

« Et elle réconcilia anticyclone et cyclone »



Arthur Bonastre
Romain Ducret
Guillaume Gonnet
Gauthier Michoud

Elèves de Terminale S
Lycée Rosa Parks
Neuville/Saône

Contenu

1. Résumé.....	3
2. Remerciements.....	4
3. Introduction	4
4. Qu'est-ce que la force de Coriolis ?	4
a) Qui est Coriolis ?.....	4
b) Expression mathématique de l'accélération de Coriolis	4
c) Relation entre accélération de Coriolis et force de Coriolis	5
2. La loi de Buys-Ballot	5
3. Expériences sur la maquette de simulation	6
a) Description de la maquette (voir annexe).....	6
b) Etude de la trajectoire d'une balle dans le référentiel disque tournant.....	7
c) Etude de la forme d'un jet d'eau soumis à l'action de la force de Coriolis.....	8
d) Comprendre la loi de Buys-Ballot	8
4. Mesures effectuées à l'aide d'accéléromètres	9
a) Description du dispositif mécanique	9
b) Description du système de télémessure	11
c) Mesure des vitesses de rotation.....	12
i. Mesure de la vitesse de rotation du support :	12
ii. Mesure de la vitesse de rotation de la tige	12
iii. Echelle des temps	12
d) Mesures- comparaison avec les valeurs théoriques	12
5. Tourbillons observés en météorologie	17
6. Conclusion	17
7. Annexes	18
a) Programme Aquisitor	18
b) Construction de la maquette munie d'un bassin tournant.....	22
c) Construction de la maquette munie d'une tige tournante	24
d) La tempête Xynthia 28/02/2010.....	25

1. Résumé

Nous avons voulu étudier la force de Coriolis responsable de la forme particulière des tourbillons nuageux observés sur les images satellites fournies par Météo France par exemple.

Pour cela nous avons construit deux maquettes , l'une comportant un récipient creux de 80 cm de diamètre et d'une caméra, qui permet de visualiser les effets de cette force sur des objets et sur de l'eau en mouvement sans pouvoir effectuer de mesures précises, l'autre maquette munie d'un accéléromètre trois axes qui permet de mesurer l'intensité de l'accélération de Coriolis que subit un point qui circule sur un cercle vertical animé d'un mouvement de rotation dans le plan horizontal, un peu comme un point qui se déplace sur un méridien terrestre. Finalement cette étude nous a permis de mieux comprendre la loi de Buys-Ballot qui justement régit le mouvement des masses d'air de l'atmosphère.

2. Remerciements

Nous remercions Monsieur Philippe Odier du laboratoire de physique de l'ENS Lyon qui nous a permis de faire des expériences sur la table tournante de son laboratoire et qui nous a donné l'idée d'en construire une, Monsieur Olivier Tillement du laboratoire ILM de l'université Lyon1 qui nous a accueillis dans son laboratoire pour que l'on présente nos expériences au public lors de la fête de la science, madame Dugourgeot proviseur du lycée Rosa Parks qui nous prête toute l'année une salle pour l'atelier scientifique et Monsieur Jouve notre professeur de physique qui nous a guidé pour réaliser ce projet. Nous remercions également le rectorat de Lyon pour les crédits qu'il alloue à l'atelier scientifique du lycée, ainsi que le comité national des Olympiades de physique qui donne une subvention à chaque groupe participant.

3. Introduction

On dit souvent que la force de Coriolis est responsable de la forme des cyclones et que le tourbillon qui se produit lors de l'écoulement de l'eau dans un lavabo a un sens différent selon l'hémisphère dans lequel il se trouve.

On explique habituellement que cette force n'existe pas réellement car elle n'est pas due à une des quatre interactions fondamentales : gravitationnelle, électromagnétique, interaction faible et interaction forte, c'est une force due au mouvement. Mais comment se fait-il qu'on puisse en observer ses effets ?

Nous avons voulu en savoir un peu plus sur cette mystérieuse force.

4. Qu'est-ce que la force de Coriolis ?

a) Qui est Coriolis ?

Gustave Gaspard de Coriolis est né à Paris en 1792 et est mort à Paris en 1843. C'est un mathématicien et ingénieur français qui a donné son nom à l'accélération de Coriolis et à la force de Coriolis affectant le mouvement des corps dans un milieu en rotation.

Il est connu pour la force de Coriolis qui correspond à une loi de la cinématique : " Toute particule en mouvement dans l'hémisphère nord est déviée vers sa droite (vers sa gauche dans l'hémisphère sud) " Il a en outre travaillé sur la notion d'énergie en mécanique.

b) Expression mathématique de l'accélération de Coriolis

La théorie cinématique permet d'établir l'expression des accélérations qui apparaissent lorsqu'on se place dans un référentiel non Galiléen.

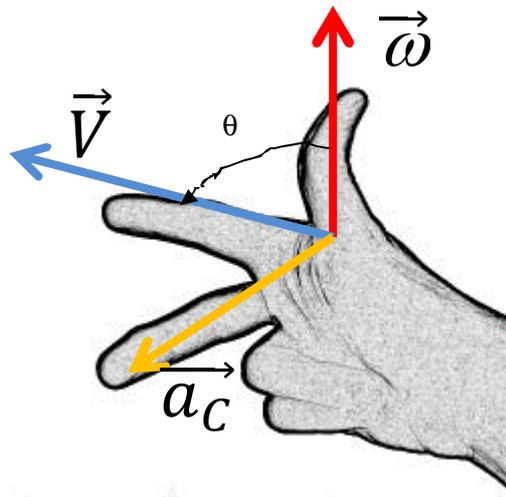
Lorsqu'un point est animé d'une vitesse \vec{v} dans un référentiel lui-même animé d'un mouvement de rotation caractérisé par le vecteur vitesse angulaire $\vec{\omega}$ alors ce point est soumis à une accélération appelée accélération de Coriolis.

La formule mathématique est :

$$\vec{a}_C = 2\vec{\omega} \wedge \vec{v} \text{ Nommé produit vectoriel des deux vecteurs } \vec{\omega} \text{ et } \vec{v}.$$

Elle signifie que le vecteur accélération est orthogonal au vecteur $\vec{\omega}$ et au vecteur vitesse \vec{v} donc au plan défini par $\vec{\omega}$ et \vec{v} .

Pour trouver le sens de l'accélération de Coriolis, il suffit d'utiliser la règle des trois doigts de la main droite. Le pouce donne le sens et la direction du vecteur rotation, l'index donne le sens et la direction de la vitesse et le majeur donne le sens et la direction de l'accélération de Coriolis.



Si θ est l'angle entre deux vecteurs $\vec{\omega}$ et \vec{v} alors le module de $a_C = 2 \omega v \sin(\theta)$

c) Relation entre accélération de Coriolis et force de Coriolis

La force de Coriolis est une force d'inertie qui est due au changement de référentiel. Les traités de mécanique indiquent que si un corps de masse m se déplace avec une vitesse \vec{v} dans un référentiel animé d'une vitesse de rotation $\vec{\omega}$ alors le point matériel est soumis à différentes forces d'inertie dont la force de coriolis

$$\vec{F}_C = -m\vec{a}_C \text{ où}$$

\vec{F}_C est la force de Coriolis

\vec{a}_C est l'accélération de Coriolis

m la masse du corps soumis à l'accélération de Coriolis

Le signe négatif montre que la force de Coriolis est dans le sens opposé à l'accélération de Coriolis. Cela est très surprenant car la seconde loi de Newton encore appelée principe fondamental de la dynamique stipule que, dans un référentiel Galiléen, si un système de masse m possède une accélération \vec{a} alors il est soumis à une force qui vérifie $\vec{F} = m \vec{a}$.

La masse étant positive, la force a même sens et direction que l'accélération. Ce n'est apparemment pas le cas pour les forces d'inertie.

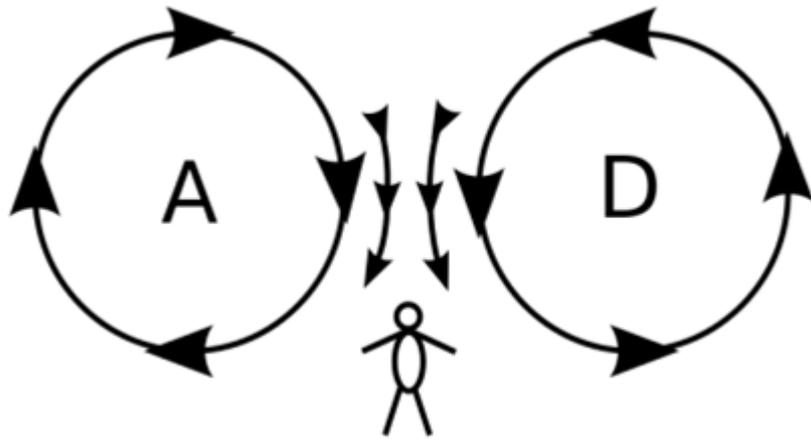
Cela provient de l'application de la seconde loi de Newton sur un point matériel de masse m dans le référentiel non Galiléen.

2. La loi de Buys-Ballot

La loi de Buys-Ballot affirme qu'un observateur situé dans l'hémisphère nord qui se place dos au vent aura la dépression à sa gauche et l'anticyclone à sa droite. Et inversement dans l'hémisphère sud.

Cette loi fut utile surtout pour les navigateurs que ce soit à voile ou à vapeur, dans le but d'éviter les tempêtes et d'utiliser au mieux les vents.

Grâce à cette règle il est possible d'anticiper l'approche de cyclones tropicaux intenses et d'avoir la possibilité de les éviter. Jusqu'à l'avènement de la radio, c'était souvent, avec l'observation des nuages, la seule façon sûre pour un capitaine de prévoir le temps en mer.



