

## **ANNEXE I**

### **BANCS D'ESSAI**

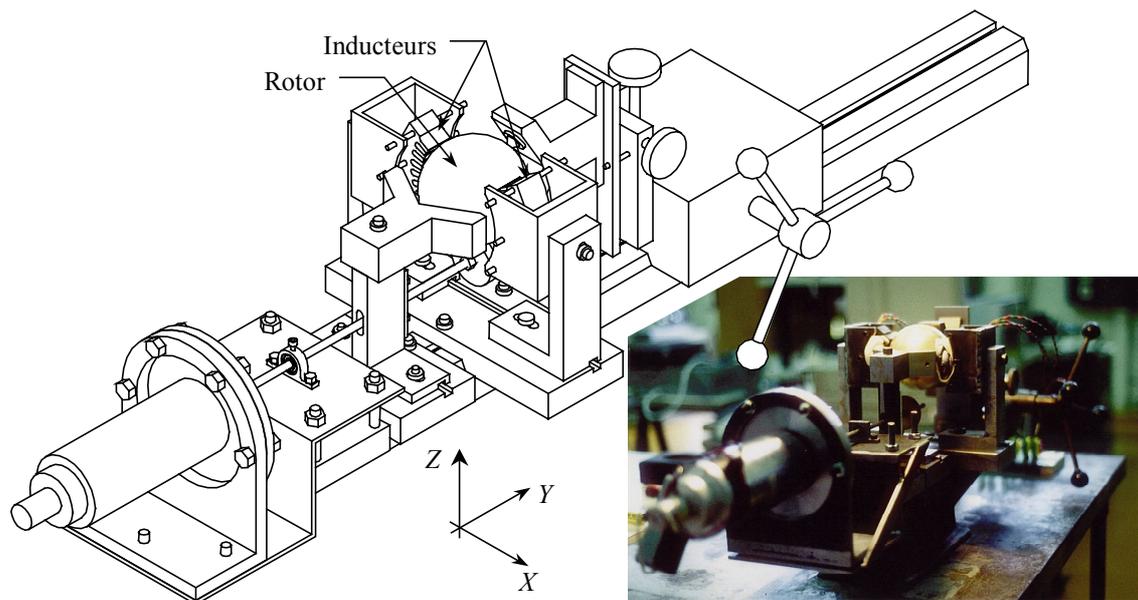
La phase expérimentale (cf. Chapitre 8) a nécessité la conception et la fabrication de plusieurs bancs d'essai destinés à mettre en œuvre et à caractériser quelques-unes des solutions envisagées aux problèmes d'actionnement et de guidage.

Cette annexe reprend une description détaillée de ceux-ci. Le premier, appelé banc d'essai électrique, sert à l'étude des inducteurs à un degré de liberté. Le second, dénommé banc d'essai mécanique, permet, quant à lui, la caractérisation des paliers à billes et des billes porteuses. Le dernier enfin, désigné banc d'essai pneumatique, sert à l'étude des paliers aérostatiques.

#### **1. Banc d'essai électrique**

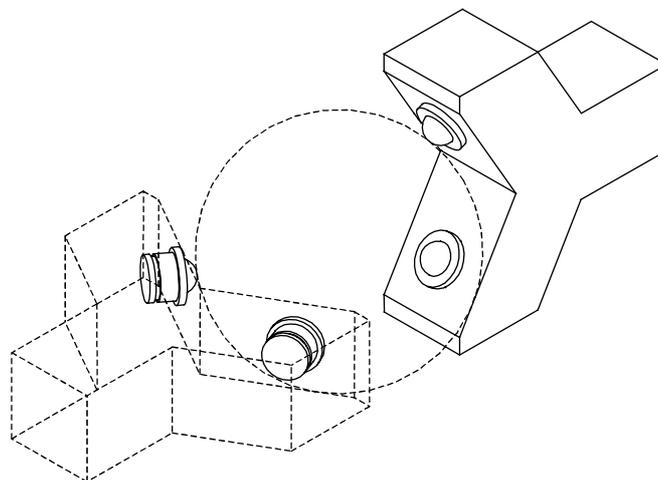
Ce premier banc d'essai (Fig. 8.1), mettant en œuvre une structure composée de deux inducteurs à un degré de liberté disposés autour d'un rotor sphérique, a été conçu de manière à remplir les quatre fonctions suivantes :

- le guidage du rotor ;
- le support des inducteurs ;
- le positionnement relatif du rotor et des inducteurs ;
- la prise des mesures nécessaires à la validation des modèles.



