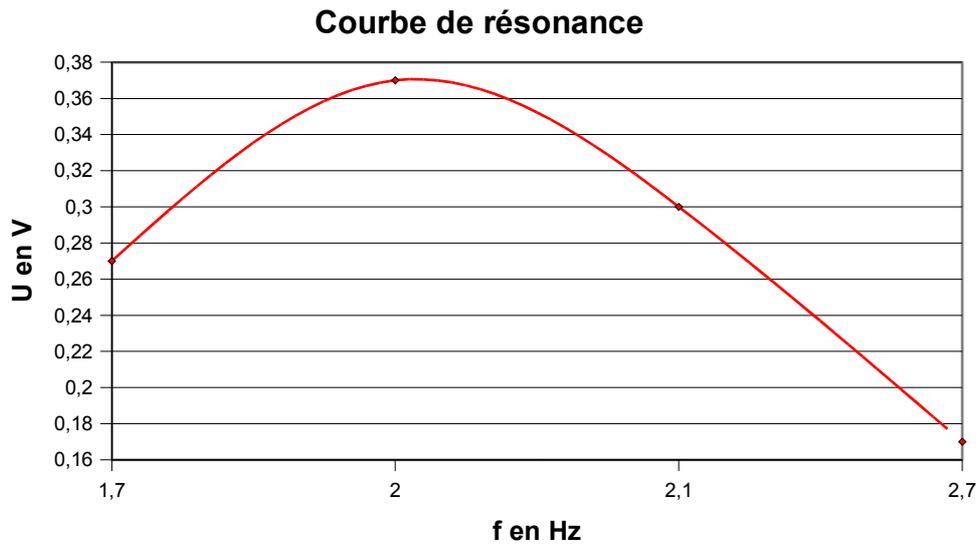
Ce système a produit des tensions significatives que nous avons pu exploiter. Voici donc nos recherches.



Voici un exemple de résultats que nous avons obtenus. On peut détecter sur ce graphe deux fréquences : une due aux nombres de paires de pôles de l'alternateur et à sa vitesse de rotation et l'autre à la fréquence de l'onde.

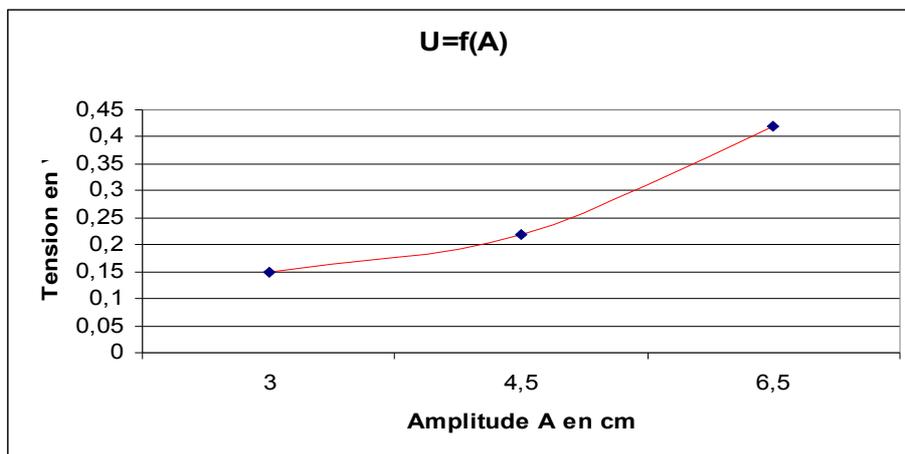
La mesure de l'amplitude donne 0,15 V ce qui est largement supérieur à celle obtenue avec le générateur linéaire de 50 spires : l'alternateur est plus efficace.

Ensuite, nous avons tracé la courbe de résonance. Elle met en évidence la fréquence propre du système : 2 Hz.



La fréquence propre du flotteur dépend des effets combinés de son Poids et de la poussée d'Archimède qui s'exerce sur lui.

Nous avons également tracé l'amplitude de la tension en fonction de l'amplitude de l'onde (ou plus exactement A correspond à la distance entre l'axe de rotation de la perceuse et l'excentrique).