3. Expériences sur la maquette de simulation

a) Description de la maquette (voir annexe)

Nous avons conçu une maquette permettant de visualiser les effets de la force de Coriolis en nous plaçant dans un référentiel en mouvement de rotation. En effet elle est constituée d'un récipient creux mis en rotation par un moteur de vélo électrique. Ce moteur est alimenté par un hacheur. (V annexe) Nous avons monté, au-dessus du bassin, un portique en aluminium qui nous permet de fixer une caméra et qui sera notre observateur lié à la maquette. Cette caméra est une caméra de sport Sony HDRAS20 muni d'un stabilisateur d'image.



Cette caméra possède une liaison wifi qui permet de visualiser les images en direct sur une tablette ou un smartphone grâce au logiciel « Play Mémoire Mobile » de Sony. On enregistre les séquences sur une carte microSD située dans la caméra. On étudie ces vidéos avec le logiciel Latis pro après conversion. Elle peut prendre jusqu'à 120 images par seconde.



Un module de commande de la vitesse de rotation permet de régler cette dernière.

Une fourche optique placée de part et d'autre du bord percé de trous délivre une tension en forme de créneau (v figure-ci-contre). Cette tension est transformée en une tension proportionnelle à la fréquence, donc à la vitesse de rotation avec un convertisseur fréquence-tension.

La tension proportionnelle à la vitesse est appliquée sur l'entrée A0 d'une carte arduino UNO.

Un programme téléversé dans la carte permet de régler la vitesse de rotation du plateau. La régulation est de type PID.



Il comporte une batterie de 12 V qui fournit l'énergie au moteur et au capteur

b) Etude de la trajectoire d'une balle dans le référentiel disque tournant

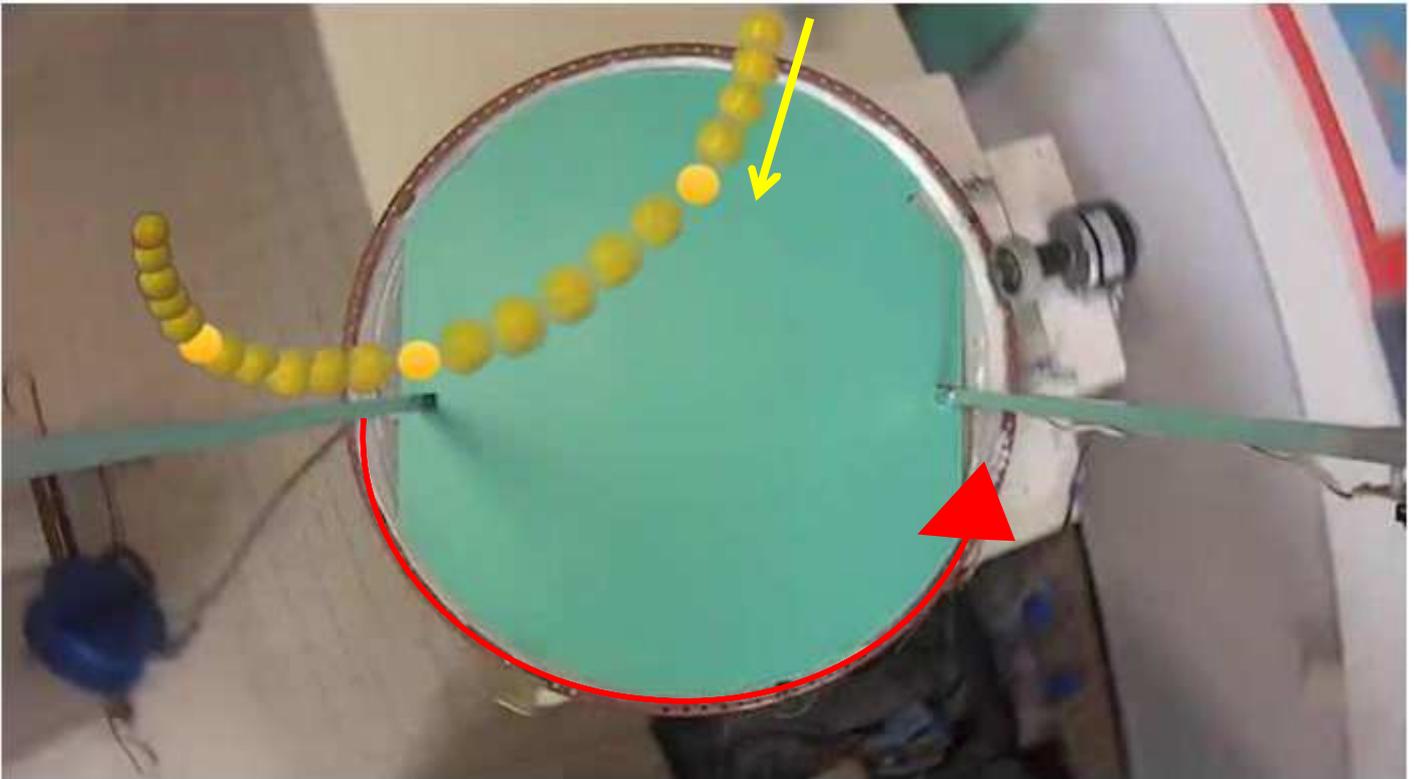
On lance une balle au-dessus du disque tournant selon un mouvement parabolique à peu près situé selon un diamètre. Lorsqu'on observe la trajectoire de cette balle à l'aide de la caméra, on constate que la balle décrit un mouvement curviligne dirigé vers la droite.

Pour l'observateur lié au disque tournant, la balle se comporte comme si elle est soumise à une force dirigée orthogonalement au plan de la parabole.

Images extraites d'un film pris à 120 images/s

L'image suivante est une composition de 19 images extraites d'une vidéo prise avec la caméra. Nous avons fait ce montage grâce à un logiciel type Photoshop (Pixelmator sous Mac OS). L'image n°1 est représentée entièrement, alors que seules les balles des autres images sont représentées ici. Pour cela, nous avons fait une sélection autour de la balle, et supprimé l'arrière-plan.

Malheureusement, la camera ne prend pas des images de manière régulière, il manque donc environ une image sur 5, que nous avons interpolé. Elles sont représentés en jaune five.



Sa trajectoire est déviée dans le sens du mouvement de rotation.

Explication :

L'accélération de Coriolis est donnée par la règle du produit vectoriel.

Le vecteur vitesse angulaire $\vec{\omega}$ est dirigé vers nous le sens de rotation est le sens trigonométrique.

La vitesse initiale \vec{v} est dirigée selon un diamètre du disque vers l'intérieur. L'accélération de Coriolis est

donc dirigée vers la droite de l'image. La force de Coriolis est donnée par $\vec{F}_C = -m \cdot \vec{a}_C$ et est donc dirigée vers la gauche de l'image donc dans le sens du mouvement.

Cela montre bien que cette force de Coriolis n'est pas une vraie force, car pour les observateurs situés autour du disque tournant la balle n'est soumise qu'à son poids et possède un mouvement de chute libre parabolique.

c) Etude de la forme d'un jet d'eau soumis à l'action de la force de Coriolis

Notre maquette comporte une petite pompe. On peut réaliser un petit jet d'eau, dirigé selon un diamètre du disque lorsque celui-ci est à l'arrêt. Lorsque le disque tourne, on constate que le jet d'eau est dévié vers l'avant du mouvement, Une analyse analogue à la précédente montre que la force de Coriolis est aussi dirigée vers l'avant du mouvement de rotation (image retouchée à cause du manque de contraste).



d) Comprendre la loi de Buys-Ballot

Lorsqu'on observe les cartes météorologiques de la tempête Cynthia on constate que la direction des vents est bien parallèle aux lignes isobares. Il y a même un renforcement des vents dans cette direction. (voir annexe)

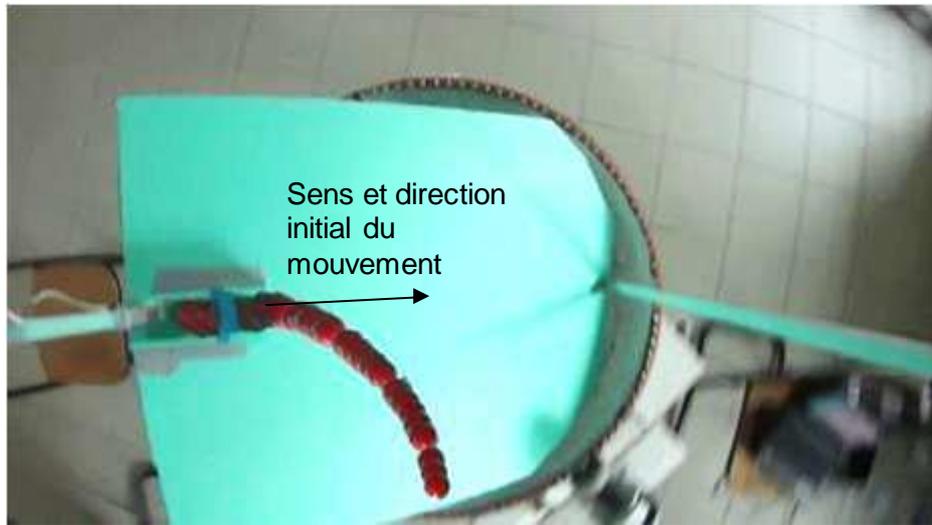
Normalement l'air présent dans une zone de haute pression devrait aller vers la zone de basse pression directement.

Nous avons réalisé une expérience pour essayer de comprendre le rôle de la force de Coriolis dans ce comportement.