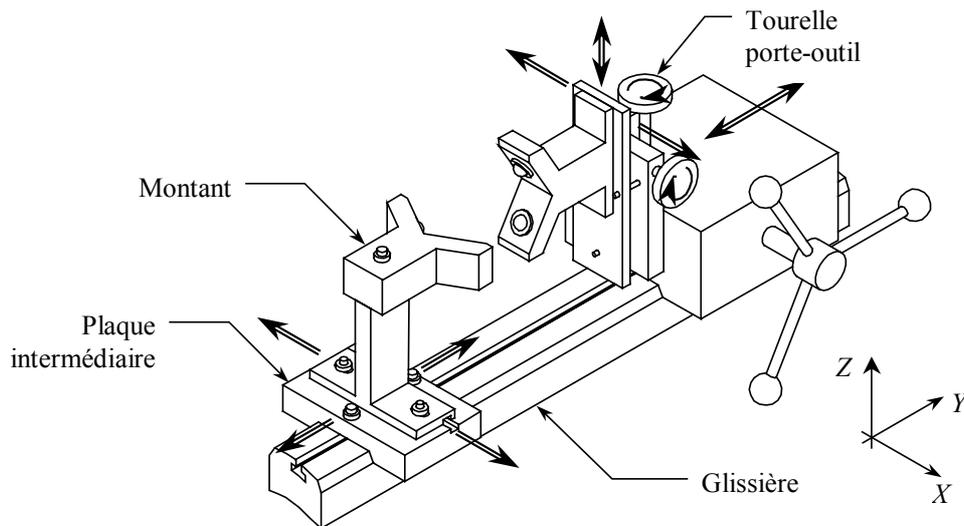
**Fig. 8.1. Ensemble constitué du banc d'essai et du prototype**

Le guidage du rotor correspond à l'une des fonctions principales identifiées lors de l'analyse fonctionnelle menée au début du processus de conception (cf. Chapitre 2, § 2). Cependant, le but premier du dispositif expérimental n'étant pas de tester un type particulier de palier, nous nous sommes limités à un système élémentaire formé de quatre billes porteuses logées deux à deux dans des pièces fixant leur position relative (Fig. 8.2).



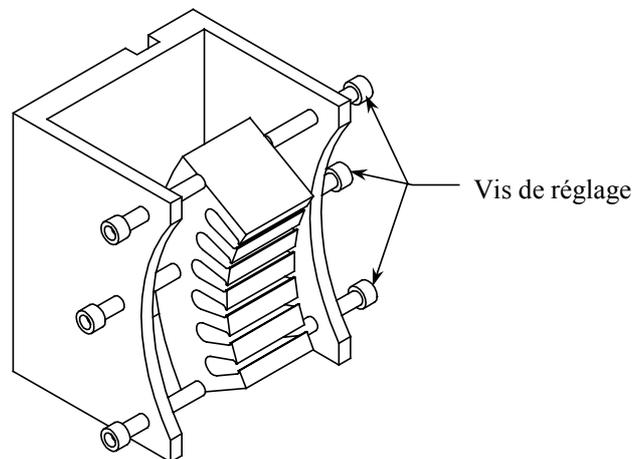
**Fig. 8.2. Dispositif de guidage du rotor**

Afin d'assurer le positionnement et le réglage de ces deux pièces, nous avons profité de la glissière et de la tourelle porte-outil d'un ancien tour revolver (Fig. 8.3). Alors que la glissière permet le guidage de toutes les pièces suivant l'axe  $Y$ , la tourelle porte-outil permet le positionnement de l'une des deux pièces de guidage du rotor suivant les trois directions principales. La seconde pièce, fixée sur un montant, est quant à elle guidée et positionnée suivant l'axe  $X$  par rapport à une plaque intermédiaire, elle-même guidée et positionnée suivant l'axe  $Y$  grâce à la glissière du tour.



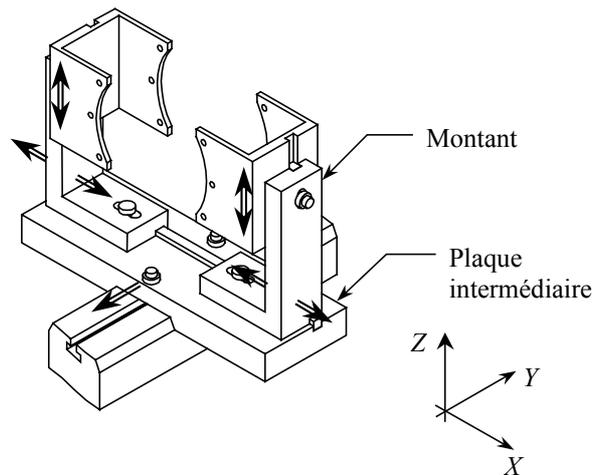
**Fig. 8.3. Élément de positionnement et de réglage du dispositif de guidage du rotor**

Les pièces destinées au support des inducteurs jouent également un rôle dans leur positionnement (Fig. 8.4). En effet, le banc d'essai dans lequel viennent se fixer ces pièces ne permet d'en ajuster ni l'orientation absolue, ni l'alignement relatif des deux inducteurs. C'est le réglage des différentes vis de serrage qui permet de modifier finement la position et l'orientation de l'inducteur tout en le soutenant.