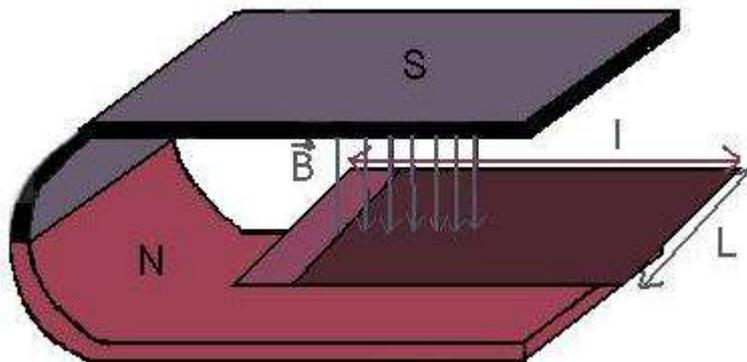
Courbe tracée à la fréquence : $f = 2,0$ Hz

Quand A augmente, l'énergie transmise dans l'onde augmente, l'amplitude et la vitesse d'oscillation du flotteur augmentent. Il n'a pas été possible de tester des valeurs d'amplitude supérieures à 6,5 cm.

Conclusion

Grâce à l'alternateur, nous obtenons des tensions beaucoup plus importantes qu'avec le générateur linéaire. Ainsi, le système est capable d'éclairer une Diode ElectroLuminescente (DEL).

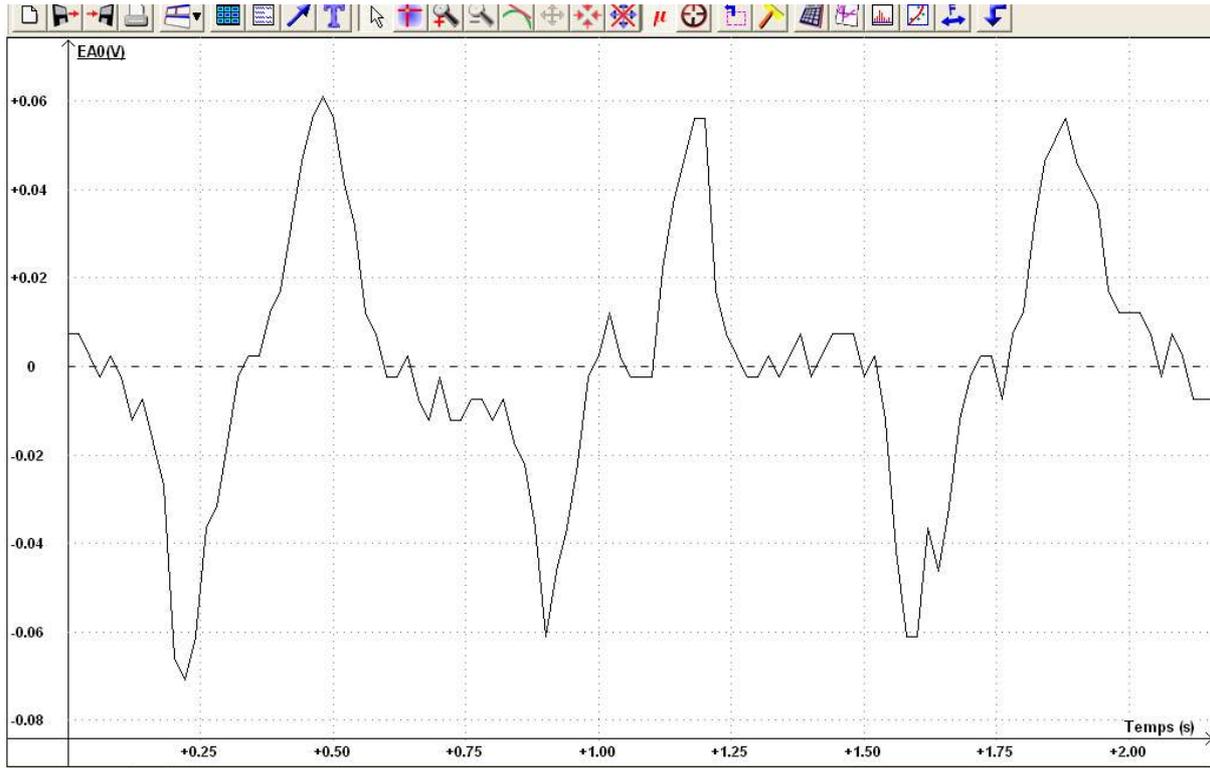
3. Générateur basé sur le « flux coupé »



_____ direction des oscillations

Bobine montée sur cadre rectangulaire solidaire du flotteur

L'aimant est fixe



Conclusion :

La tension crête à crête est de l'ordre de grandeur de celle du générateur linéaire.