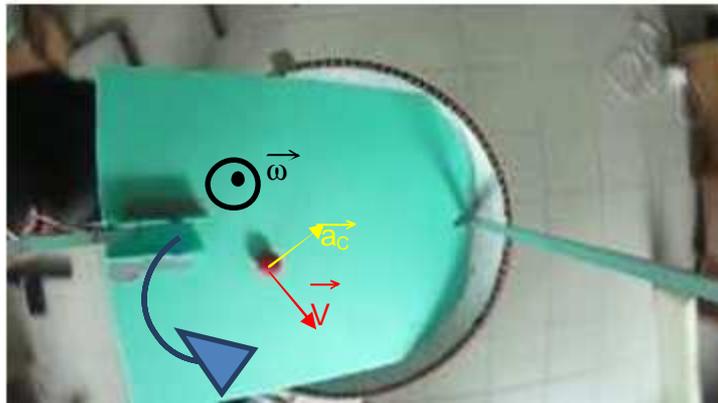
Nous formons un plan incliné l'aide d'une plaque de polystyrène expansé fine.

Lorsque la maquette ne tourne pas, la petite balle de ping pong placée initialement sur le bord surélevé descend selon une ligne droite et heurte le second montant du portique.

Lorsque la maquette tourne, on constate que la balle ne suit plus la ligne droite, mais est déviée dans le sens de la rotation (flèche bleue). Les photos ont été extraites (1 sur cinq)) d'un film à 60 images par seconde, et le montage utilise la même méthode que la précédente



La trajectoire de la balle devient parallèle aux lignes d'égale altitude.



En utilisant la même méthode que précédemment, on montre que l'accélération de Coriolis est dirigée comme l'indique la figure ci-dessus. La force de Coriolis est donc dirigée selon le sens opposé à \vec{a}_c . Elle reste orthogonale à la vitesse et donc incurve la trajectoire de la balle dans les sens du mouvement de rotation. La balle se trouve dans des conditions analogues aux molécules d'air soumise à l'action des forces de pression. Leur mouvement ne se fait pas selon des lignes orthogonales aux isobares, mais au contraire parallèles à ces isobares à cause de la force de Coriolis.

4. Mesures effectuées à l'aide d'accéléromètres

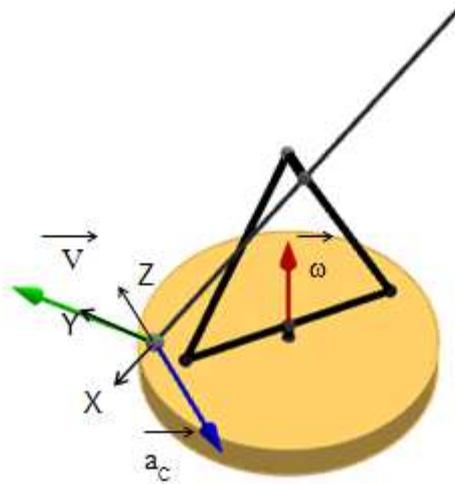
a) Description du dispositif mécanique

Nous avons réalisé cette deuxième maquette pour mesurer l'accélération de Coriolis. Pour cela nous avons mis en rotation un support en bois sur lequel nous avons fixé une potence en aluminium. Le tout est fixé sur un bâti solide.

Le support en bois est relié à un motoréducteur électrique piloté par le shield moteur d'une carte Arduino et tourne autour d'un axe vertical situé en son centre.

Un autre motoréducteur est attaché en sommet de la potence en aluminium et fait tourner une tige orthogonalement par rapport à la 1ère. La tige a une longueur de 1 m, l'axe de rotation est au centre.

Ce moteur est piloté par une autre carte Arduino et son shield « commande de moteur » fixés sur le support en bois. La vitesse de la tige est réglable depuis l'ordinateur via une communication sans fil utilisant un module XBeenoté XBee 2.



Ce dispositif permet d'obtenir un référentiel animé d'un mouvement de rotation dans lequel un objet possède une vitesse relative non nulle.

Au bout de la tige est fixé un accéléromètre mesurant les accélérations sur les trois axes.

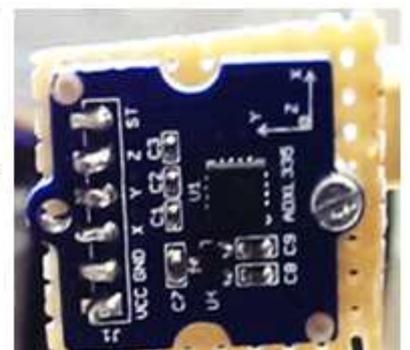
Les trois axes de l'accéléromètre sont disposés de la manière suivante :

Y selon la perpendiculaire à la tige, et tangent au mouvement de rotation de la tige, dirigé dans le sens de rotation

X selon la tige dirigé à l'opposé de l'axe de rotation.

Z selon la direction orthogonale au plan de rotation de la tige.

On peut considérer que l'axe vertical représente l'axe de rotation de la Terre



et que l'extrémité de la tige décrit un parcours selon un méridien du globe terrestre.

L'accélération de Coriolis \vec{a}_C sera perpendiculaire au plan de rotation de la tige donc dirigée selon l'axe Z de l'accéléromètre.

Elle sera alternativement dans le sens de Z et dans le sens opposé à Z.

b) Description du système de télémessure

Il est impossible de relier l'accéléromètre avec des fils à un système de mesure, aussi nous avons utilisé une télémessure. Ce système comporte, fixés sur la tige tournante, une carte Arduino Leonardo DFrobot sur laquelle est inséré un module XBee Pro S1 avec antenne intégrée.

Ce module XBee transforme le port série filaire de l'Arduino en port de radiofréquence en exploitant le protocole IEEE 802.15.4. L'onde émise a pour fréquence 2,4 GHz.

L'énergie est fournie par une pile de 9 V fixée sur la tige.

Sur l'ordinateur du laboratoire est branché sur le port USB, un autre module XBee identique au précédent.

On utilise un logiciel d'acquisition que nous avons nommé **Acquisitor**, entièrement créé par nous et surtout par Guillaume (v Annexe) en langage Javascript et html, puis compilé en Windows, pour enregistrer les données de l'accéléromètre à distance : l'Arduino convertit les données initialement analogiques de l'accéléromètre en données numériques pour les envoyer ensuite par XBee à l'ordinateur. Ce dernier les enregistre alors à intervalles de temps réguliers.

A la fin de l'acquisition on obtient ainsi un graphique contenant les différentes valeurs mesurées. On enregistre ces données en un fichier type texte avec l'extension.csv.

L'interface graphique du logiciel Aquisitor comporte plusieurs onglets :

L'onglet « communication » dans lequel on gère les ports série reliés respectivement à l'Arduino de pilotage de vitesse de rotation du support et le module XBee communiquant avec l'accéléromètre.

L'onglet « vitesse » dans lequel on règle les vitesses de rotation du support et de la tige

L'onglet « acquisition » dans lequel les trois courbes représentant les accélérations selon les trois axes sont représentées au cours du temps.



Le module XBee relié à l'ordinateur communique avec le XBee1 (qui pilote le motoréducteur 1 et mesure la vitesse de rotation du support) et avec XBee2 qui envoie les valeurs binaires des accélérations.

Nous avons codé les données pour éviter que le logiciel ne les confonde, chaque donnée commence par une lettre représentant le type de la donnée et se termine par un point-virgule (par exemple "p23;" est la donnée commandant la vitesse du plateau).

Deux autres onglets sont disponibles : visualisation en direct des données et analyse des données.

Dans l'onglet visualisation directe trois courbes affichent :

La courbe donnant l'accélération selon X en fonction du temps

La courbe donnant l'accélération selon Y en fonction du temps

La courbe donnant l'accélération selon Z en fonction du temps.

Les trois accélérations sont exprimées en g (c'est dans cette unité que l'accéléromètre donne les mesures) Ces trois courbes donnent les valeurs mesurées instantanément par l'accéléromètre et envoyées par le Xbee 2. L'affichage s'effectue en temps réel et le rafraîchissement a lieu toutes les 25 ms.

Dans l'onglet analyse des données, on peut demander au logiciel d'enregistrer les mesures dans un fichier de type .scv qui est lisible par la plupart des tableurs.

c) Mesure des vitesses de rotation

i. Mesure de la vitesse de rotation du support :

Nous avons fabriqué un système de mesure de la vitesse de rotation du support avec six aimants au néodyme fixés à 60° l'un de l'autre sur un disque en matière plastique. Une petite sonde à effet hall est disposée sous la trajectoire des aimants. Cette sonde fixée sur le bâti de la maquette est reliée à l'entrée A0 de l'Arduino1. La tension délivrée par la sonde à effet hall est périodique et dans l'Arduino1 une fonction de mesure de la fréquence permet après conversion de connaître la vitesse de rotation du support en tour/min.



ii. Mesure de la vitesse de rotation de la tige

Nous n'avons pas réalisé de dispositif de mesure directe de la vitesse de rotation de la tige. Nous déduisons la vitesse de rotation de la période du signal de l'accéléromètre selon Y ou X.

iii. Echelle des temps

Les temps sont mesurés grâce à l'horloge interne des cartes Arduino. La fonction millis() donne le nombre de millisecondes écoulées depuis le lancement du programme.