**Fig. 8.4. Dispositif de support et de positionnement des inducteurs**

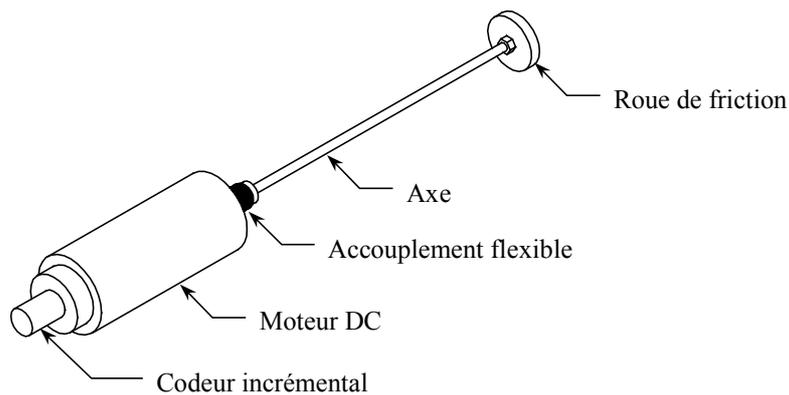
Ces pièces jouissent également d'un dispositif permettant de modifier leur élévation relative ainsi que leur position par rapport au rotor (Fig. 8.5). Il se compose de deux montants guidés et positionnés selon l'axe  $X$  par rapport à une plaque intermédiaire, elle aussi guidée et positionnée suivant l'axe  $Y$  grâce à la glissière du tour. Ces deux montants sont pourvus d'une glissière et d'une vis de serrage qui doit permettre un réglage suivant l'axe  $Z$ .



**Fig. 8.5. Élément de positionnement et de guidage du dispositif de support des inducteurs**

L'objectif du système de mesure à intégrer au banc d'essai est de permettre la validation des modèles électromagnétiques. Celle-ci se faisant sur base de la comparaison des caractéristiques couple-vitesse angulaire rotorique mesurées et prédites, il faut pouvoir mesurer le couple développé par le rotor pour des vitesses du rotor allant de zéro à la vitesse de synchronisme.

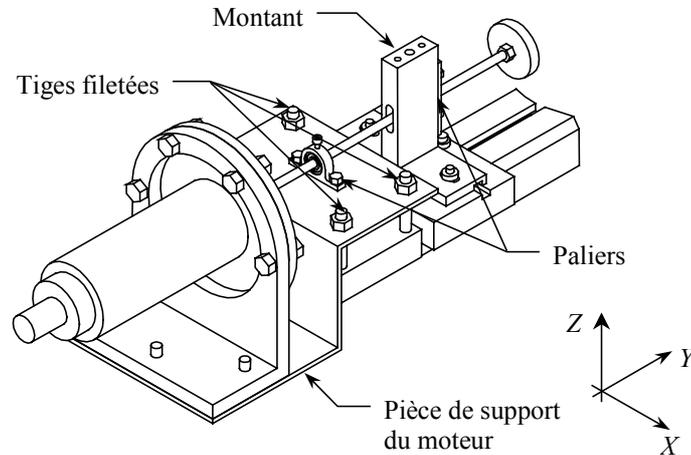
Le dispositif utilisé pour effectuer ces mesures est formé d'une roue de friction, en contact avec le rotor, montée sur un axe accouplé à un moteur DC (Fig. 8.6). Ce moteur est alimenté par un système de commande permettant d'imposer une vitesse donnée, grâce à un codeur incrémental, tout en affichant le couple développé, via une mesure du courant d'induit.



