



# Mettre Éole en boîte

**Olympiades de Physique France 2010**

**équipe du club scientifique  
du Lycée Jules Viette à Montbéliard**

**avec le soutien du Conseil Régional de Franche-Comté,  
de l'ADEME, de EDF, de Météo France et de EOLE-RES**

# **Olympiades de physique France 2010**

## **groupe du lycée Viette – Montbéliard**

résumé

### **Mettre Éole en boîte**

L'idée a été lancée, au lycée, d'implanter une éolienne de quelques kilowatts. Pour s'assurer de la pertinence du projet et convaincre les partenaires financiers, il faut apporter la preuve que le potentiel éolien est suffisant.

Plutôt que d'acheter des appareils de mesure du vent dans le commerce, le club scientifique a décidé de concevoir puis fabriquer un anémomètre et une girouette en respectant le cahier des charges de Météo-France. Nous avons testé et sélectionné des composants, créé une roue codeuse, conçu un tambour crénelé, créé des cartes électroniques, un banc de test, des programmes d'acquisition de données... Après avoir commis et corrigé bien des erreurs, les parties électronique et acquisition de nos prototypes sont au point. Nous abordons maintenant la conception de la partie mécanique ! Quand les pièces seront usinées, nous procéderons au montage des appareils sur le mât de mesures (construit par le lycée) et leur connexion au système d'acquisition et de traitement des données.

Florence, Pierre, Rémi, Matthieu, Thomas, Joris  
avec le soutien de Corinne et François animateurs du club scientifique

# sommaire

<b>1. investigations préalables</b> .....	4
1.1.la production d'une éolienne.....	4
1.2.un potentiel éolien à priori peu favorable.....	4
1.3.mais un site bien exposé.....	4
1.4.et une éolienne adaptée aux « vents faibles ».....	4
<b>2. nécessité de connaître avec précision le vent sur le site</b> .....	5
2.1.une grande variabilité mensuelle et annuelle du vent.....	5
2.2.nécessité d'établir le potentiel éolien sur une année moyenne.....	6
2.3.le choix d'adopter les normes de Météo France (normes OMM).....	6
2.4.extrapolation verticale de la vitesse du vent.....	7
<b>3. conception de l'anémomètre</b> .....	7
3.1.le capteur et les roulements à bille.....	7
3.2.la carte d'acquisition.....	7
3.3.la base de temps pilotée par un quartz horloger.....	7
3.4.le tambour crénelé à 40 trous.....	7
3.5.le capteur optique à fourche et la carte électronique.....	8
3.6.le programme d'acquisition (Labview).....	8
3.7.le banc de test motorisé et le résultat des tests.....	9
<b>4. conception de la girouette</b> .....	9
4.1.le capteur.....	9
4.2.le choix de la technique de mesure de la direction.....	9
4.3.le choix des capteurs optiques.....	10
4.4.la conception de la roue codeuse.....	12
4.5.les cartes électroniques.....	14
4.6.le programme d'acquisition et de décodage (Labview).....	14
4.7.la conception d'un banc de test motorisé piloté par ordinateur (Labview).....	15
4.8.le résultat des tests.....	16
4.9.le repérage, in situ, du nord géographique.....	17
<b>5. ce qu'il nous reste à faire</b> .....	18
5.1.conception et réalisation des boîtiers et des rotors des appareils.....	18
5.2.conception d'une carte électronique d'isolation galvanique (protection contre la foudre).....	18
5.3.équipement et mise en place du mât de mesure.....	18
5.4.début de la campagne de mesures.....	18
5.5.traitement statistique des données pour comparaison avec les données Météo France.....	18
5.6.détermination du potentiel éolien.....	18
<b>6. conclusion : une équipe passionnée aux compétences multiples</b> .....	19
<b>7. ANNEXES (non jointes dans cette version du mémoire voir mémoire complet)</b> .....	20
7.1.diagramme labview du programme d'acquisition de la direction du vent.....	20
7.2.diagramme labview de la commande du moteur pas à pas.....	21
7.3.diagramme complet de pilotage et d'acquisition du banc de test.....	22
7.4.« face avant » de l'instrument virtuel de pilotage et d'acquisition du banc de test.....	23
7.5.programme de calcul des directions moyennes avec le logiciel Python.....	23

# 1. investigations préalables

## 1.1. la production d'une éolienne

Le rotor d'une éolienne capte une partie de l'énergie cinétique du vent pour la transmettre à un générateur qui fournit de l'énergie électrique au réseau ou à une installation isolée.

Si on appelle  $V$  la vitesse du vent et  $\rho$  sa masse volumique, l'énergie cinétique d'un  $m^3$  de vent s'écrit :

$$E_c = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2$$

Si on appelle  $S$  la surface balayée par les pales du rotor, le volume d'air traversant cette surface pendant une seconde est égal à  $S \cdot V$

La puissance du vent traversant la surface  $S$  est donc égale à  $P_{\text{air}} = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$

Une partie seulement de cette puissance peut être récupérée car la vitesse du vent à l'aval de l'éolienne ne peut être nulle (ce qui empêcherait l'air en amont d'atteindre l'éolienne).

Albert BETZ a démontré (1919) que le maximum de puissance était récupéré si la vitesse du vent à l'aval de l'éolienne était égale à  $1/3$  de la vitesse en amont. Ce qui conduit à la « formule de BETZ » :

$$P_{\text{captée maxi}} = 16/27 \cdot P_{\text{incidente de l'air}}$$

Dans la pratique, la puissance électrique ne dépasse pas 35% de la puissance incidente de l'air. Le rendement de conversion de l'énergie est optimal pour une certaine vitesse du vent et décroît pour des vitesses inférieures ou supérieures (voir figure 1).

Pour quantifier l'influence de l'intermittence et des fluctuations du vent, on calcule souvent le quotient de la production annuelle en kWh par la puissance nominale du générateur en kW, ce qui donne une durée annuelle équivalente de fonctionnement à pleine puissance (entre 1000 et 3000 h/an pour des éoliennes terrestres).

## 1.2. un potentiel éolien à priori peu favorable...

L'atlas éolien de Franche-Comté donne, pour Montbéliard, une vitesse moyenne du vent de 2,9 m/s à 10m du sol et 4,4 m/s à 50m du sol.

Or on considère généralement que pour assurer la rentabilité économique d'une éolienne il faut une vitesse moyenne de vent supérieure ou égale à 6m/s !

Donc un potentiel à priori peu favorable. Mais deux facteurs nous incitent à poursuivre l'étude.

## 1.3. mais un site bien exposé

Tout d'abord, le site d'implantation pressenti est bien exposé : au sommet d'un plateau bien dégagé dans la direction des vents dominants (ouest/sud-ouest et est/nord-est). Or on verra (figure 3) que la topographie locale du site a une grande influence sur le potentiel éolien.

## 1.4. et une éolienne adaptée aux « vents faibles »

Grâce à l'étude réalisée par une étudiante en BTS, nous avons eu connaissance de l'existence de l'éolienne AV-7 produite en petite série par la société suisse Aventa SA. Selon son constructeur, cette éolienne a été spécialement conçue pour des vents faibles (vents moyens compris entre 2,5 et 4,5 m/s).

Une étude réalisée en 2008 par le professeur Jochen Twele de la Fachhochschule für Technik und Wirtschaft de Berlin (université de sciences appliquées) confirme les informations du fabricant : cette éolienne – unique en son genre – a des performances réellement optimisées pour des vents faibles comme en témoignent les deux graphiques ci-après (figure 1 et 2)

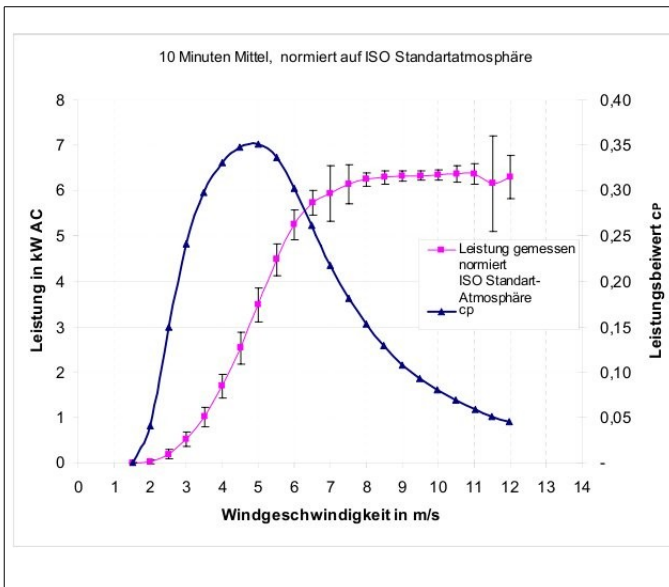


figure 1

performances de l'AV-7 : en abscisses, la vitesse du vent, en ordonnées, courbe rose, la puissance mesurée en kW ; courbe bleue, le rendement de conversion  $P_{elec}/P_{vent}$ .

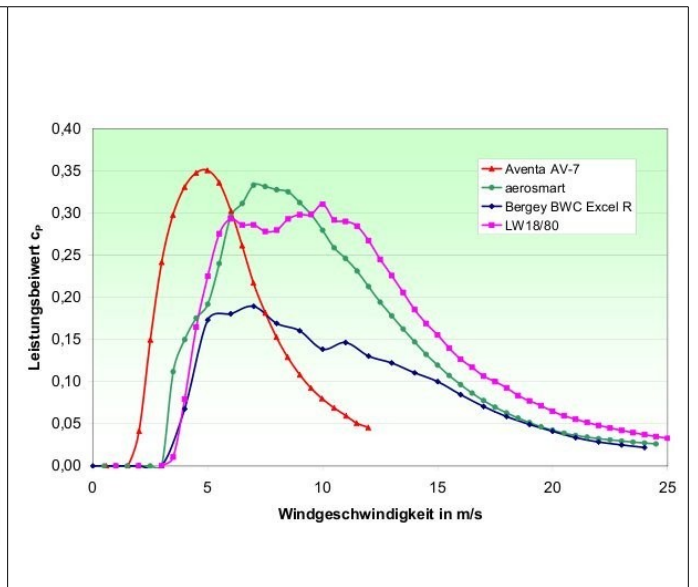


figure 2

performances de l'AV-7 comparée à d'autres éoliennes de la même gamme de puissance : en abscisses, la vitesse du vent ; en ordonnées, les rendements de conversion  $P_{elec}/P_{vent}$ .