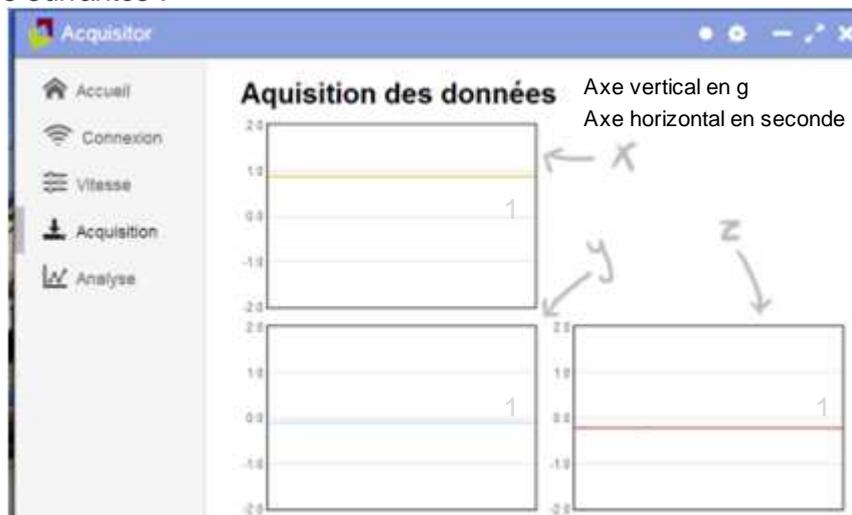
Cette valeur est approximative, d'après les indications trouvées sur la notice de la carte mais la dérive de cette horloge interne n'est décelable que pour des durées d'expériences longues de plusieurs minutes, ce qui n'est pas le cas de notre expérience, nous pourrions donc considérer que la mesure du temps est correcte avec cette méthode.

d) Mesures- comparaison avec les valeurs théoriques

Nous effectuons diverses mesures avec différentes valeurs de la vitesse de rotation du support et de la tige. Voici les mesures les plus caractéristiques que nous avons effectuées :

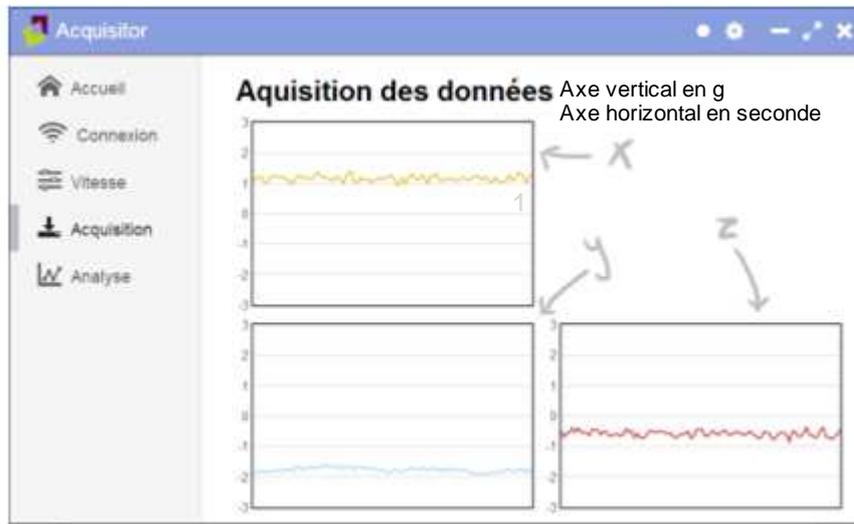
Les deux premiers essais permettent de vérifier le fonctionnement de l'accéléromètre.

Essai 1 : Vitesse de rotation du support nulle, vitesse de rotation de la tige nulle, tige horizontale. On obtient les trois courbes suivantes :



On constate que l'accélération selon X est constante et égale à g c'est-à-dire égale à l'accélération de la pesanteur, les deux autres sont pratiquement nulles ce qui est correct puisque Y et Z sont selon des directions horizontales.

Essai 2 : Vitesse de rotation de la tige nulle, vitesse de rotation du support 55 tours/min environ. La tige est placée horizontalement.



La composante de l'accélération selon X est donc égale à l'accélération centripète dont l'expression est $a_N = \omega^2.R$. (elle apparaît négative sur le graphe ci-dessus car X est dirigé vers l'extérieur)

Vérification : $\omega = 55 \text{ tours/min} = 5,75 \text{ rad/s}$

$\omega^2.R = 5,75^2 \cdot 0,5 = 16,5 \text{ m.s}^{-2}$ et la valeur mesurée est $a_N = 1,9 \text{ g} = 17,6 \text{ m.s}^{-2}$

Ecart relatif entre ces deux valeurs : $e = \frac{|16,5-17,6|}{18} \cdot 100 = 4 \%$

Les deux valeurs sont donc en accord.

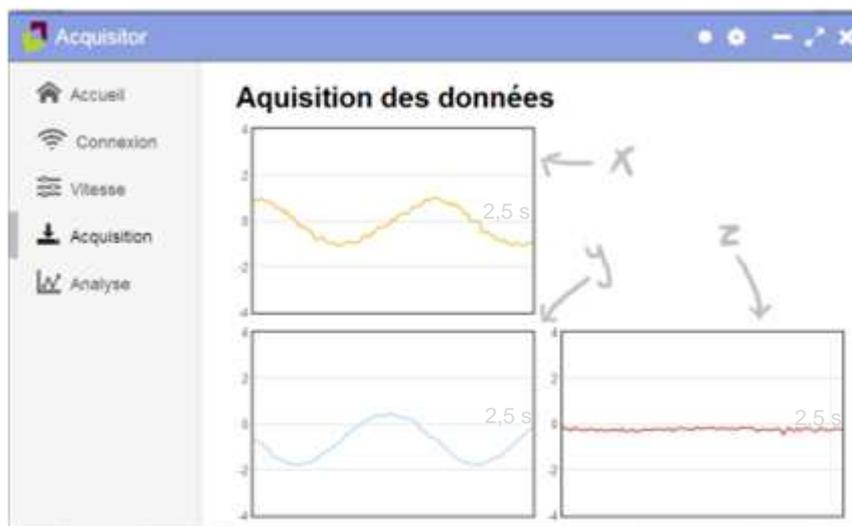
La composante selon Y est constante car il n'y a pas de mouvement de la tige. Elle n'est pas nulle car l'accélération de la pesanteur agit et effectivement elle est égale à 1 g puisque Y est vertical dans cette situation.

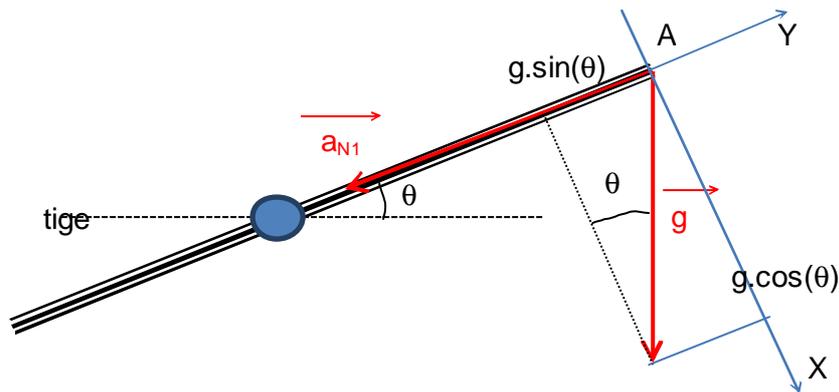
La composante selon Z est petite, nulle aussi car la vitesse de rotation du support est constante. Elle n'est pas nulle sur ce graphe car la potence s'incline légèrement lors du mouvement et on mesure une projection de l'accélération de la pesanteur sur Z.

Essai 3 : Vitesse de rotation de la tige de 35 tours/min, vitesse de rotation du support nulle.

On constate que les accélérations selon X et Y sont périodiques.

L'accélération selon Y est la somme d'accélération centripète qui accompagne la rotation de la tige autour de l'axe passant par son centre et de la projection de l'accélération de la pesanteur selon la direction de la tige.





L'allure de la courbe est donc une courbe sinusoïdale de valeur moyenne égale à a_N .

La période de ce signal permet de connaître la vitesse de rotation de la tige.

Sur le graphe ci-dessus, on peut lire une valeur moyenne sur Y égale à $0,7 g = 6,9 \text{ m.s}^{-2}$.

L'accélération normale calculée avec la relation $a_N = \omega^2.R = 3,7^2 \times 0,5 = 6,7 \text{ m.s}^{-2}$

Ecart relatif entre ces deux valeurs : $e = \frac{|6,9-6,7|}{6,8} \times 100 = 1,5 \%$

Les deux valeurs sont donc en accord.

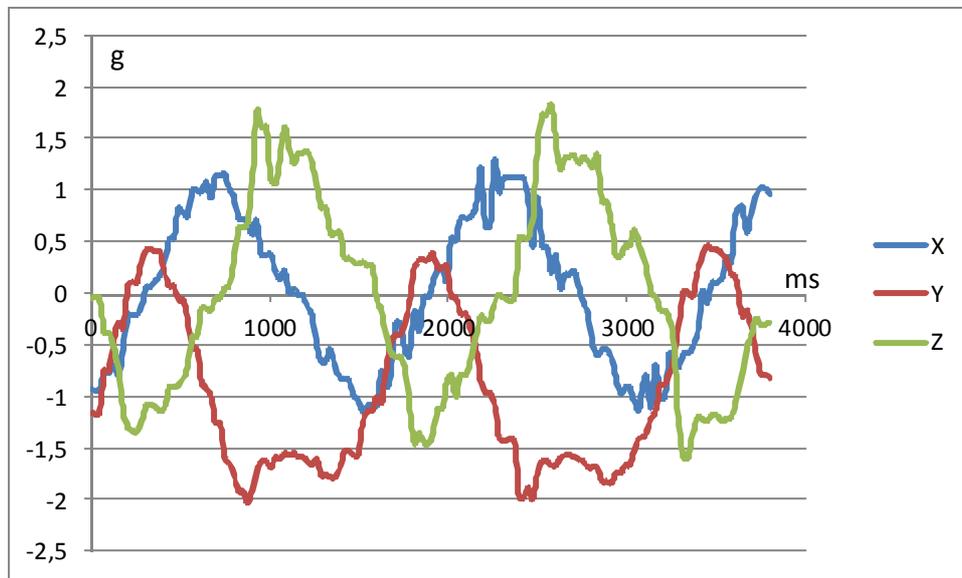
L'accélération selon X est périodique car elle est la projection de l'accélération de la pesanteur sur l'axe Y tangent à la trajectoire de A. La tige a un mouvement de rotation à vitesse constante, donc la valeur moyenne est nulle. On peut remarquer que cette courbe est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ par rapport à celle représentant l'accélération selon X. Ce qui est normale puisque les deux axes X et Y sont orthogonaux. De plus l'amplitude de la courbe est bien égale à g.