4. Calcul des différents rendements

- Puissance débitée par la perceuse (en charge) : $P_1 \approx 5 \text{ W}$
- Puissance véhiculée par l'onde (\approx sinusoïdale) ou flux d'énergie : φ

C'est la quantité d'énergie transportée par unité de temps.

$$\varphi = \frac{1}{8} \times \rho_0 \times g \times A^2 \times l \times v \quad \text{avec } \rho_0 = 10^3 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$$

avec ρ_0 masse volumique du fluide

g l'intensité de la pesanteur

A amplitude crête à crête de l'onde supposée sinusoïdale

l largeur du front d'onde (c'est-à-dire du bassin)

v la célérité de l'onde

Dans notre cas, $v = 0,84 \text{ m/s}$ quand $H = 10 \text{ cm}$
et une amplitude A de 5 cm

Application Numérique :

$$l = 0,26 \text{ m} \quad A = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$\varphi \approx \frac{1}{8} \cdot 10^4 \cdot 5^2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,26 \cdot 0,84$$

$$\varphi \approx 6,8 \cdot 10^{-1} \text{ W}$$

$$\varphi \approx 0,7 \text{ W}$$

d'où le rendement du générateur de vagues :

$$r_1 = \frac{\varphi}{P_1} \approx 14 \%$$

- Puissance électrique recueillie:

Comme charge, on utilise un conducteur ohmique de valeur $R = 50 \Omega$ aux bornes de notre générateur.

$$P_2 = \overline{(u \cdot i)} = \overline{(R \cdot i^2)} = R \overline{(i^2)} = \left(\frac{\overline{u^2}}{R} \right)$$

A partir de $u(t)$ obtenue à l'acquisition, la dernière égalité nous permet de calculer P_2

Par exemple, on a obtenu $\overline{u^2} = 0,3 \text{ V}$ avec l'alternateur

$$P_2 = \frac{0,3}{50} = 6 \text{ mW}$$

d'où le rendement de notre système générateur

$$r_2 = \frac{P_2}{\varphi} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,7} \approx 0,9 \%$$

5.Conclusion

Pour un coût modique et un encombrement réduit, l'alternateur classique semble le plus efficace (champ magnétique renforcé par noyau de fer doux) , 4

paires de pôles. Reste à optimiser la transmission mécanique entre le flotteur et cet alternateur, que nous avons choisi fixe, alors que dans les essais grandeur nature, dans les stations « off-shore », l'alternateur est toujours solidaire d'une bouée « canard de Slater » ou radeau flottant « Pelamis ».

LES DIFFERENTS PROJETS A L'HEURE ACTUELLE



Orecon, une société partenaire de l'Université de Plymouth, travaille sur le projet d'une centrale qui utilise le concept de multiples colonnes d'eau (multiple oscillating water column, MOWC) pour produire de l'énergie. Après avoir fait des essais avec des modèles réduits, Orecon travaille maintenant sur un projet à échelle réelle ayant une capacité de production de 1MW par unité pour démontrer la rentabilité commerciale des MOWC. Cette unité devrait être construite sur la côte anglaise et pourrait fournir de l'énergie d'ici 2005-2006, et une vingtaine d'autres unités devraient voir le jour d'ici 2010.

Le principe est basé sur une colonne d'eau oscillante sans fond dans laquelle les vagues s'engouffrent par le bas, emprisonnant l'air qui s'échappe vers le haut en actionnant une turbine. C'est le principe bien connu des siphons des calanques de Cassis. Pour être efficaces, ces colonnes d'eau doivent s'adapter aux différentes fréquences des vagues et utiliser l'énergie de ressac.



Le Wavebob, de la société **ClearPower Technology Ltd** repose sur le mouvement d'une bouée sous l'effet des vagues. Ce convertisseur d'énergie des vagues est développé dans le cadre du programme européen Eureka WWEC.



La firme **Interproject Service** présente sont "OWEC Buoy", qui fournit de l'énergie par compression verticale de deux pistons. Un peu comme le Pelamis (voir plus haut), qui lui fonctionne horizontalement en surface.