## 2. nécessité de connaître avec précision le vent sur le site

### 2.1. une grande variabilité mensuelle et annuelle du vent

Comme la puissance du vent varie avec le cube de sa vitesse, il est très important de connaître avec précision la vitesse du vent : une augmentation du vent de 10% entraîne une augmentation de la puissance de 33%.

Or la vitesse du vent est très variable d'un mois à l'autre et même d'une année à l'autre. Nous avons récupéré les statistiques de production de 3 éoliennes AV-7 exploitées par la société Jura Énergie à une quarantaine de kilomètres de Montbéliard. ces statistiques montrent cette variabilité mensuelle (figure 4)



figure 3

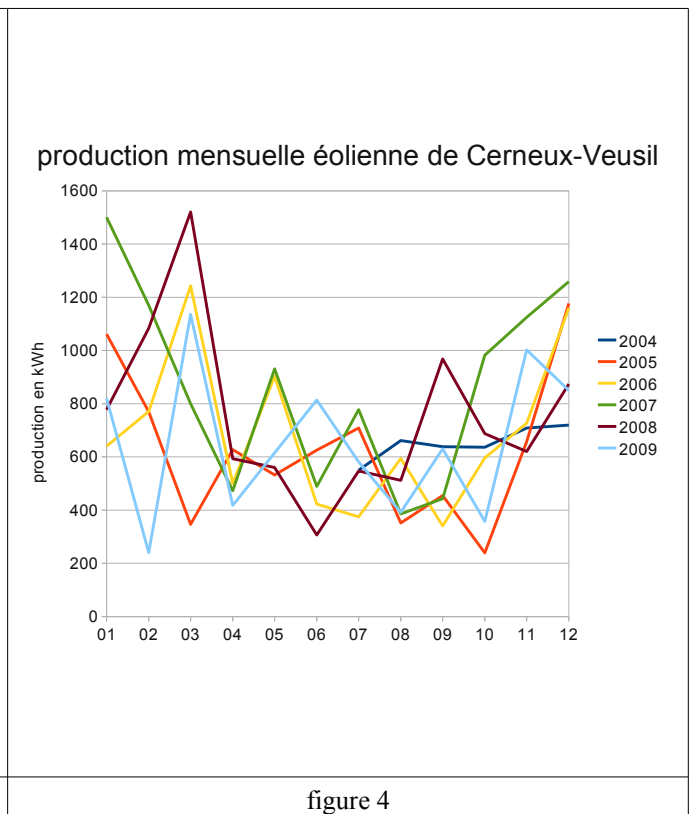
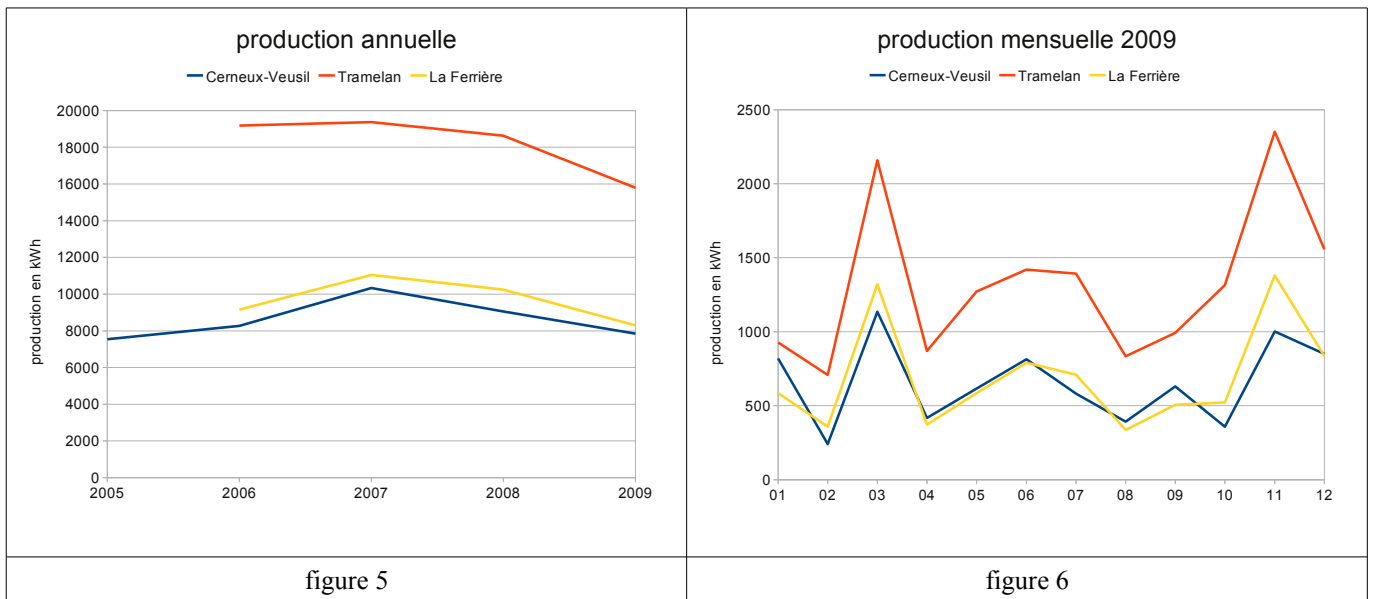


figure 4

## 2.2. nécessité d'établir le potentiel éolien sur une année moyenne

Même une campagne de mesures effectuée sur un an ne permettra pas une estimation précise du potentiel éolien car certaines années sont plus venteuses que d'autres comme le montrent les statistiques de Jura Énergie (figure 5).



## 2.3. le choix d'adopter les normes de Météo France (normes OMM)

L'existence d'une station de Météo France à Montbéliard, à 600m du lycée, mais sur un site à priori moins exposé au vent, nous a convaincu de l'intérêt d'adopter les normes de Météo France pour la construction des appareils de mesure ainsi que pour l'acquisition et le traitement statistique des données (il s'agit des normes de l'Organisation Météorologique Mondiale).

En particulier, mesures effectuées à 10m au dessus du sol, deux fois par seconde, avec une résolution de 0,1 m/s pour la vitesse et de 10° pour la direction. Ce choix présente les intérêts suivants :

### 2.3.a. détecter des dérives éventuelles dans nos mesures

Météo France mettra régulièrement ses données à notre disposition afin que nous puissions les comparer et détecter d'éventuelles dérives dans le fonctionnement de nos appareils. Il existe, en effet, une forte corrélation des mesures du vent entre des sites proches (figure 6).

### 2.3.b. observer l'incidence de la topographie locale sur les mesures

Ces comparaisons nous permettront également d'observer l'incidence de la topographie locale des deux sites sur les mesures. La figure 5 montre que la production peut passer du simple au double entre une première éolienne implantée dans un vallon - pourtant très ouvert - et un plateau situé une centaine de mètres plus haut.

### 2.3.c. établir une corrélation entre les mesures des deux sites pour calculer le potentiel sur une année moyenne

Enfin, Météo France disposant, pour sa station, de mesures s'étalant sur plusieurs décennies, nous pourrons, à partir de nos mesures estimer le vent sur une année moyenne et en déduire le potentiel éolien correspondant.



## 2.4. *extrapolation verticale de la vitesse du vent*

Nous avons vu, au §1.2., que la vitesse du vent varie en fonction de la distance au sol. Il nous faudra donc, extrapoler nos mesures pour estimer la vitesse du vent à 18m au dessus du sol (ce qui correspond à la hauteur du moyeu du rotor de l'éolienne AV-7).

Des recherches bibliographiques nous ont fait découvrir qu'il existe un grand nombre de modélisations de la vitesse du vent en fonction de la distance au sol. La validité des modèles dépend assez largement des zones climatiques.

Parmi la multitude de formules d'extrapolation disponibles, nous avons, à priori, retenu la « loi de puissance » suivante :

$$\frac{V_2}{V_1} = \left[ \frac{z_2}{z_1} \right]^\alpha$$
 dans laquelle  $z_1$  et  $z_2$  représentent deux hauteurs au dessus du sol et  $V_1$  et  $V_2$  les vitesses du vent correspondantes.

$\alpha$  est un exposant empirique qui peut être déterminé expérimentalement en effectuant des mesures de vitesse à deux hauteurs différentes. À cet effet, nous avons prévu de disposer, pendant quelques mois au moins, un second anémomètre sur le mât de mesures à une hauteur de 6 mètres.

Cette formule d'extrapolation a été utilisée par le bureau d'études bernois METEOTEST pour l'étude du potentiel éolien de la montagne de Moutier commandée par l'office fédéral de l'énergie (Suisse-1999). La proximité du site (45 km de Montbéliard) et sa topographie relativement comparable permettent de penser que la formule d'extrapolation sera adaptée (nous solliciterons l'avis de Météo France, le moment venu).

## 3. *conception de l'anémomètre*

### 3.1. *le capteur et les roulements à bille*

Pour des raisons de robustesse et surtout d'étalonnage, nous utiliserons un moulinet à 3 coupelles conçu par Météo France et aimablement fournis par le fabricant, la société Girard-Massonet. Le moulinet fait  $x$  tours par seconde quand le vent souffle à  $x$  m/s. L'erreur est inférieure à 3% entre 1 et 60 m/s. Le seuil de démarrage est inférieur à 0,7 m/s à condition d'utiliser des roulements à bille spécialement conçus pour des appareils météo. Météo France nous a fourni gracieusement les roulements.

### 3.2. *la carte d'acquisition*

L'acquisition de la vitesse du vent est réalisée avec une carte d'acquisition National Instruments disposant d'un compteur permettant de compter des impulsions pendant une durée définie par une horloge externe.