L'accélération selon Z est presque nulle, il n'y a pas d'accélération puisque le support est immobile et que la rotation s'effectue dans le plan orthogonal à Z.

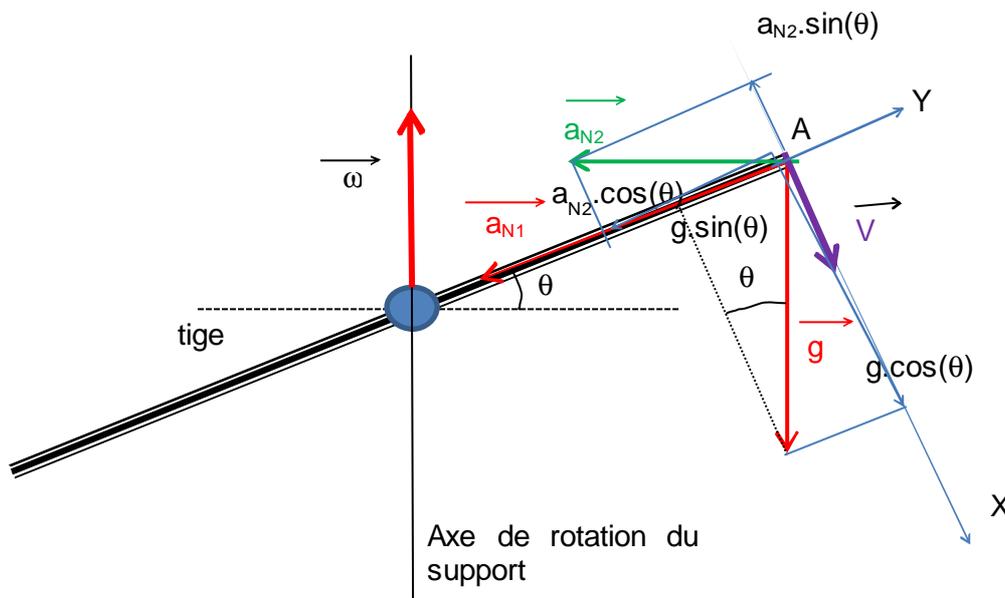
Les trois premiers essais permettent de s'assurer de la bonne qualité des mesures de l'accélération sur les divers axes.

Essais 4 : MESURE DE L'ACCELERATION DE CORIOLIS ! vitesse de rotation de la tige de 0,625 tours/s environ et vitesse de rotation du support 20 tours/min environ.

L'ouverture du fichier d'enregistrement des mesures donne les courbes suivantes :



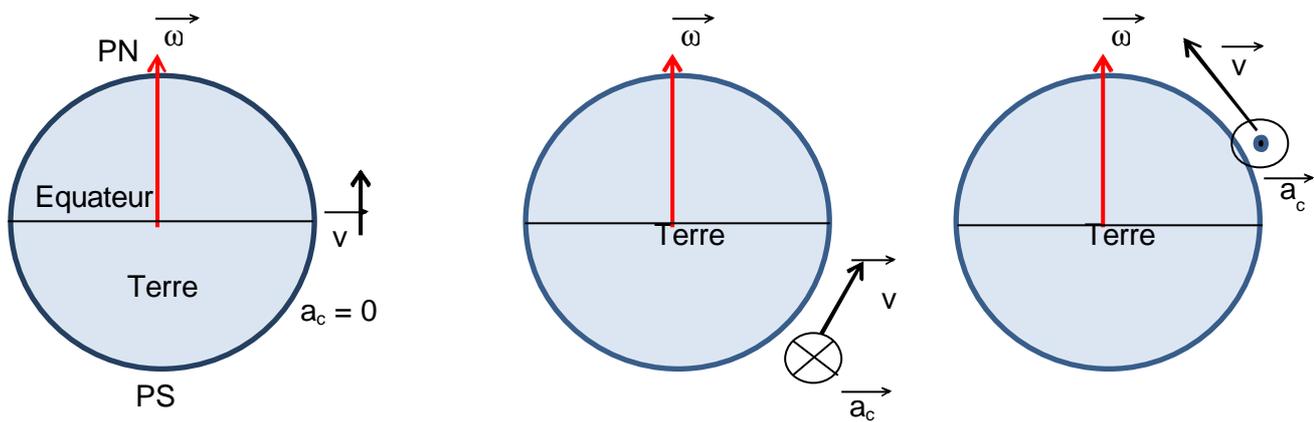
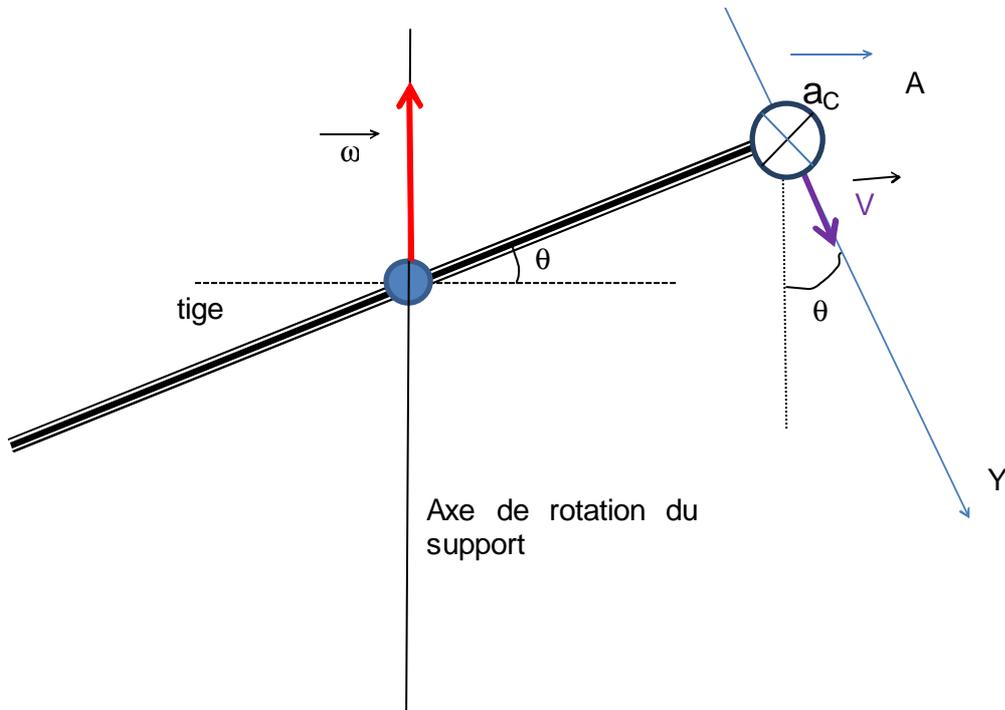
L'accélération selon Y est périodique mais présente une allure plus complexe qu'une allure sinusoïdale, car elle est la somme de l'accélération centripète due au mouvement de la tige a_{N1} , de la projection sur X de l'accélération centripète a_{N2} due à la rotation du support et de la projection de l'accélération de la pesanteur.



L'accélération selon X est aussi périodique et non sinusoïdale car elle est égale à la somme de la projection de l'accélération de la pesanteur et la projection de l'accélération centripète a_{N2} due à la rotation du support.

L'accélération selon Z est périodique. C'est l'accélération de Coriolis, puisque nous sommes dans le cas où un point possède une vitesse dans un référentiel animé d'un mouvement de rotation. Elle varie au cours du temps car elle dépend de l'angle entre $\vec{\omega}$ et \vec{v}

Nous avons déjà vu que θ est l'angle entre deux vecteurs $\vec{\omega}$ et \vec{v} alors $a_c = 2 \omega.v.\sin(\theta)$. Si on considère que la ligne d'équateur est l'horizontale, on vérifie que la valeur de l'accélération de Coriolis passe par la valeur 0 lorsque l'accéléromètre passe cette ligne. Donc elle change de signe lorsque l'accéléromètre passe de l'hémisphère Sud à l'Hémisphère Nord. Cela est conforme à ce que la théorie nous indique puisque deux vecteurs parallèles ont un produit vectoriel nul. Au pôle Nord ou Sud au contraire la valeur de l'accélération de Coriolis est maximale.



Comparaison des valeurs mesurées avec les valeurs théoriques.

L'amplitude de la courbe selon Z est de 1,3 g soit $12,7 \text{ m.s}^{-2}$ environ.

La mesure directe de la vitesse de rotation du support donne $\omega = 20$ tours/min environ

Mesure de la vitesse de rotation de la tige à partir de la période des signaux donnés par l'accéléromètre $T = 1,6 \text{ s}$

Donc $\Omega = \frac{1}{T} \times 2\pi = 3,9 \text{ rad/s}$ où Ω est la vitesse de rotation de la tige

Or la vitesse est reliée à la vitesse angulaire par $V = \Omega \cdot R$ où R est le rayon de la trajectoire ($R = 50 \text{ cm}$) donc la vitesse de l'accéléromètre est $V = 3 \text{ m/s}$

Comparons la valeur de l'accélération mesurée au « pôle Nord » et la valeur calculée avec la formule donnant l'accélération de Coriolis $a_c = 2 \omega \cdot V \cdot \sin(\theta)$ avec $\sin(\theta) = 1$ car $\theta = 90^\circ$

$\omega = 20 \text{ tours/min} = 2 \text{ rad/s}$ donc $a_c = 2 \times 2 \times 3 = 12 \text{ m.s}^{-2}$

L'écart relatif entre la valeur mesurée la valeur calculée est $e = \frac{12,7-12}{12} \times 100 = 6 \%$

L'écart de 6% entre ces deux valeurs montre un assez bon accord entre la valeur mesurée directement et la valeur calculée.