**Fig. 8.6. Chaîne de mesure**

L'intégration de cette chaîne de mesure au sein du banc d'essai a été réalisée de manière à permettre son guidage et son positionnement par rapport au rotor (Fig. 8.7). Ainsi, la pièce supportant le moteur peut être positionnée suivant l'axe Z grâce à quatre tiges filetées. La plaque sur laquelle sont ancrées ces tiges filetées peut quant à elle être positionnée suivant l'axe Y grâce à la glissière du tour. L'axe de transmission est pour sa part guider par deux paliers. Le premier solidaire de la pièce de support du moteur, le

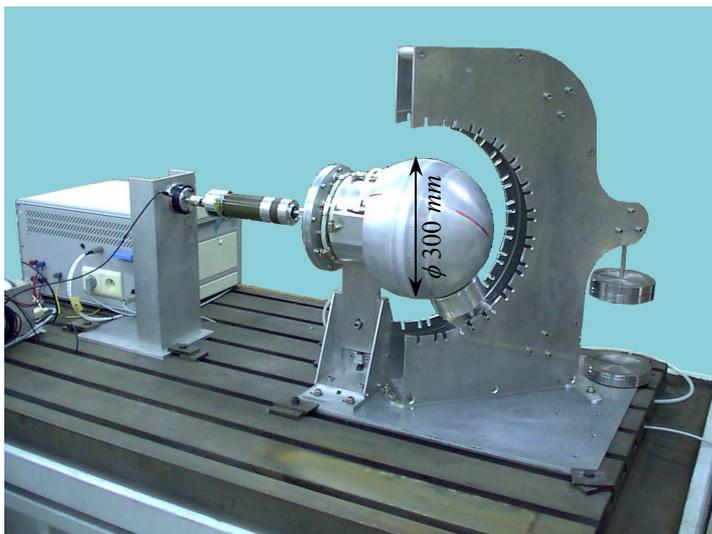
second attaché, via une pièce permettant de régler sa position suivant l'axe Z, sur le montant au travers duquel passe l'axe.



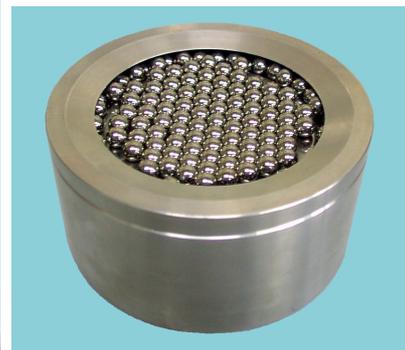
*Fig. 8.7. Intégration de la chaîne de mesure au banc d'essai*

## 2. Banc d'essai mécanique

Ce second banc d'essai (Fig. 8.8 -a-) a été conçu et réalisé en vue de relever les grandeurs nécessaires au calcul de la puissance mécanique absorbée par les billes porteuses ainsi que les paliers à billes (Fig. 8.8 -b-).



-a-



-b-

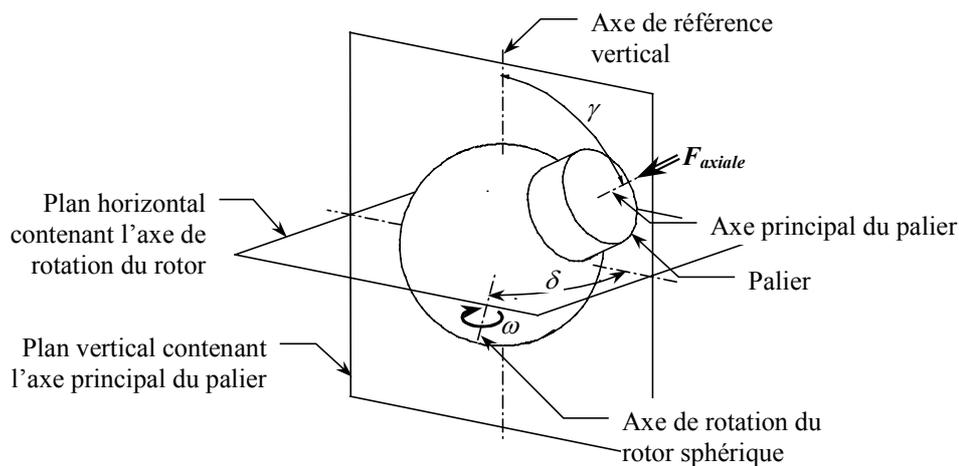
*Fig. 8.8. Banc d'essai mécanique (-a-) et prototype de paliers à coupelle de recyclage (-b-)*

Afin d'estimer au mieux leurs performances, il a été pensé de manière à permettre la modification de paramètres en relation avec les conditions réelles dans lesquelles le

palier pourrait être utilisé. Ainsi, le banc d'essai intègre à la fonction principale de mesure de la puissance absorbée par le palier, la possibilité de faire varier :