### 3.3. *la base de temps pilotée par un quartz horloger*

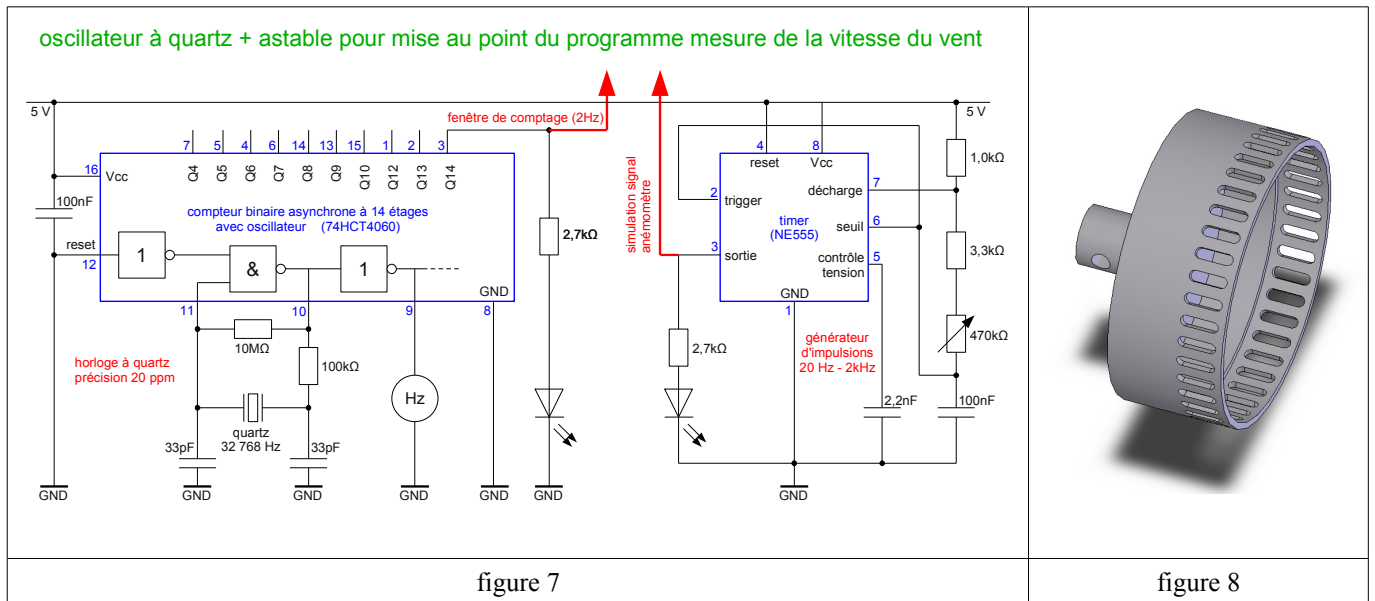
Pour avoir une base de temps précise et surtout stable dans le temps, nous avons réalisé une horloge à quartz pilotée par un quartz horloger de fréquence 32 768 Hz =  $2^{15}$  Hz (figure 7). La précision de la fréquence est de  $\pm 20$  ppm (parties par million) soit  $\pm 0,7$  Hz. La variation de la fréquence en fonction de la température est donnée (en ppm) par la relation :  $\Delta f/f_0 = -0,038 \cdot (\theta - 25)^2 \pm 10\%$

Pour une plage de températures entre 0 et 50° (l'horloge sera à l'intérieur des locaux) cela donne : +20ppm (+0,7Hz) / -50ppm (-1,5Hz).

### 3.4. *le tambour crénelé à 40 trous*

Pour effectuer 2 mesures par seconde, le comptage des impulsions se fait pendant 1/4 de seconde. Le 1/4 de seconde suivant permet d'acquérir le résultat de la mesure avant le comptage suivant. Pour avoir une résolution de 0,1 m/s, il faut mesurer l'angle de rotation, effectué en 1/4 de seconde, à 1/40<sup>ème</sup> de tour près.

Nous avons donc conçu à l'aide du logiciel de CAO/DAO Solidworks un tambour crénelé comportant 40 trous à sa périphérie (figure 8). Le tambour crénelé a été usiné à l'atelier du lycée.



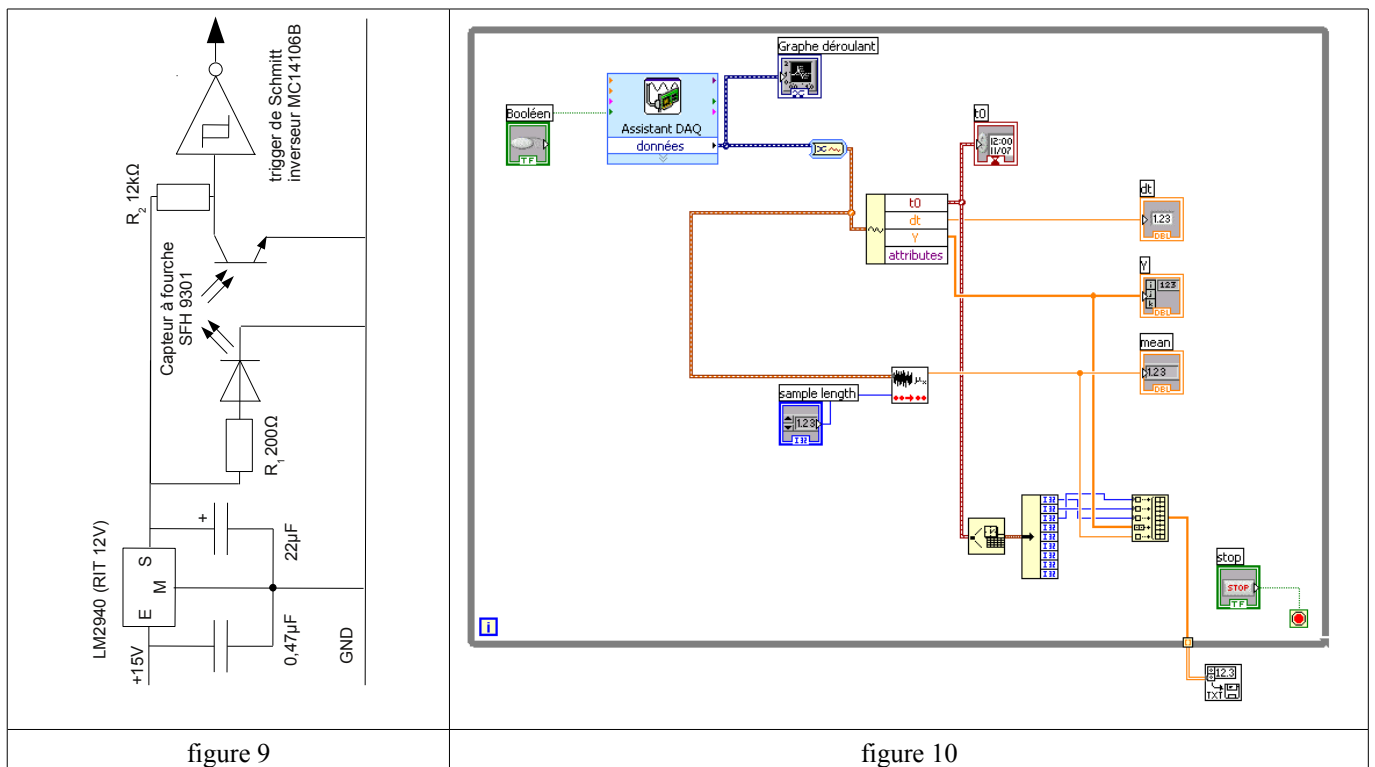
### 3.5. le capteur optique à fourche et la carte électronique

Le tambour crénelé, fixé sur l'axe du moulinet, défile entre l'émetteur et le récepteur d'un capteur optique à fourche. Chaque passage de trou dans la fourche crée une impulsion à la sortie du capteur.

Des tests ont été effectués, jusqu'à 100 tours par seconde, à l'aide d'un oscilloscope. Ils nous ont permis de vérifier que les temps de réponse sont suffisamment brefs pour obtenir une excellente réponse du capteur. Le signal de sortie du capteur est mis en forme grâce à un trigger de Schmitt avant d'être envoyé sur l'entrée du compteur (schéma de la carte électronique, figure 9).

### 3.6. le programme d'acquisition (Labview)

Le logiciel Labview utilise un langage graphique pour exécuter des tâches à partir d'une bibliothèque de fonctions et de commandes. Les tâches permettent de piloter le fonctionnement de la carte d'acquisition et de contrôle. Le diagramme (figure 10) représente le programme réalisé.





### 3.7. le banc de test motorisé et le résultat des tests

Un montage a été réalisé pour entraîner, à l'aide d'un moteur, le tambour crénelé devant le capteur optique à fourche (figure 11). Le signal, observé à l'oscilloscope, est satisfaisant. Séparément, le programme d'acquisition fonctionne également.

Nous n'avons pas encore effectué de test en reliant directement le banc de test à la carte d'acquisition pour cause d'incompatibilité (provisoire !) de tensions : La sortie du trigger de Schmitt est en 0/12V alors que les tensions admises sur la carte sont au standard TTL (0/5V). Le problème sera réglé par l'interface d'isolation galvanique (opto-coupleurs) en cours de conception.



figure 11

## 4. conception de la girouette

### 4.1. le capteur

Conformément aux préconisations de Météo France, la girouette sera montée sur les mêmes roulements à billes que le moulinet de l'anémomètre. Les dimensions et la masse de la girouette s'inspireront d'un exemplaire au rebut fourni par Météo France de façon à obtenir des caractéristiques mécaniques proches :

- seuil de vitesse à partir duquel la girouette s'oriente : 0,1 à 0,4 m/s en fonction de l'âge des roulements,
- constante de distance (= temps de réponse x vitesse du vent) de 1 à 3m,
- amortissement des oscillations comparable en cas de changement brusque de direction du vent.