Lors de ces mesures, notre plateau ne tourne pas très régulièrement et ceci provoque l'aspect festonné de l'accélération selon Z, donc de l'accélération de Coriolis. Ceci explique certainement cet écart entre les deux valeurs.

5. Tourbillons observés en météorologie

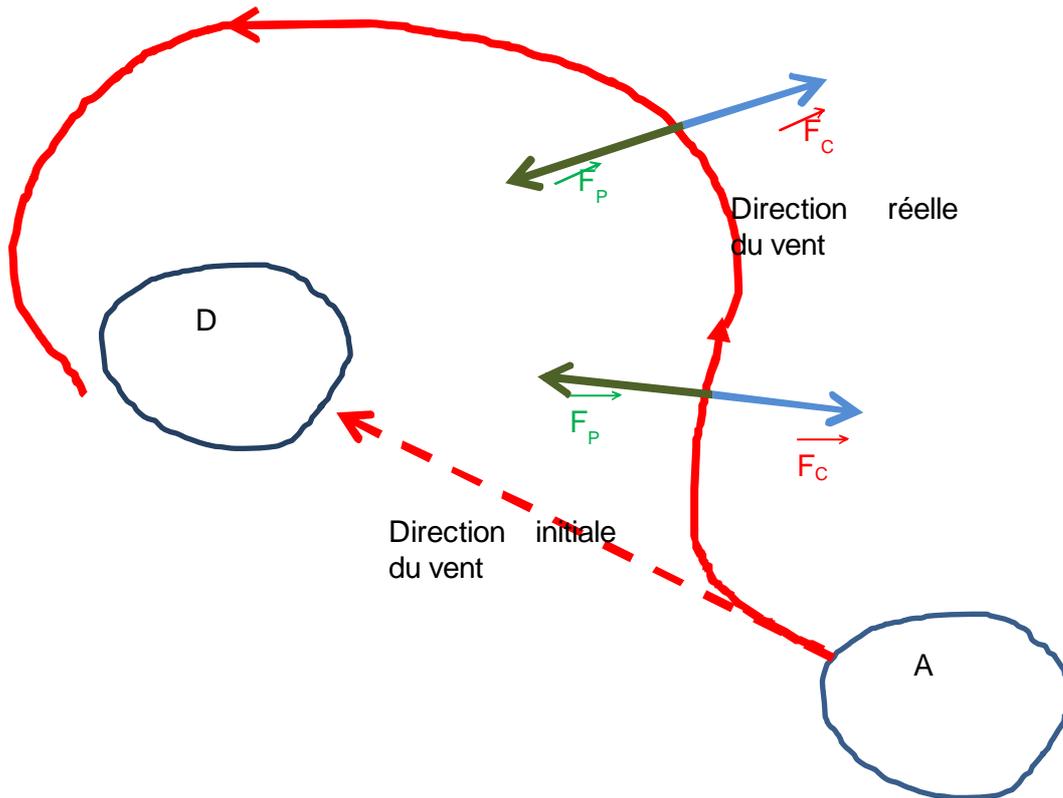
Lorsqu'on examine les cartes météorologiques telles que celles présentées en annexe concernant la tempête Xynthia (voir annexe), on constate que la direction des vents est à peu près celle des lignes isobares, et de telle sorte que le vent a, sur sa gauche, la zone de basse pression.

Comment la force de Coriolis explique-t-elle ce comportement ?

Prenons le cas de répartition des pressions observée lors de la tempête Xynthia. L'air devrait se déplacer de la zone des hautes pressions au Sud Est vers les zones de basse pression au Nord-Ouest.

Nous venons de montrer qu'un point se dirigeant vers le Nord, et situé dans l'hémisphère Nord, subit une force de Coriolis dirigée vers l'Est ; Les vents courbent donc leur trajectoire pour aller vers l'Est et finalement lorsque la force de Coriolis F_C a même intensité que la force de pression F_P , la trajectoire vitesse du vent se stabilise.

Ensuite le vent s'enroule autour de la dépression si la force de pression est un peu plus grande que la force de Coriolis



Dans l'hémisphère Sud, ce phénomène est inversé car comme le montre notre étude sur notre maquette tournante, les propriétés du produit vectoriel font que l'accélération de Coriolis est dirigée vers l'Est et donc la force de Coriolis vers l'Ouest.

6. Conclusion

Grâce à cette étude, nous avons pu comprendre le rôle de la force de Coriolis en météo. Cette force d'inertie explique la direction des vents. Elle explique des observations contraires à l'intuition comme par exemple la déviation de la trajectoire d'un objet dans le sens du mouvement.

Nous avons beaucoup apprécié ce travail sur lequel nous avons passé beaucoup de temps, puisque nous y travaillons depuis la fin de la classe de seconde.

Nous sommes très contents de participer au concours des Olympiades de Physique.

7. Annexes

a) Programme Aquisitor

Acquisitor a été créé en HTML, CSS et Javascript à l'aide de **Node-Webkit** (un logiciel combinant **nodejs** pour la partie **Javascript** et **Webkit** pour la partie HTML/CSS).

Voici l'algorithme principal gérant l'acquisition, le traitement et l'enregistrement des données provenant de l'accéléromètre.

D'abord, on ouvre le port série du XBee :

```
Connexion.Xbee.connect=function(port){  
  
    // On assigne les options  
    Connexion.Xbee.serial.path= port;  
    Connexion.Xbee.serial.options.baudRate=op.connexion.xbee.baudrate;  
  
    // On ouvre le port série  
    Connexion.Xbee.serial.open(function(){  
  
        Connexion.Xbee.serial.on("data",Connexion.Xbee.onData);  
  
        Connexion.Xbee.connected=true;  
  
    });  
};
```

Ensuite, on récupère les frames envoyées via XBee :

```
// Dès qu'on reçoit une frame:  
Connexion.Xbee.onData=function(data){  
  
    xbeeBuffer+=data.toString("ascii").replace(/,/g,".");  
    Connexion.Xbee.checkData();  
  
}
```

```

// Regarde les données arrivées
Connexion.Xbee.checkData=function(){

    // Le buffer n'est pas complet
    vari=xbeeBuffer.indexOf(";");

    if(i ==-1)
        return;

    // On appelle la fonction correspondante au data type
    var data =xbeeBuffer.slice(1, i);

    if(Connexion.dataTypes[xbeeBuffer[0]])
        Connexion.dataTypes[xbeeBuffer[0]](data);

    // On enlève les données traitées
    xbeeBuffer=xbeeBuffer.slice(i+1);
    Connexion.Xbee.checkData();
}

```

On ne traite alors que les frames contenant les données de l'accéléromètre :

```

Connexion.addType("d",function(data){

    var i1 =data.indexOf(":"),
        i2 =data.indexOf(":", i1+1);

    // On vérifie que les données sont correctes
    if(i1 ==-1|| i2 ==-1)
        return;

    // On assigne les valeurs aux buffers
    Acquisition.buffer.x=parseFloat(data.slice(0, i1))||0;
    Acquisition.buffer.y=parseFloat(data.slice(i1+1, i2))||0;
    Acquisition.buffer.z=parseFloat(data.slice(i2+1))||0;

});

```

Dès qu'on est prêt, on enregistre ces données :

```

// Démarre l'enregistrement
Record.start=function(){

    if(this.isRecording||!Connexion.Xbee.connected)
        return;

    this.isRecording=true;
    fps=op.acquisition.fps;

    timer=setInterval(Record.update,1000/ fps);
    lastTemps=performance.now();
};

```

```

// Enregistre les données à intervalles réguliers
Record.update=function(){

    if(!Record.isRecording)
        return;

    // On ajoute les données de l'accéléromètre
    Record.data.x.push(Acquisition.buffer.x);
    Record.data.y.push(Acquisition.buffer.y);
    Record.data.z.push(Acquisition.buffer.z);

    // On ajoute les vitesses
    Record.data.vP.push(op.vitesse.v1.record==1?
        Vitesse.s1.value: Vitesse.s1.trueValue );

    Record.data.vT.push(op.vitesse.v2.record==1?
        Vitesse.s2.value: Vitesse.s2.trueValue );

    // On ajoute le temps (performance.now() retourne le temps en ms)
    Record.data.timeMap.push(performance.now()-lastTemps);
    lastTemps=performance.now();
};

```

On peut enfin exporter ces données en un fichier .csv

```
Analyse.convertToCSV=function(obj){  
  
    if(typeofobj=="string")  
        obj= $.parseJSON(obj);  
  
    varresult="Temps(ms);X;Y;Z;VitessePlateau;Vitesse Tige";  
  
    vartps=0;  
    obj.timeMap[0]=0;  
  
    for(vari=0;i<obj.x.length;i++){  
        tps+=obj.timeMap[i];  
        result+="\n"+tps+";"+obj.x[i]+";"+obj.y[i]+";"+obj.z[i]+";"  
            +obj.vP[i]+";"+obj.vT[i];  
    }  
  
    returnresult;  
}
```

Le contrôle de la vitesse est géré par un slider (un curseur déplaçable sur un axe).

```
// Slider: plugin jQuery UI  
$vitesseSlider.slider({  
  
    min:0,  
    max:100,  
  
    // Événement: fonction appelée dès que le slider change de valeur  
    change:function(event,ui){  
        Vitesse.s1.onChange(ui.value);  
    }  
});
```

La vitesse est alors envoyée à l'émetteur XBee ou à un Arduino branché en USB selon les options choisies.

```
Vitesse.s1.onChange=function(val){  
  
    Vitesse.s1.value=val;  
  
    if(op.vitesse.v1.where!=1&&Connexion.Usb.connected)  
        Connexion.Usb.serial.write(new Buffer("p"+val+";"));  
  
    if(op.vitesse.v1.where!=2&&Connexion.Xbee.connected)  
        Connexion.Xbee.serial.write(new Buffer("p"+val+";"));  
  
};
```