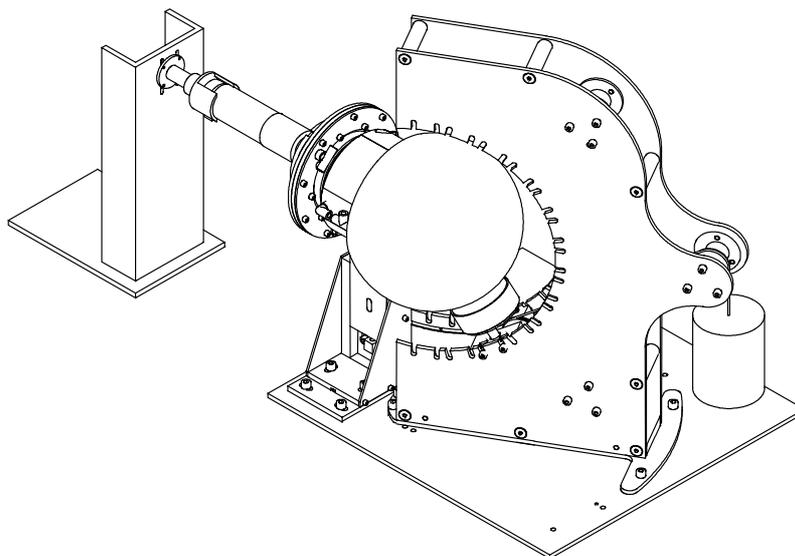
- la charge appliquée sur le palier ( $F_{axiale}$ ) ;
- la vitesse de rotation de la sphère en contact avec le palier ( $\omega$ ) ;
- l'orientation relative de l'axe de rotation du rotor et de l'axe du palier ( $\delta, \gamma$ ) ;

supposant que l'axe de rotation du rotor est compris dans un plan horizontal (Fig. 8.9).



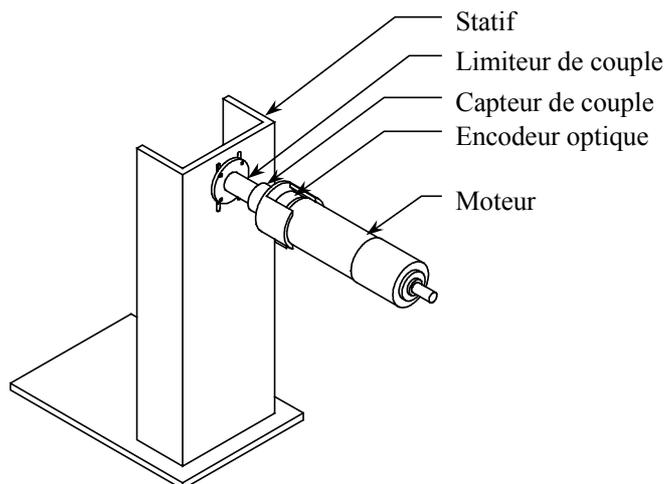
**Fig. 8.9. Illustration des paramètres de mise en œuvre du palier**

La solution, choisie au terme d'une démarche de conception à part entière (Fig. 8.10), peut être décrite via les moyens mis en œuvre pour assurer la mesure de la puissance absorbée, calculée via le produit du couple appliqué sur le rotor et de sa vitesse angulaire, et le réglage des différents paramètres précités.



**Fig. 8.10. Représentation du banc d'essai mécanique**

La mesure du couple est réalisée à l'aide d'un capteur de couple statique monté sur un statif et accouplé au moteur d'entraînement, mesurant de la sorte son couple de réaction (Fig. 8.11). Afin de protéger ce capteur contre toute surcharge accidentelle, un limiteur de couple est inséré entre le capteur et le statif. La vitesse angulaire du moteur est, quant à elle, obtenue grâce à un encodeur optique directement monté sur l'axe du moteur.