### 4.2. le choix de la technique de mesure de la direction

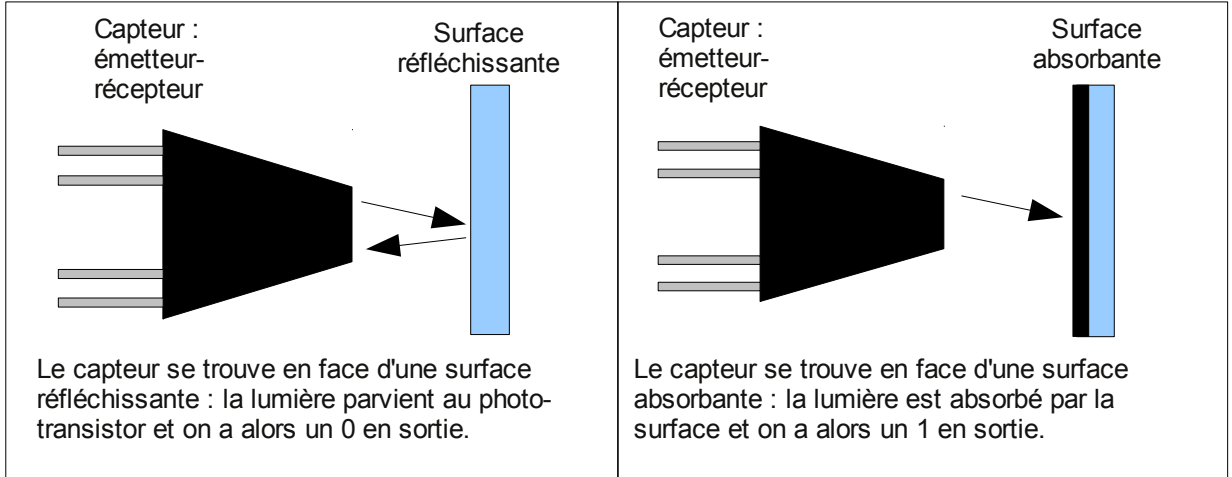
Il faut que la girouette soit couplée, mécaniquement, à un système de mesure de direction absolue (référence fixée au nord géographique). Nous avons fait un rapide inventaire des solutions possibles :

système	robustesse	résolution	avantages / inconvénients
potentiomètre rotatif	fragile à cause du contact mobile : usure et risque de faux contacts si oxydation	le signal délivré est analogique ; la résolution finale dépend du CAN (convertisseur analogique numérique) associé	il y a nécessairement un petit secteur angulaire sans contact qui limite, de fait, la résolution ; risque de dégradation de l'information analogique si la conversion ne se fait pas au plus près du potentiomètre
commutateur rotatif sur résistances ( a été utilisé par Météo France quand la résolution angulaire était de 20°)	moins fragile, mais le risque de faux contacts persiste	dépend du nombre de plots du commutateur et de résistances associées	devient complexe quand on veut augmenter la résolution
codeur optique absolu voir ci-après	système sans contact électrique mobile, donc plus fiable, mais sensible à la poussière (absorption du faisceau infrarouge)	fixée par le nombre de bits du capteur (peut atteindre 3' d'arc avec un codeur à 13 bits)	simple et bon marché ; obtention directe d'un code binaire (sortie parallèle)
résolveur : un rotor crée un champ magnétique sinusoïdal, temporel et spatial (répartition sinusoïdale, à un instant donné, du champ magnétique dans l'entrefer en fonction de l'angle) Deux bobines disposées à 90° l'une de l'autre sur le stator permettent, après démodulation, de récupérer le sinus et le cosinus de l'angle (le rotor est alimenté par un transformateur axial pour éliminer tout contact mobile).	extrêmement robuste car pas de contact mobile et insensible à la poussière (tant qu'elle n'est pas magnétique !)	les signaux délivrés sont analogiques ; la résolution finale dépend des CAN associés ; les résolveurs peuvent atteindre une résolution inférieure à 1" d'arc	extrêmement complexe à fabriquer sur le plan mécanique (pour obtenir la répartition sinusoïdale du champ magnétique) et sur le plan électrique / électronique ; donc très cher !

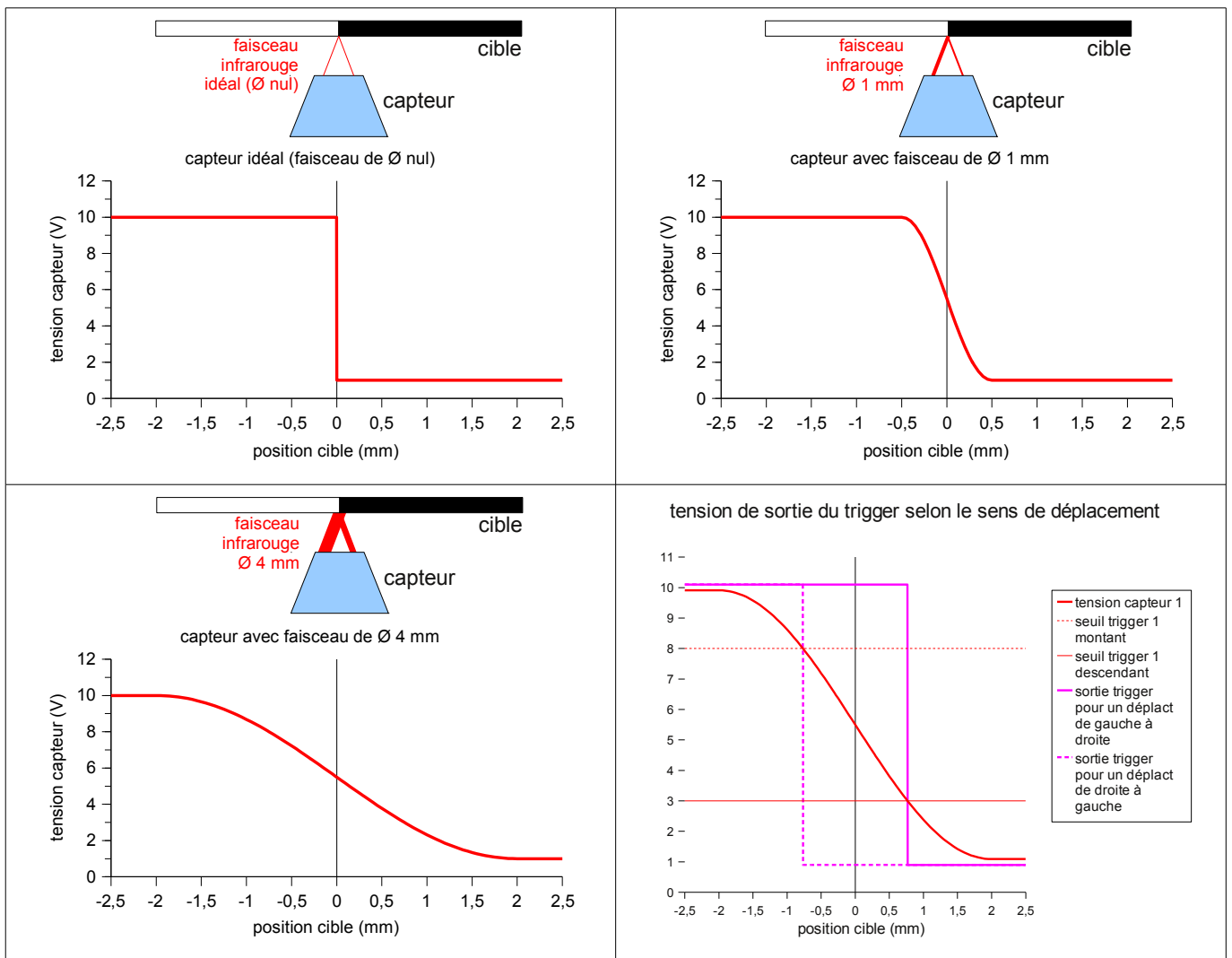
### 4.3. le choix des capteurs optiques

Le principe du codeur optique absolu est le suivant :

- une « roue codeuse » est montée sur l'axe de la girouette : elle porte des pistes concentriques comportant des secteurs réfléchissants et des secteurs absorbants.
- des capteurs optiques à réflexion constitués d'une led émettant un faisceau infrarouge, et d'un récepteur infrarouge (phototransistor) recevant ou non le faisceau infrarouge réfléchi.



Ce type de capteur délivre une information analogique. Nous nous sommes intéressés à la précision de ce type de capteur. En effet, lors du déplacement de la roue codeuse, le signal obtenu va dépendre du diamètre du faisceau infra rouge émis / reçu par le capteur comme le montrent les illustrations suivantes :



On remarque que plus le faisceau est large, plus la variation de tension se fait progressivement.

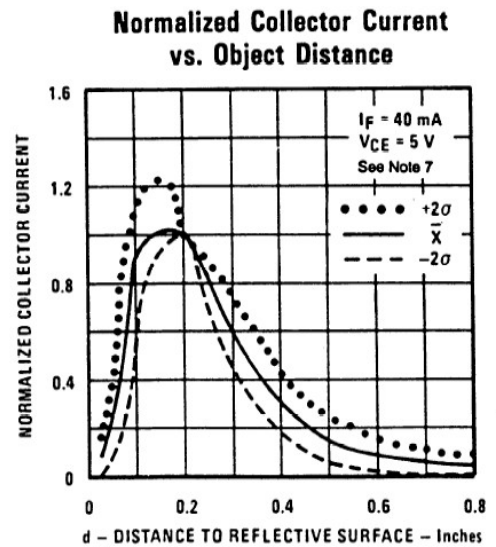
Pour passer du signal analogique délivré par les capteurs à un signal binaire, nous utilisons des triggers de Schmitt inverseurs (comparateurs à deux seuils).

Si le faisceau n'est pas ponctuel, le trigger va introduire une erreur dépendant du sens de déplacement. On va donc privilégier le plus petit faisceau possible.

Nous avons sélectionné deux capteurs optiques à réflexion protégés de la lumière ambiante (plus pratique pour faire les tests !) : OPB702 et OPB705 de OPTEK. D'après ce fabricant, la focalisation du faisceau du second est meilleure.

Nous avons testé la précision de ces capteurs et leur sensibilité aux variations de distance de la cible. Sur ce dernier point, les essais confirment la courbe du constructeur (figure 17). On peut admettre une fourchette de distance comprise entre 0,12 et 0,2 pouces soit 3 et 5 mm.

Pour tester la précision des capteurs, nous avons réalisé une glissière en aluminium striée de bandes noires de largeur variable (figure 18 en bas). On fait défiler cette glissière devant le capteur et on observe, sur l'oscilloscope, le signal à la sortie du capteur.