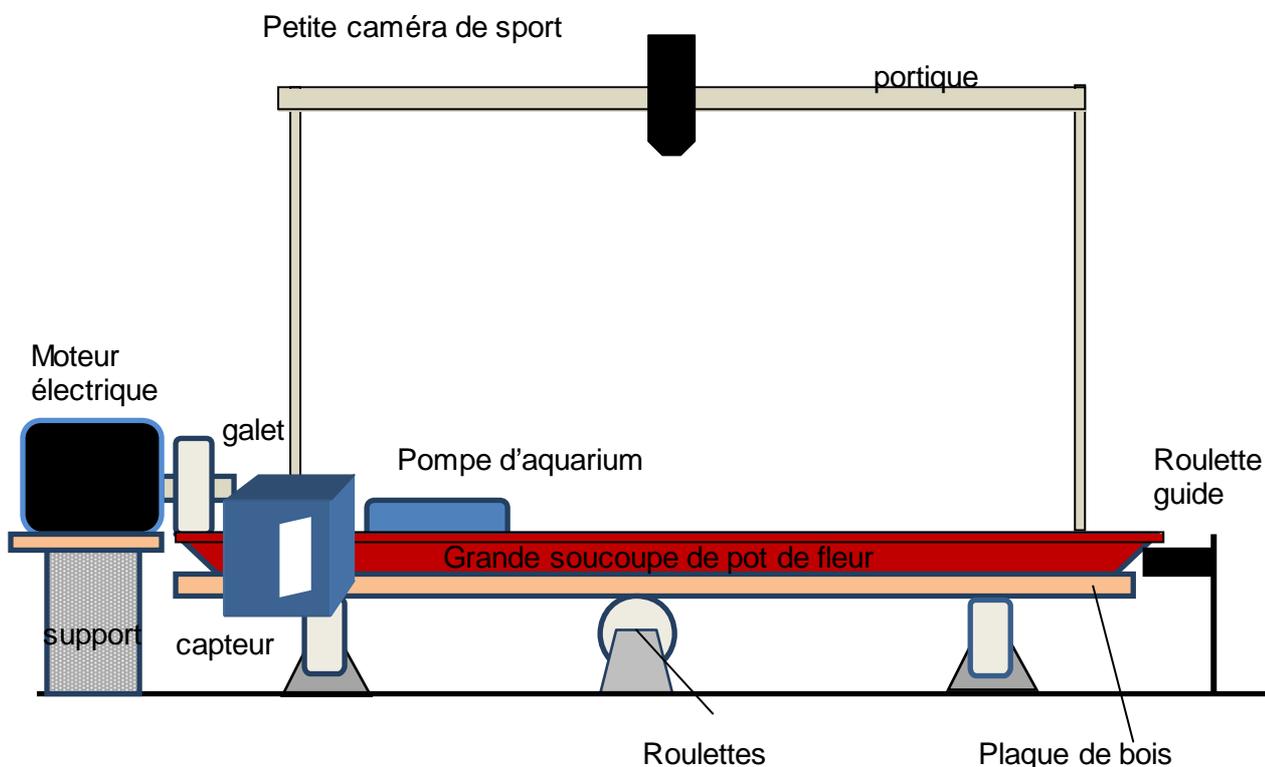
b) Construction de la maquette munie d'un bassin tournant

Elle comporte un plateau tournant creux, de 80 cm de diamètre, posé sur quatre roulettes. Il s'agit en fait d'une assiette de pot de grand pot de fleur retournée.

Elle est guidée latéralement également par des petites roulettes.

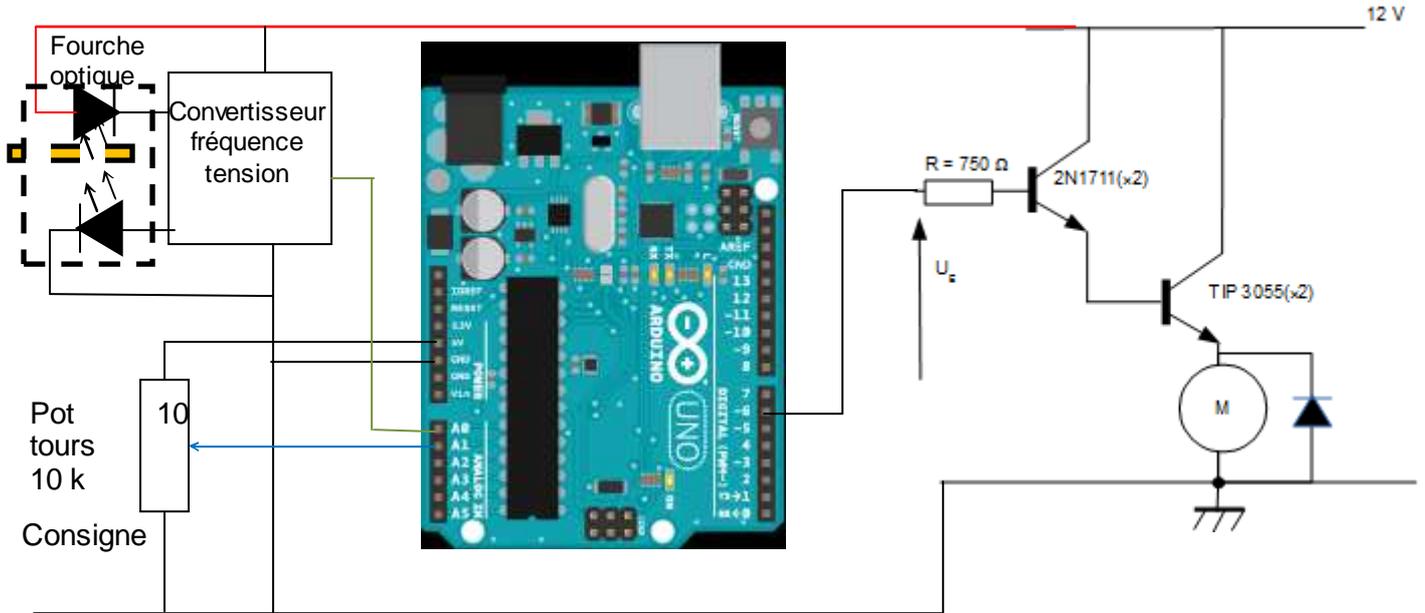
Un moteur de vélo électrique de 100 W entraîne un galet qui entraîne la rotation de l'ensemble.

Nous voulions faire des expériences utilisant de l'eau, et la masse de l'ensemble mobile peut atteindre près de 10 kg d'où l'utilisation d'un moteur puissant.



Le dispositif de commande du moteur électrique :

Nous avons construit un hacheur de puissance commandé par la sorties logique (6) de la carte Arduino. Cette sortie est modulée par un signal type PWM dont le rapport cyclique varie de 0 à 100 %. La source d'énergie est une batterie de 12 V 12 Ah.

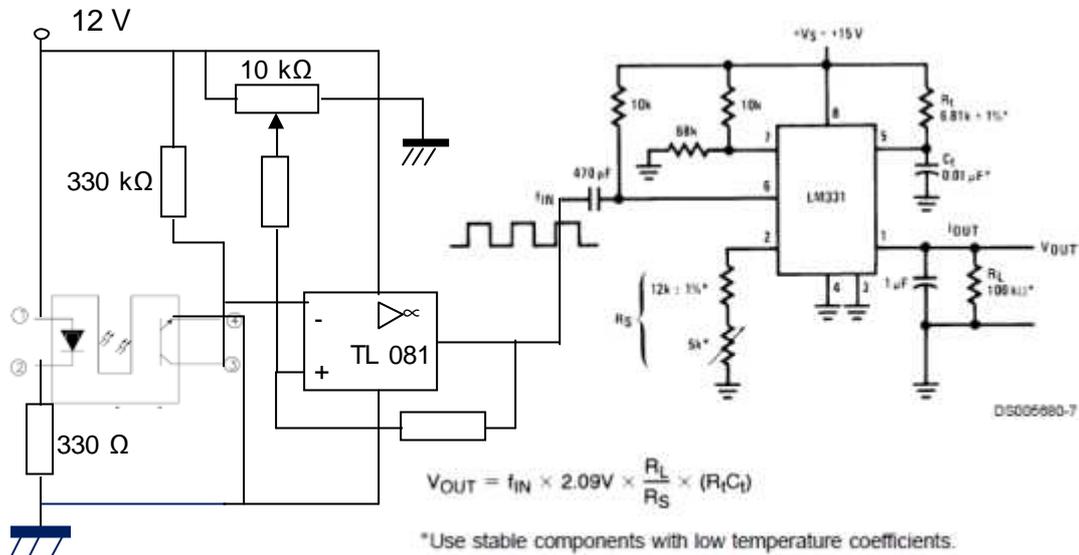


Mesure de la vitesse de rotation du disque.

Nous avons percé dans le bord de la soucoupe en plastique 125 trous. Une fourche optique infrarouge est disposée à cheval sur ce bord et son faisceau infrarouge est occulté par le bord sauf lorsqu'un trou passe. Cela permet d'obtenir un signal rectangulaire de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation du disque. Cette tension est appliquée sur l'entrée analogique A0 de l'Arduino. Un convertisseur fréquence tension délivre une tension proportionnelle à la vitesse de rotation du disque.

La fourche optique est un KTIR 0611 S que l'on scie en deux parties pour pouvoir éloigner l'émetteur et le récepteur et ainsi adapter leur distance à l'épaisseur du bord.

L'ensemble est placé dans un boîtier qui protège l'électronique de l'eau contenue dans le bassin tournant.



*Use stable components with low temperature coefficients.