*Fig. 8.11. Dispositif de mesure du couple et de la vitesse*

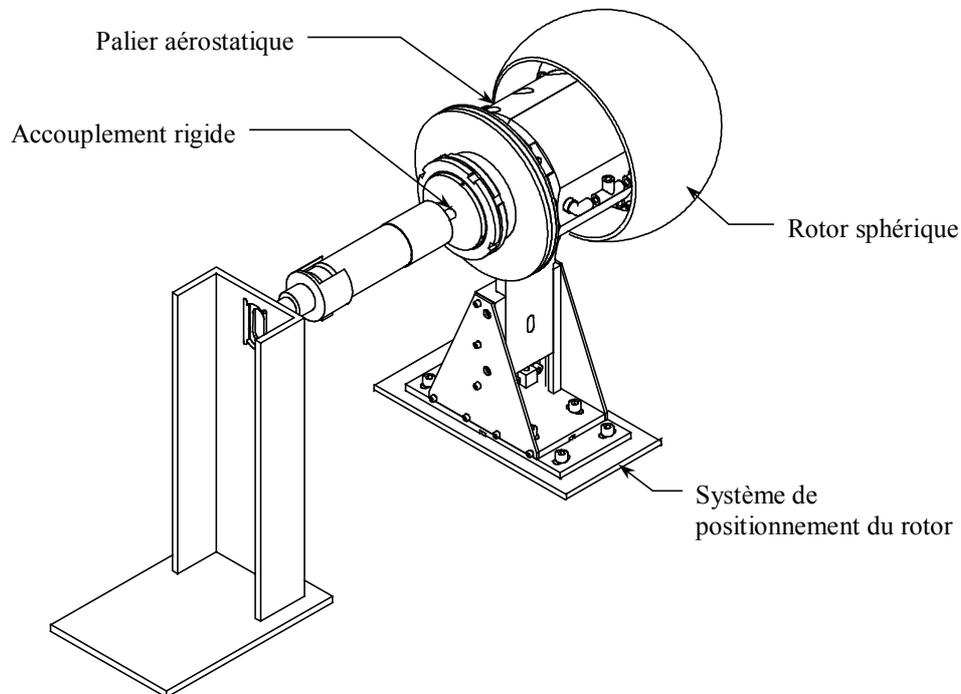
En aval de ce dispositif, nous avons été contraints de placer un palier destiné à supporter le poids propre du rotor et la charge transmise par le palier testé. Ce palier se trouvant sur la chaîne de mesure entre le palier et le capteur, il introduit une erreur sur la mesure. Pour pouvoir négliger celle-ci, nous avons opté pour un palier de type aérostatique intégrant un palier cylindrique et deux butées (Fig. 8.12).

Le capteur de couple ne pouvant par ailleurs reprendre que de faibles efforts de flexion, nous avons profité du palier aérostatique pour reprendre le poids du moteur en solidarissant les axes du rotor et du moteur, réalisant ainsi le support et le guidage du moteur via son axe et non via son stator.

Enfin, afin d'éviter toutes contraintes sur l'axe formé du limiteur, du capteur et du moteur, nous avons inséré dans l'ensemble un accouplement flexible, non illustré, capable de reprendre les quelques erreurs d'alignement entre le statif et le palier aérostatique.

Pour assurer le réglage de la vitesse de rotation du rotor, nous avons évidemment profité de la mesure du codeur incrémental, utilisant celle-ci dans une boucle de régulation. Dans cette dernière, l'alimentation à découpage utilisée pour alimenter le moteur d'entraînement à courant continu est commandée via le système de contrôle dSPACE® sur lequel est implémenté le régulateur. Il réalise donc l'acquisition des

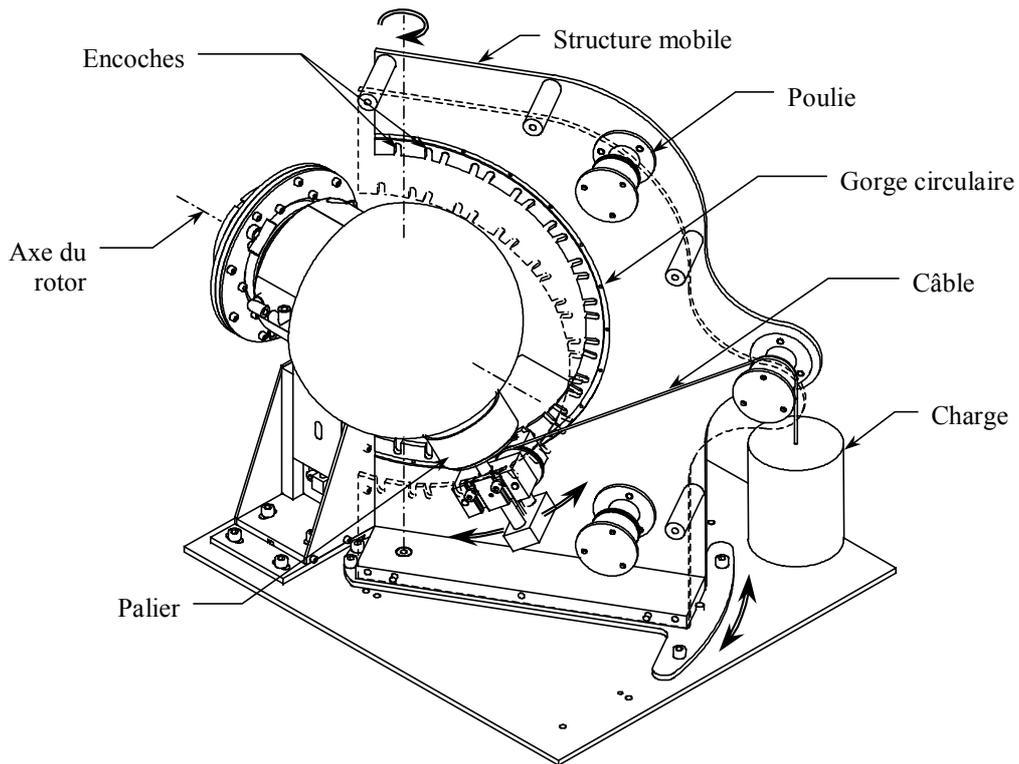
signaux produits par l'encodeur pour en déduire la vitesse, la comparer à la consigne introduite via le PC hôte et enfin produire les signaux de commande destinés au hacheur.