Source : OPTEK technology inc (R)  
REFLECTIVE OBJECT SENSOR DATASHEET  
Type OPB 703, 704, 705

figure 17

### Détermination expérimentale de la précision des capteurs optiques

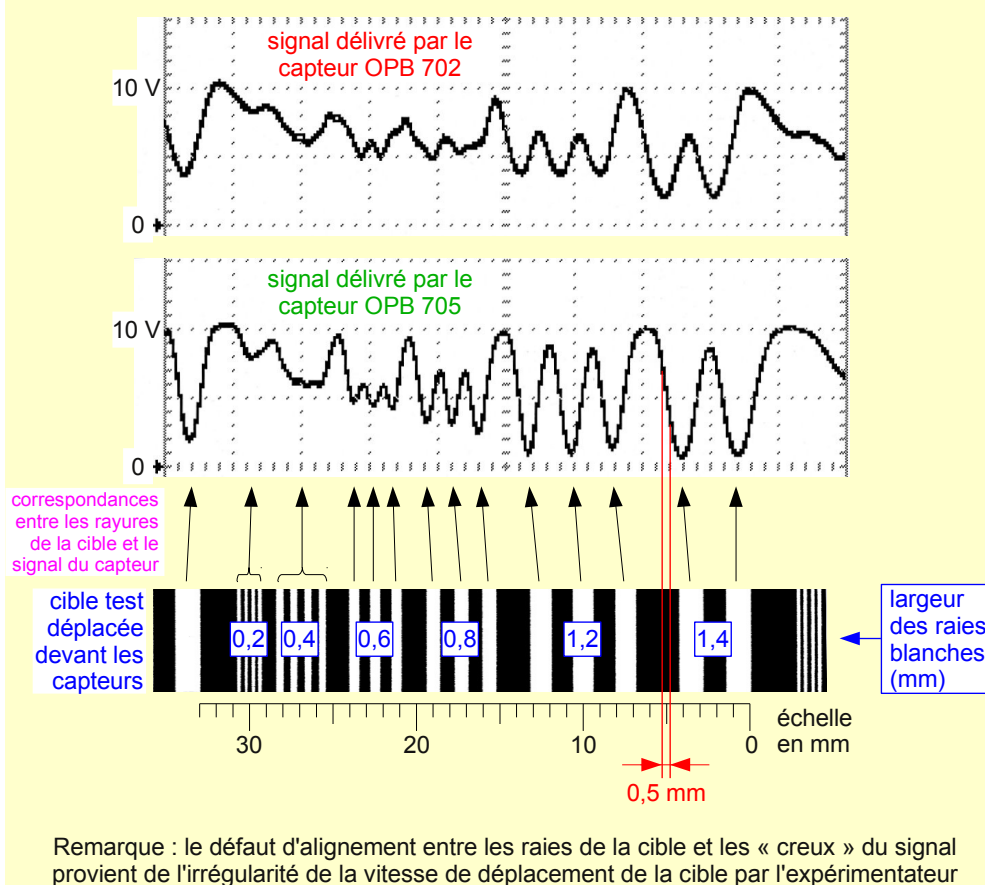


figure 18

Les « creux » correspondent aux raies blanches.

On distingue nettement la différence : l'OPB705 a une meilleure précision que l'OPB702. Nous utiliserons donc l'OPB705.

Estimation de l'incertitude angulaire due aux capteurs :

Si on estime l'incertitude à 0,5 mm, sur la piste intérieure de diamètre 0,9 pouce, cela correspondrait à une incertitude de 2,5°. Ce qui est acceptable au regard des normes de l'OMM.

La précision de la mesure de la direction a fait l'objet d'un test (§ 4.8.).

#### 4.4. la conception de la roue codeuse

##### 4.4.a. une roue codeuse à 6 bits

Principe : un disque porte des pistes concentriques, c'est la « roue codeuse ». Chaque piste comporte une alternance de secteurs réfléchissants et absorbants. Un capteur à réflexion par piste fournit l'information binaire. Une roue codeuse à  $n$  bits ( $n$  pistes) permet de distinguer jusqu'à  $2^n$  positions angulaires. Pour respecter les normes météo (résolution angulaire de  $10^\circ$ ), il faut donc une roue codeuse à 6 bits (le dernier bit ne sera que partiellement utilisé).

##### 4.4.b. le code binaire naturel est cause d'erreurs de codage, il faut utiliser le code Gray

les figures ci-dessous représentent deux roues codeuses à 5 bits utilisées en travaux pratiques au lycée.

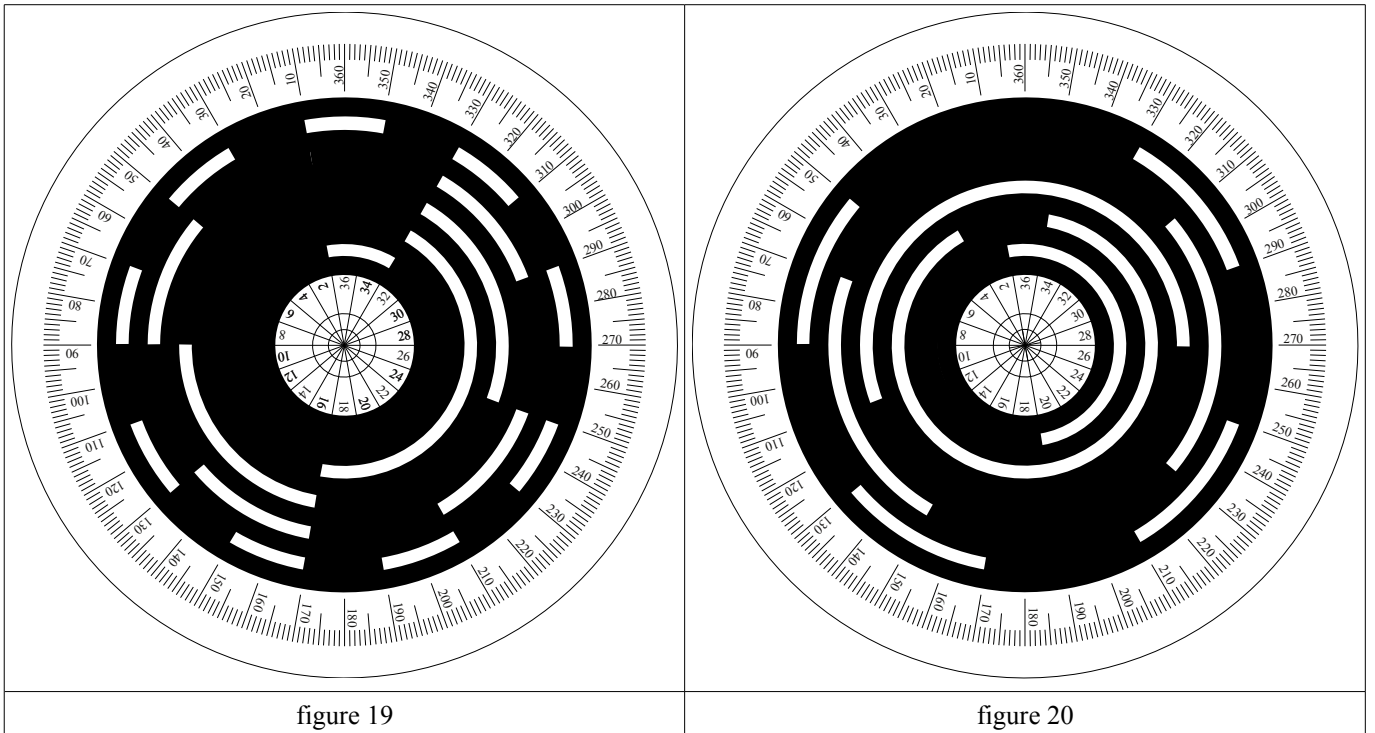


figure 19

figure 20

Sur la figure 19, la roue est codée en binaire naturel, le bit de poids fort étant à l'intérieur, la table de codage est la suivante :

secteur	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°	200°	...
code bin	00000	00001	00010	00011	00100	00101	00110	00111	01000	01001	...

En réalité, pour 1 transition sur 2, deux ou plusieurs bits changent de valeur simultanément. Ce qui est impossible matériellement. Ceci est cause d'erreurs de codage.

Par exemple pour passer de  $80^\circ$  à  $100^\circ$ , il peut apparaître parmi d'autres erreurs possibles :

- soit une position pour laquelle le code est 111 ce qui serait interprété comme  $160^\circ$
- soit une position pour laquelle le code est 000 ce qui serait interprété comme  $20^\circ$ .

Pour éviter ces erreurs, on utilise un codage binaire particulier dans lequel un seul bit change à chaque transition. Ce code s'appelle le code binaire réfléchi ou code Gray : il est appliqué sur la roue codeuse de la figure 20.

Pour coder 36 directions, il faut un code à 6 bits tel que représenté figure 21.

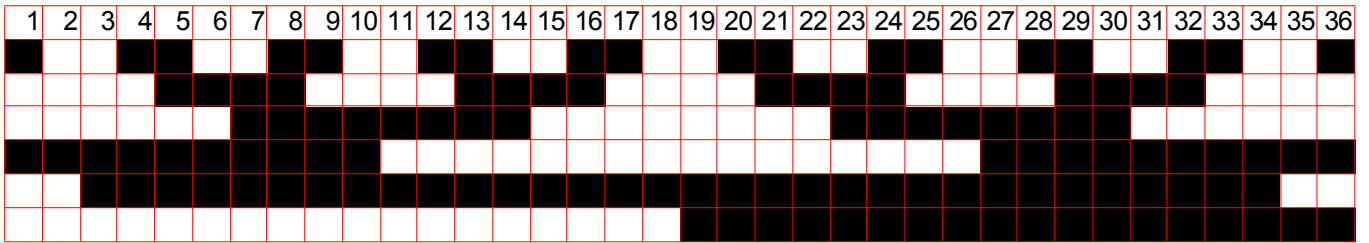


figure 21 (code : noir = 1)

#### 4.4.c. l'optimisation pour un encombrement minimal

Les capteurs optiques ont une épaisseur de 5,07 mm. Si on les place les uns à côté des autres, il faut espacer les pistes de 5mm ce qui donne un appareil relativement encombrant.