FIGURE 6. Simple Frequency-to-Voltage Converter, 10 kHz Full-Scale, ±0.06% Non-Linearity

Le phototransistor fonctionne en régime de commutation. On prélève la tension aux bornes de la résistance de 330 kΩ. Cette tension prend deux valeurs : 0 V si le phototransistor est éclairé, et 12 V si le phototransistor n'est pas éclairé.

Un comparateur à deux seuils inverseur permet de mettre en forme le signal issu du phototransistor. Le potentiomètre de 10 kΩ soudé sur le circuit imprimé permet de régler la tension de seuil.

L'amplificateur opérationnel TL081 est alimenté sous une tension non symétrique, mais cela n'est pas important ici car seuls deux états sont nécessaires.

Régulation PID.

L'entrée A1 de l'Arduino est reliée au curseur d'un potentiomètre 10 tours. Il délivre une tension comprise entre 0 V et 5 V. Cette tension est la consigne.

Un programme (sketch) est téléversé dans la carte Arduino. Il a pour rôle de réguler la vitesse du plateau. Il réalise une régulation PID. Nous avons beaucoup d'essais pour obtenir des paramètres donnant une régulation de vitesse correcte.



Le module de commande de la platine tournante

c) Construction de la maquette munie d'une tige tournante

i. Présentation générale

Elle comporte un support au centre duquel se trouve un moteur électrique solidaire d'un axe vertical. Sur cet axe est fixée une tige horizontale portant un support en forme de V inversé. Au sommet du V un second moteur électrique entraîne une tige légère à l'extrémité de laquelle se trouve un accéléromètre triaxes analogique.

ii. L'accéléromètre

Nous l'avons acheté chez Gotronics, il s'agit de la référence SEN02241P, c'est un petit module bâti autour du circuit ADXL335 de Analogdevices

FEATURES

- 3-axis sensing
- Small, low profile package
- 4 mm × 4 mm × 1.45 mm LFCSP
- Low power: 150 μ A (typical)
- Single supply operation: 1.8V to 3.6V
- 10,000 g shock survival
- Excellent temperature stability
- HW adjustment with a single capacitor per axis
- RoHS/WEEE lead free compliant

APPLICATIONS

- Cost sensitive, low power, motion- and tilt sensing applications
- Mobile devices
- Gaming systems
- Disk drive protection
- Image stabilization
- Sports and health devices

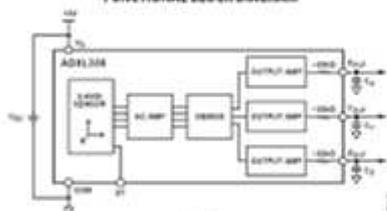
GENERAL DESCRIPTION

The ADXL335 is a small, thin, low power, complete 3-axis analog converter with signal-conditioned voltage outputs. The product measures acceleration with a maximum full scale range of ± 3 g. It can measure the static acceleration of gravity in tilt sensing applications, as well as dynamic accelerations resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the C_x , C_y , and C_z capacitors at the X, Y, and Z pins. Bandwidths can be selected to suit the application, with a range of 0.5 Hz to 1000 Hz for the X and Y axes, and a range of 0.5 Hz to 500 Hz for the Z axis.

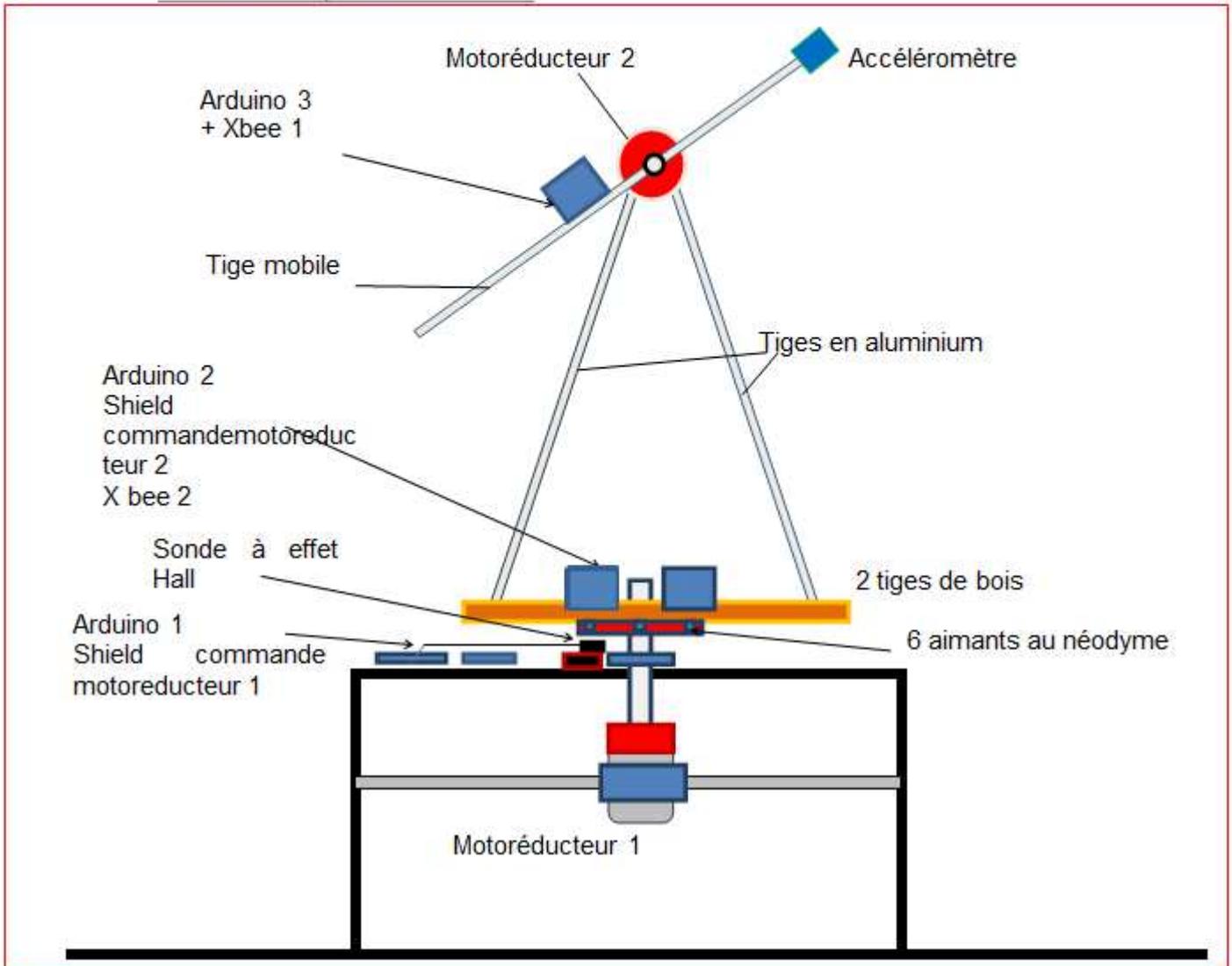
The ADXL335 is available in a small, low profile, 4 mm × 4 mm × 1.45 mm, 16-lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP_VQ).

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

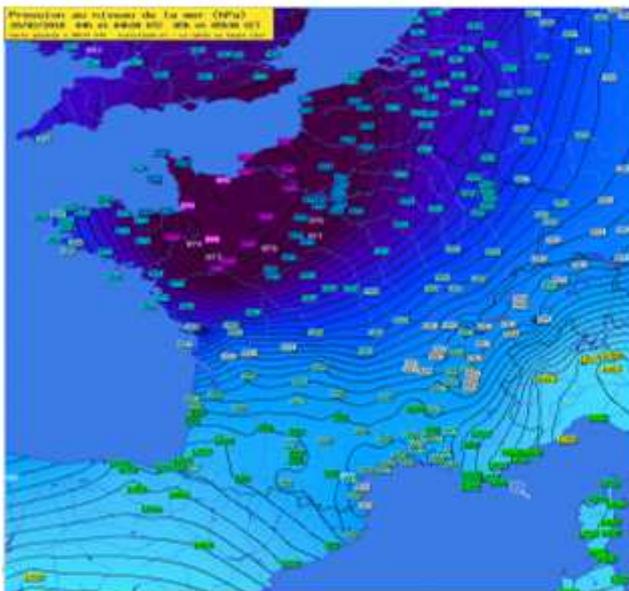


La sensibilité est de 300 mV/g et l'échelle est de ± 3 g.
Il doit être alimenté sous 3,3 V.

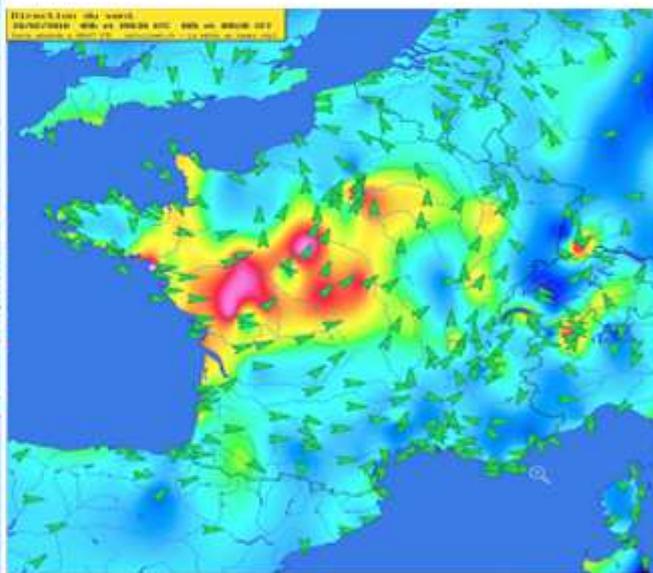
iii. Plan de la maquette de mesures



d) La tempête Xynthia 28/02/2010



Les lignes isobares



La direction du vent