**Fig. 8.12. Support du moteur et du rotor et du moteur**

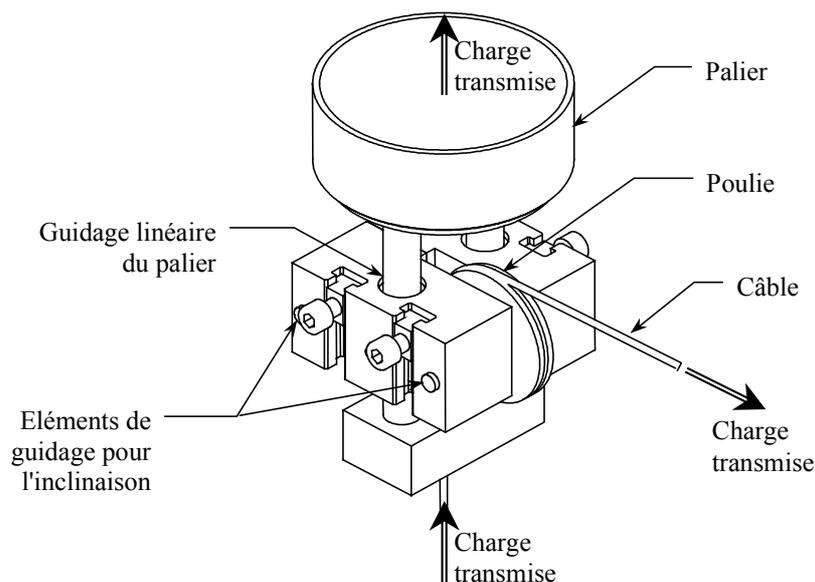
La solution retenue pour assurer le réglage de l'orientation relative de l'axe du palier et de l'axe de rotation du rotor distingue l'inclinaison du palier par rapport à la position horizontale, d'une part, et l'orientation de l'axe du palier, projeté sur le plan horizontal, par rapport à l'axe du rotor, d'autre part (Fig. 8.9). Il s'agit donc de dissocier le réglage des deux angles  $\gamma$  et  $\delta$ .

Concernant l'inclinaison, nous avons imaginé une structure entourant le rotor. Sur celle-ci, une gorge circulaire assure le guidage du dispositif supportant le palier tandis qu'une série d'encoches permettent de la bloquer, à l'aide de vis de serrage, dans quelques positions déterminées (Fig. 8.13). L'inclinaison du palier peut ainsi varier, par pas de  $15^\circ$ , entre  $+90^\circ$  et  $-90^\circ$  autour de l'horizontale. Quant au réglage de l'orientation par rapport à l'axe du rotor, il est obtenu via la rotation de toute la structure autour d'un axe vertical passant par le centre. Le guidage en rotation est obtenu grâce à un palier lisse solidaire du socle. Une série de trous filetés pratiqués sur ce même socle permettent de maintenir la structure dans quelques positions prédéfinies. Il est ainsi possible de modifier l'orientation du palier de  $0^\circ$ , les axes du palier et du rotor étant alignés, à  $90^\circ$  par pas de  $15^\circ$ .



*Fig. 8.13. Dispositif d'orientation et de mise en charge du palier*

Le dispositif de mise en charge, enfin, consiste en une série de masses dont le poids est transmis au palier par un système de câbles et de poulies (Fig. 8.13). Sur le dispositif de support du palier (Fig. 8.14), assurant également le guidage linéaire du palier, nous avons placé une dernière poulie afin d'appliquer la charge transmise par le câble dans l'axe du palier.