Il a donc été décidé d'espacer les pistes de 2,54 mm seulement et de placer les capteurs impairs à gauche de l'axe et les capteurs pairs à droite de l'axe.

Il a fallu, bien entendu, faire tourner les pistes impaires de 180° comme indiqué figure 22.

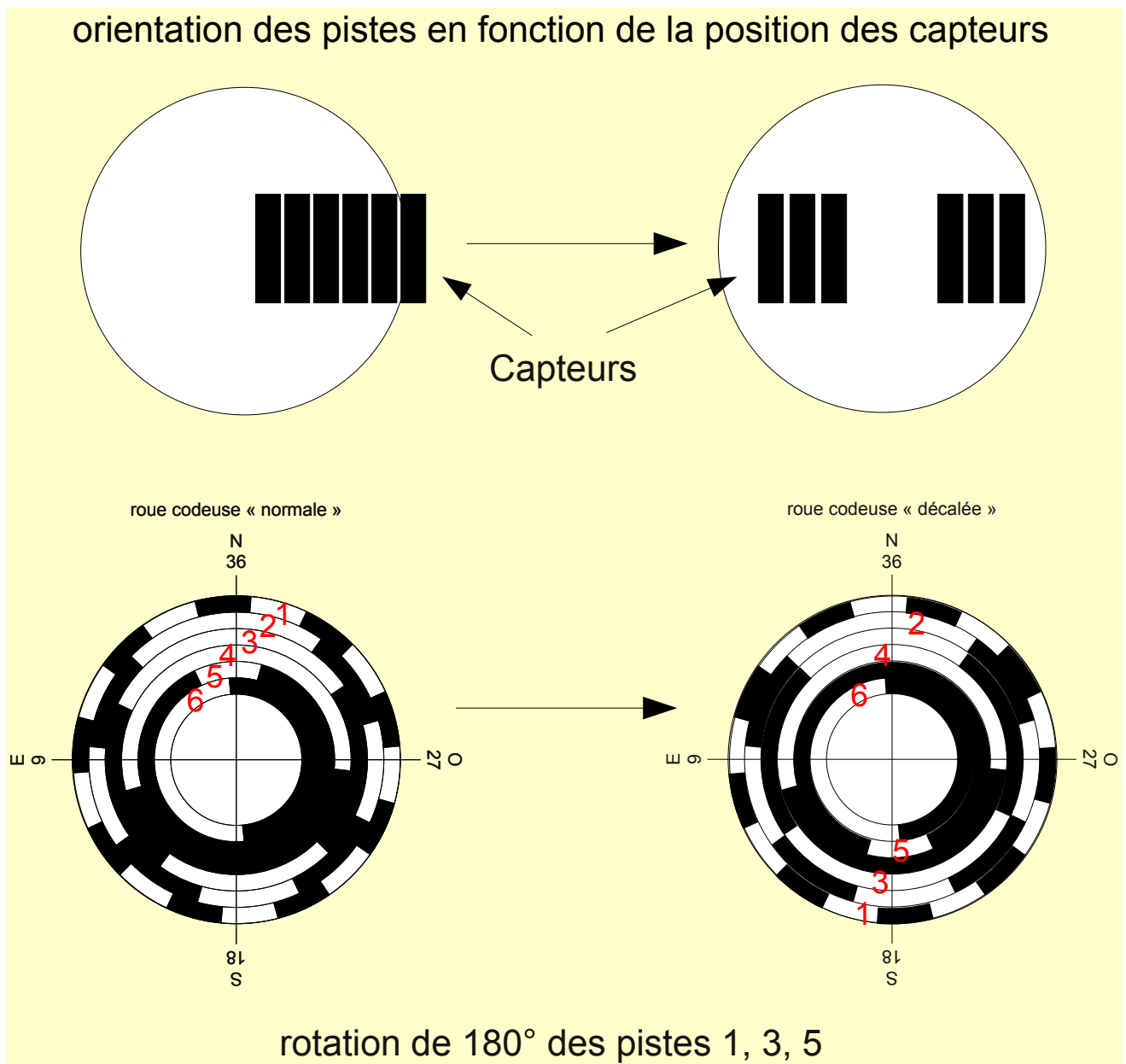


figure 22

La roue codeuse a ensuite été reportée, par exposition aux ultra-violets, sur une feuille d'aluminium revêtue d'une couche noire photosensible.

## 4.5. les cartes électroniques

Toujours dans le souci d'avoir un appareil compact, le circuit électronique, que nous avons conçu et réalisé est réparti sur deux circuits imprimés circulaires de 50mm de diamètre (un troisième étage portera la connectique sur l'appareil terminé).

Le circuit électronique (schéma figure 23) comporte un régulateur intégré de tension et deux sources de courant alimentant les émetteurs des capteurs optiques de façon que le courant reste constant malgré les fluctuations de température prévisibles (-20°C / +50°C).

Il comporte également les résistances de polarisation des photo-transistors et le sextuple trigger de Schmitt inverseur pour la mise en forme du signal.

club scientifique et technique du lycée Jules Viette

23/05/2009

### schéma des cartes électroniques de la girouette

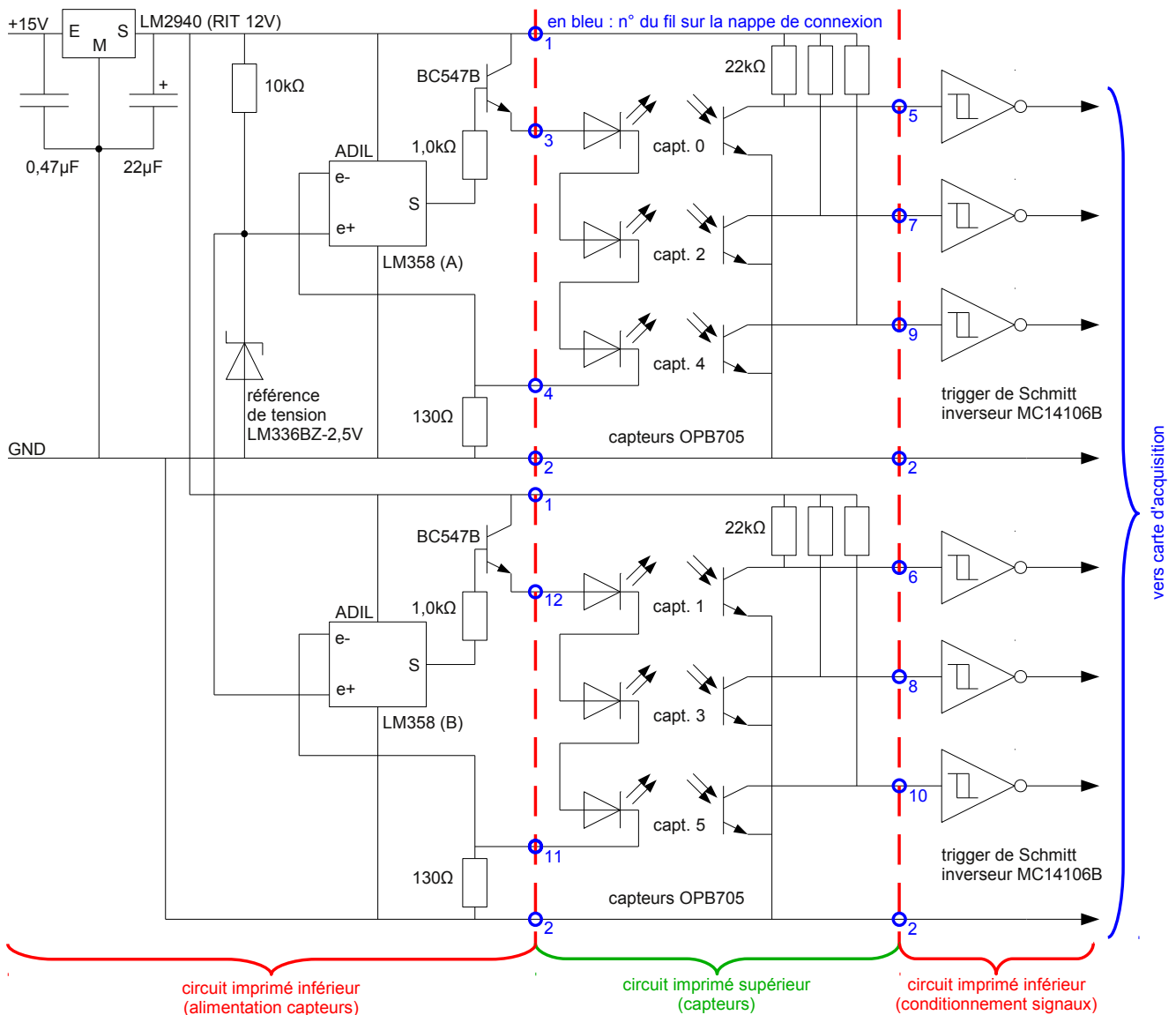


figure 23

## 4.6. le programme d'acquisition et de décodage (Labview)

Les 6 bits issus de la roue codeuse via le trigger de Schmitt sont envoyés sur les entrées logiques d'une carte d'acquisition. Le programme développé sous Labview (diagramme : annexe 6.1) permet de décoder le code Gray pour reconstituer la position angulaire de la girouette et la visualiser sur l'écran de l'ordinateur.



#### 4.7. la conception d'un banc de test motorisé piloté par ordinateur (Labview)

Vu la complexité de l'ensemble et vu que chaque membre de l'équipe avait travaillé sur une partie différente, il était indispensable de tester l'ensemble de l'appareil assemblé : roue codeuse, cartes électroniques, carte d'acquisition et programme Labview.

Il nous est apparu très vite qu'un test manuel avec lecture visuelle des angles ne serait pas très précis.

Nous avons donc décidé d'entraîner la roue codeuse par un moteur pas à pas piloté par un programme Labview, afin d'avoir une procédure de test complètement automatisée.

Nous avons donc conçu à l'aide du logiciel de CAO / DAO Solidworks les pièces mécaniques du banc d'essai.

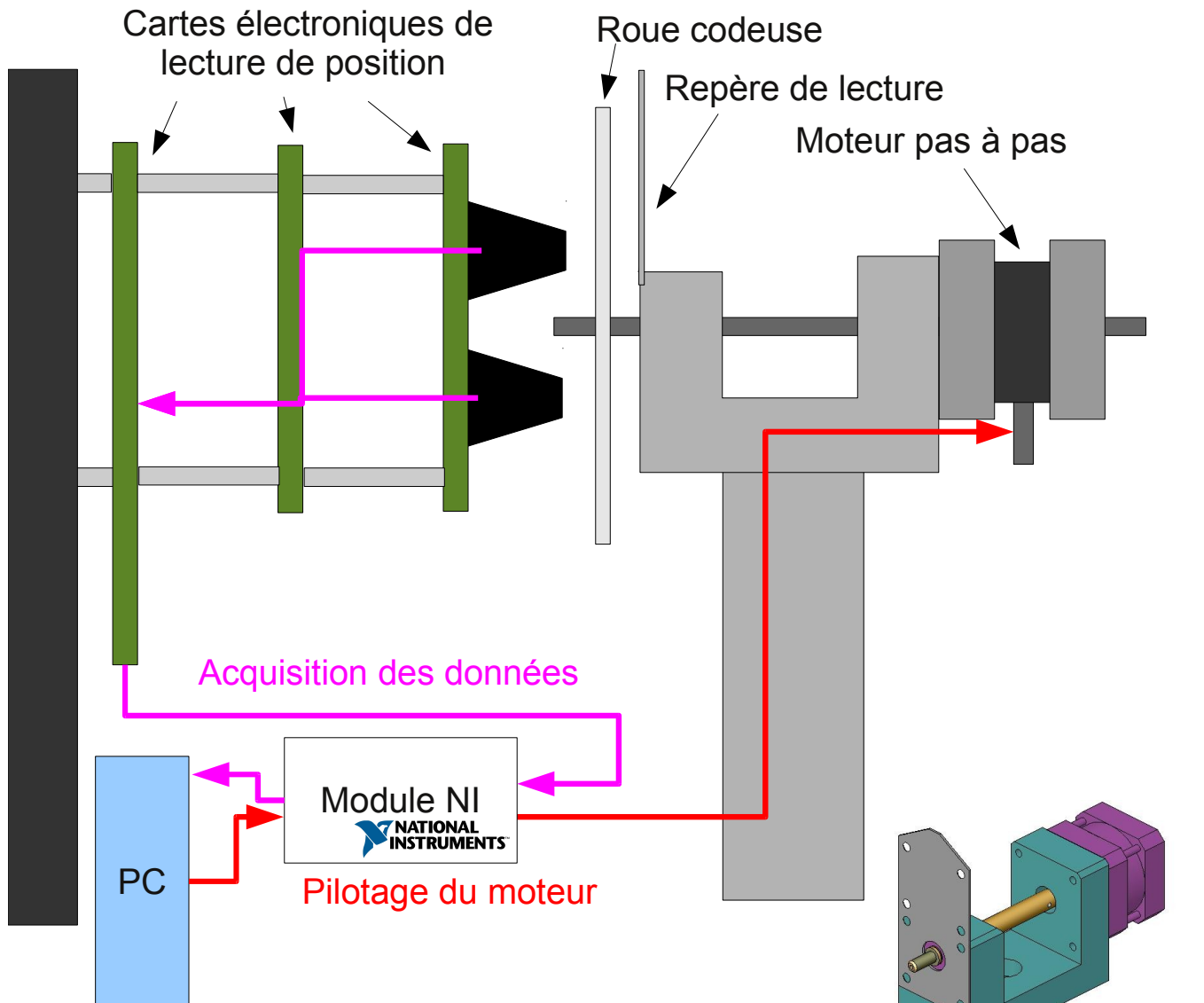


figure 24

L'ensemble du banc de test est schématisé ci-dessus (figure 24). N'apparaît pas, sur le schéma, la carte électronique d'alimentation et de commande du moteur pas à pas.

Les pièces que nous avons dessinées, ont été usinées au lycée par un professeur et des étudiants en productique.

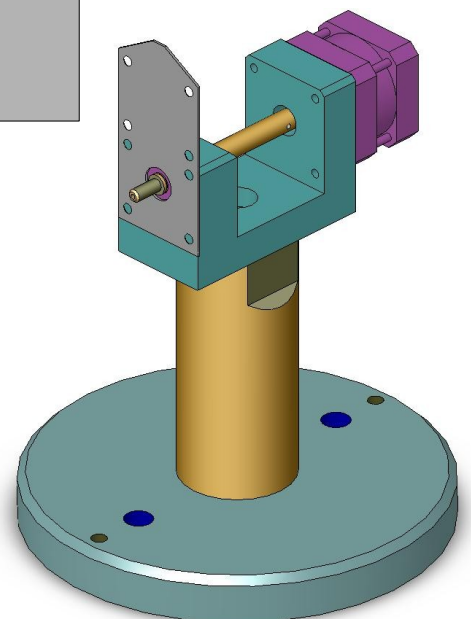


figure 25

## 4.8. le résultat des tests

Le graphe ci-dessous (figure 26) représente les données acquises par le programme de test :

En abscisses, la position angulaire réelle de la roue codeuse, calculée en multipliant le nombre d'impulsions envoyées au moteur par la valeur du pas ( $0,9^\circ$  en mode demi pas).

En ordonnées, le secteur angulaire issu du décodage du code Gray lu sur la roue codeuse.

### 4.8.a. mauvaise surprise

## Test du capteur :

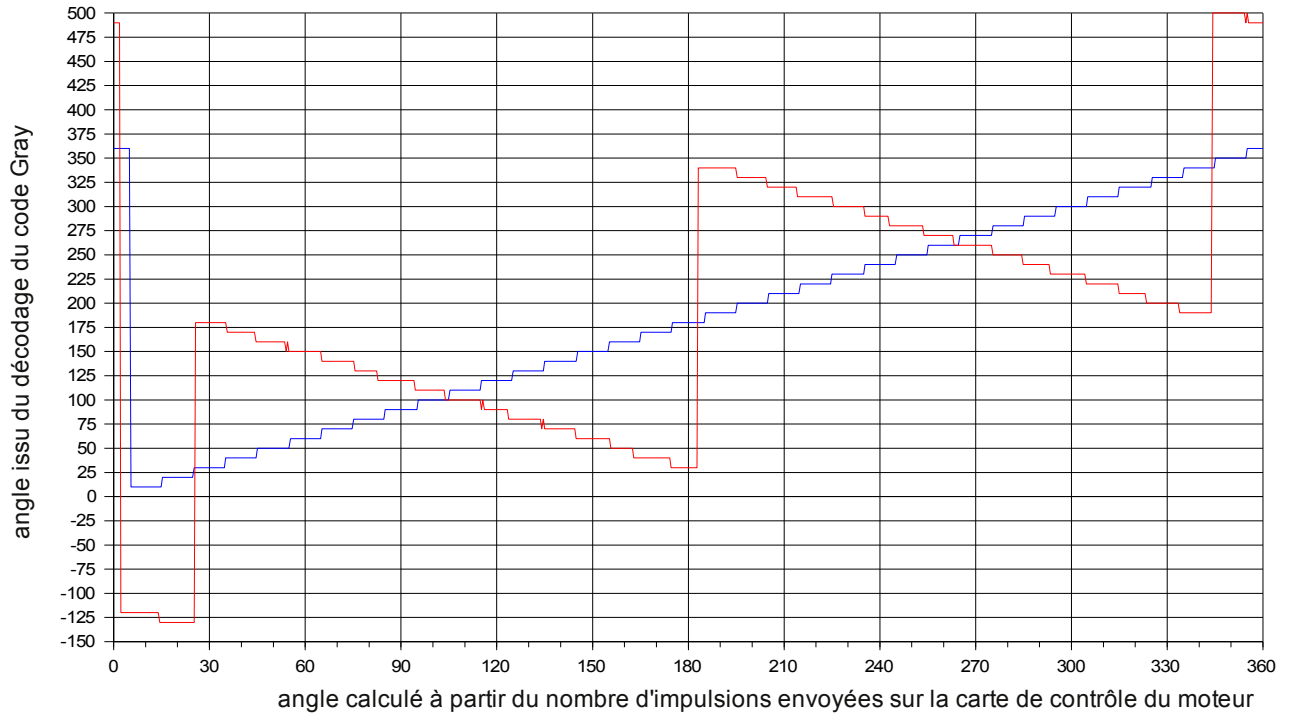


figure 26

En bleu la courbe de test attendue (idéale)... En rouge la courbe réelle obtenue !

### 4.8.b. correction

Après deux heures de sueurs froides, on a trouvé l'origine du défaut : Initialement, Mathias, qui avait dessiné la roue codeuse, avait choisi comme convention noir = 1. Guillaume, qui avait réalisé les cartes électroniques, avait choisi l'inverse : noir = 0.

Il avait donc été décidé d'inverser les 6 pistes de la roue codeuse. Et nous avons découvert que la piste 4 n'avait pas été inversée (figure 27).

Sur la figure 27, la partie surlignée en rouge est noire au lieu d'être blanche et la partie surlignée en vert est blanche au lieu d'être noire !

Nous n'avions plus d'aluminium photosensible sous la main. Alors, on s'est souvenus des explications données par le guide lors de la visite du CERN à Genève, le 8 mai 2009 : « *pour réparer une erreur, quand on ne peut pas modifier le hardware, on corrige l'erreur sur le software* ».

Ce qui fut fait très rapidement sur le programme Labview (voir annexe 7.1).