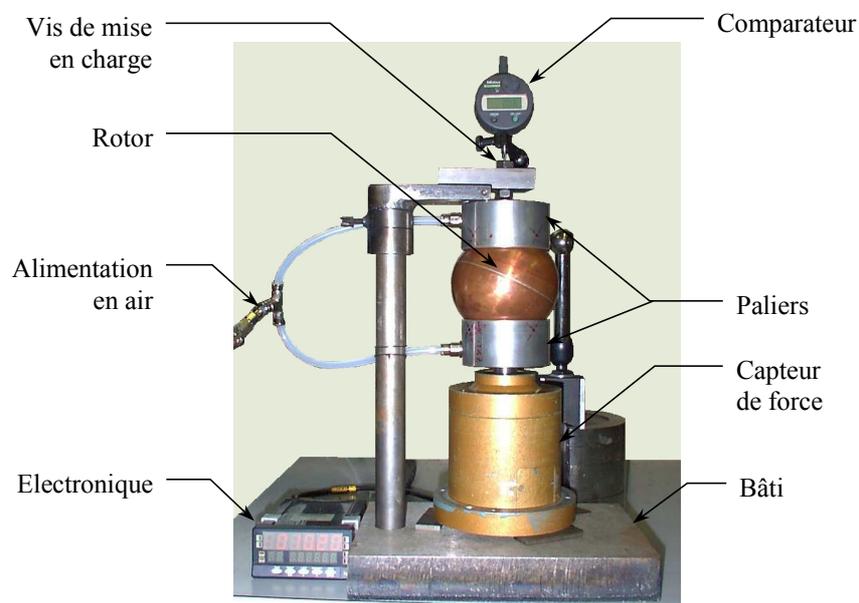


*Fig. 8.14. Dispositif de mise en charge et de guidage du palier*

### 3. Banc d'essai pneumatique

Le troisième banc d'essai que nous avons conçu et réalisé est destiné à mettre en œuvre les paliers aérostatiques tout en mesurant les variables nécessaires leur caractérisation. A cette fin, il doit donc permettre, outre la mise en charge du palier, le relevé de la consommation, de l'épaisseur du coussin d'air et de la charge appliquée, naturellement.

La solution retenue (Fig. 8.15) met en œuvre deux paliers aérostatiques identiques placés de part et d'autre d'un rotor sphérique. Nous évitons ainsi l'usinage des pièces supplémentaires en utilisant les rotors, déjà produits pour mener les essais d'actionnement, tout en observant leur influence sur le fonctionnement du palier.



*Fig. 8.15. Banc d'essai destiné mettant en œuvre les paliers aérostatiques*

Dans cette configuration, la mise en charge est obtenue grâce à une vis solidaire de la structure du bâti et dont la tête appuie au centre du palier supérieur, le long de son axe. La mesure de la charge est quant à elle réalisée via un capteur de force placé sous le palier inférieur. Ce capteur de force supportant l'ensemble formé par les deux paliers et le rotor, il mesure en plus de la force appliquée par la vis, le poids propre de ces éléments. Pour l'alimentation du capteur ainsi que l'acquisition et le traitement de ses signaux, nous avons utilisé une électronique commune, pourvue d'un afficheur digital.

La mesure de l'épaisseur du film d'air séparant le rotor du palier a été obtenue à l'aide d'un comparateur attaché au bâti et mesurant le déplacement de la tête de la vis de mise en charge. En procédant de la sorte, la mesure correspond effectivement à l'épaisseur du film d'air mais diminuée de la déformation subie par les pièces soumises à la charge appliquée par la vis, à savoir, le capteur, les paliers, le rotor et la vis elle-

même. Pour corriger cette erreur, nous avons effectué une mesure préalable de la déformation de ces éléments en fonction de la charge et sans alimenter les paliers. Le déplacement ainsi mesuré correspond alors à la correction à apporter aux mesures obtenues lors des essais<sup>1</sup>.

Pour estimer la consommation du palier, nous avons tout d'abord calculé la puissance pneumatique, définie par le produit du débit traversant le palier et de la pression relative au niveau de son alimentation. Nous avons ensuite multiplié cette dernière par le rendement mécanique de la pompe, typiquement 75 %, pour obtenir la puissance électrique nécessaire au fonctionnement du palier.

---

<sup>1</sup> Cette technique de mesure par différences aurait pu poser des problèmes de précision si l'épaisseur du film d'air avait été minime par rapport aux déformations subies par le banc d'essai. Toutefois, de par sa rigidité, tel n'a pas été le cas.