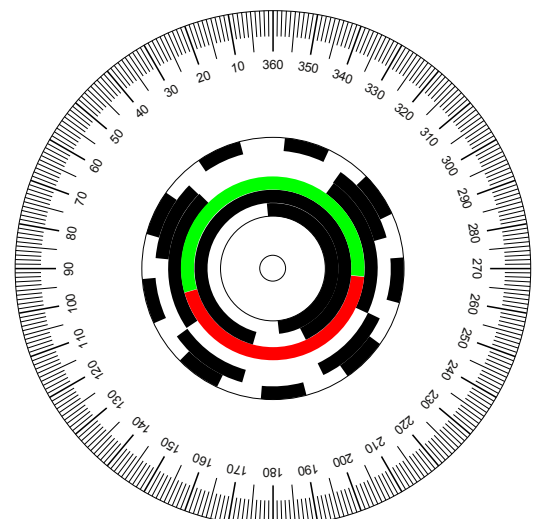


figure 27

### 4.8.c. nouveaux résultats

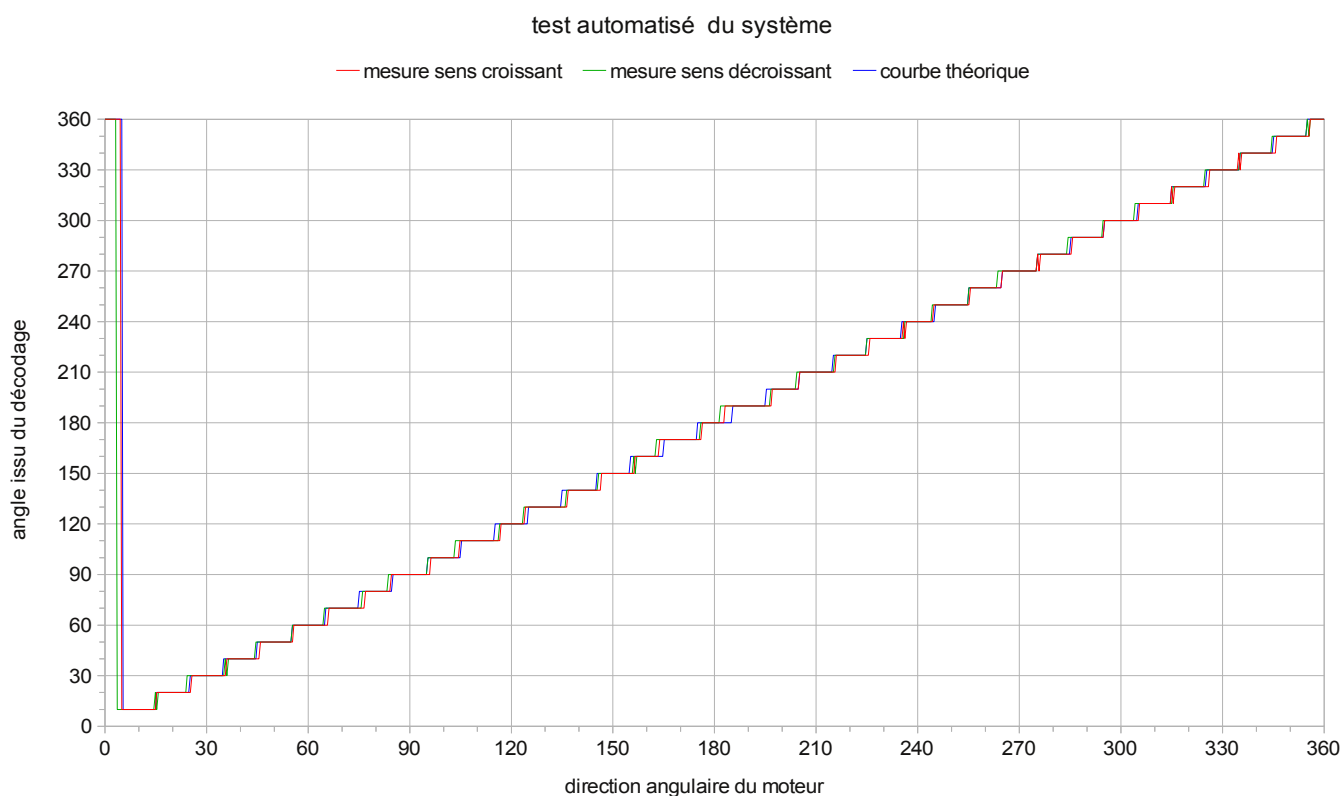


figure 28

Commentaires :

- Il est normal que les courbes commencent à 360° et pas à zéro. En météo, le code 00 est un code d'erreur réservé au « vent calme », c'est à dire insuffisant pour orienter la girouette.
- La plus grande erreur se produit au passage entre 180° et 190° : cela correspond, **comme prévu**, (voir fin de la partie 4.3) au changement de valeur du bit de la piste intérieure. L'erreur est de 3,5°, nous avons estimé l'incertitude liée au capteur à 2,5°. Il est possible que s'y ajoutent d'autres causes d'erreurs liées au positionnement du capteur, ou au dessin de la roue codeuse, par exemple.
- On observe un léger décalage, entre les deux sens de rotation du moteur, qui résulte de l'hystérésis des trigger de Schmitt (il est de 1,35° au maximum).
- On observe parfois un effet de rebond : on effectue 800 acquisitions au total : une mesure juste après chaque commande du moteur (dans ce cas, le moteur, peut, par inertie, avoir légèrement dépassé sa position d'équilibre) et une mesure intercalaire (moteur en position d'équilibre).

Conclusion : **le système de mesure de la direction est validé !**

### 4.9. le repérage, in situ, du nord géographique

Une telle précision angulaire ne sert à rien si on n'oriente pas précisément la référence de l'appareil en direction du nord géographique.

À cet effet, un alignement, à l'aide d'une petite lunette, a été effectué entre une led fixée sur le rebord d'un toit de bâtiment, à 7m de hauteur et l'étoile polaire. L'écart de celle-ci avec le nord géographique est inférieur à 1°.

Les repères ont été reportés sur le sol à l'aide d'un fil à plomb (en absence de vent !) et pérennisés par des vis chevillées dans l'enrobé. Ces repères serviront à orienter vers le nord l'articulation du mât. En tout état de cause l'erreur cumulée d'orientation devrait être inférieure à  $\pm 5^\circ$  conformément aux règles de Météo France.

## **5. ce qu'il nous reste à faire**

### **5.1. conception et réalisation des boîtiers et des rotors des appareils**

Les boîtiers seront réalisés en alliage d'aluminium et les axes en acier inoxydable (pour résister à la corrosion). Une attention particulière sera portée à la protection des appareils contre les intempéries et à leur maintenabilité. Des esquisses sont déjà réalisées.

### **5.2. conception d'une carte électronique d'isolation galvanique (protection contre la foudre)**

Le mât de mesure, le boîtier des appareils et le blindage des gaines étanches seront reliés à la terre. Une carte électronique en cours de conception, assurera l'isolation galvanique jusqu'à 5000V à l'entrée de la carte d'acquisition.

### **5.3. équipement et mise en place du mât de mesure**

Le mât de mesures, fabriqué par la section de carrossiers-constructeurs du lycée professionnel, sera équipé (gainés, câblage, boîtiers de raccordement, embases de fixation des appareils) avant sa mise en place prévue au printemps.

### **5.4. début de la campagne de mesures**

Prévu avant les vacances d'été.

### **5.5. traitement statistique des données pour comparaison avec les données Météo France**

Le volume des données à traiter est beaucoup trop important pour utiliser un tableur. Nous avons prévu d'utiliser le logiciel libre Python. Deux membres du club sont en train de se familiariser avec.

Une anecdote : nous avons découvert que le calcul des directions moyennes n'est pas aussi évident qu'il y paraît, à première vue :

la moyenne entre  $170^\circ$  et  $190^\circ$  est égale à  $180^\circ$  (soit vent du sud)

mais la moyenne entre  $10^\circ$  et  $350^\circ$  est aussi égale à  $180^\circ$  ce qui donne un vent du sud au lieu d'un vent du nord.

Nous avons trouvé la solution dans une documentation de Météo France : il faut passer par les moyennes des sinus et cosinus ! (voir le programme correspondant développé avec le logiciel Python, annexe 7.5).

### **5.6. détermination du potentiel éolien**

Le travail se poursuivra durant la prochaine année scolaire pour la détermination du potentiel éolien avec les conseils de Météo France et du bureau d'études de l'entreprise EOLE-RES.

## 6. conclusion : une équipe passionnée aux compétences multiples

Ce projet a bien progressé, même s'il n'est pas arrivé à son terme ultime : la fabrication des appareils de mesure ainsi que l'acquisition et le traitement des données (\*).

Cela n'a été possible que grâce à la motivation de l'équipe qui a consacré, depuis septembre 2008, une cinquantaine de séances de travail de 4 heures au projet (principalement le samedi matin et 5 pendant les vacances scolaires). Les 6 élèves de l'équipe se sont partagés le travail :

**Joris** a travaillé sur les schémas électroniques, la conception et la fabrication des circuits imprimés, le montage des composants, avec le concours de **Pierre**.

**Pierre** et **Rémi** ont travaillé à la conception et au dessin des pièces mécaniques à l'aide du logiciel Solidworks.

**Florence** et **Matthieu** se sont plongés dans le logiciel Labview et ont réalisé les programmes de pilotage du moteur pas à pas et d'acquisition/décodage de la direction du vent.

**Matthieu** et **Pierre** se sont chargés de partir à la découverte du logiciel Python pour assurer le traitement statistique des données et la détermination des moyennes.

**Rémi** s'est chargé de la rédaction du mémoire et du diaporama.

**Thomas** a récemment rejoint l'équipe et s'est investi rapidement. Aidé de **Joris**, il a travaillé sur les cartes électroniques et entrepris la sélection d'optocoupleurs qui permettront de protéger ordinateur et carte d'acquisition en cas de foudre.

Les deux animateurs **Corinne** et **François**, ont essayé de répondre à nos questions, quand ils pouvaient, car ils n'en savaient pas toujours beaucoup plus que nous !!

N'oublions pas nos « anciens » qui ont œuvré l'an dernier sur ce même projet : **Mathias**, **Guillaume** et **Clément**, aujourd'hui en filières post-bac.

Bien entendu, chacun présentait régulièrement l'avancement de son travail à l'ensemble de l'équipe. D'autre part, certaines séances cruciales ont été menées collectivement : tests sur les capteurs, essais du moteur pas à pas et essais de l'ensemble du système à la fin, bien entendu !

\* le travail sera poursuivi par le club scientifique et technique durant l'année scolaire.