

LA CHUTE LIBRE

Construction mécanique de l'expérience,
développement du chronomètre et
détermination de l'accélération
gravitationnelle

Dr Franz Raemy

22 Juillet 2005



1 Compteur, fréquencemètre et chronomètre

Le projet exige des résultats de mesure de l'accélération gravitationnelle à l'aide de l'expérience de la chute libre. Ceci demande la construction mécanique et électronique ainsi que le chronomètre qui nous permet de mesurer le temps de la chute libre d'une sphère métallique sur une distance bien déterminée. L'appareil électronique proposé ne permet pas seulement les mesures de temps, mais aussi de fréquence ou de compter des événements.

1.1 Remarques concernant la technique des mesures

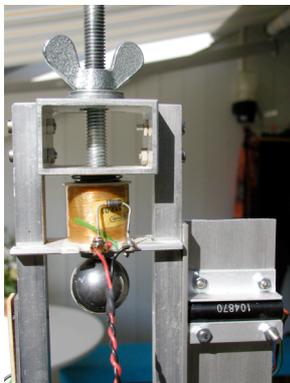
Le support de l'expérience de la chute libre est une construction stable en aluminium. En haut il y a une bobine qui engendre le champ électromagnétique qui retient la sphère métallique. Sa position peut être ajustée par une vis à ailettes. Dans cette expérience, on n'utilise pas le moment de l'interruption du courant par la bobine comme signal de départ mais un capteur lumineux indépendant de l'alimentation du champ magnétique qui fixe le temps de départ à quelques nanosecondes près. Des mesures du temps dans une expérience ont démontré que l'incertitude du temps se base surtout sur une position de départ mal définie. Un avantage de la détection du temps de départ par l'intermédiaire d'une sonde indépendante du champ se manifeste en observant le temps qui s'écoule entre l'interruption du courant par la bobine et le temps initial de la chute libre. Cette incertitude a pu être éliminée en employant deux sources de tensions indépendantes pour le champ magnétique et les sondes et en employant une sonde électronique au point de départ. Un deuxième avantage est la détermination plus précise de la position de départ. Les mesures du temps se font toujours entre les deux sondes fixées à un mètre de distance. Une jauge en aluminium placée au-dessus de la sonde d'arrêt permet la distinction des événements favorables des événements inutilisables. Une sphère qui a touché la jauge ne compte pas dans l'expérience.

1.2 Les composantes du système mécanique

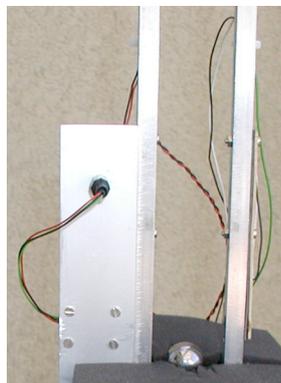
Le support des composantes en aluminium évite le problème des champs magnétiques parasites. L'image de la première page montre toute la construction mécanique et les appareils électroniques.

1.3 Les capteurs lumineux électroniques

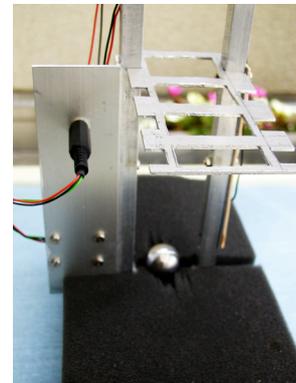
Les capteurs électroniques et les sources lumineuses définissent les positions de départ et d'arrivée. On peut toujours les déplacer de 5 cm. La hauteur maximale de la chute libre est de 1 m. Les images suivantes montrent les capteurs du départ et de l'arrivée.



Le laser, le capteur du départ, la sphère et la bobine



Le capteur d'arrivée

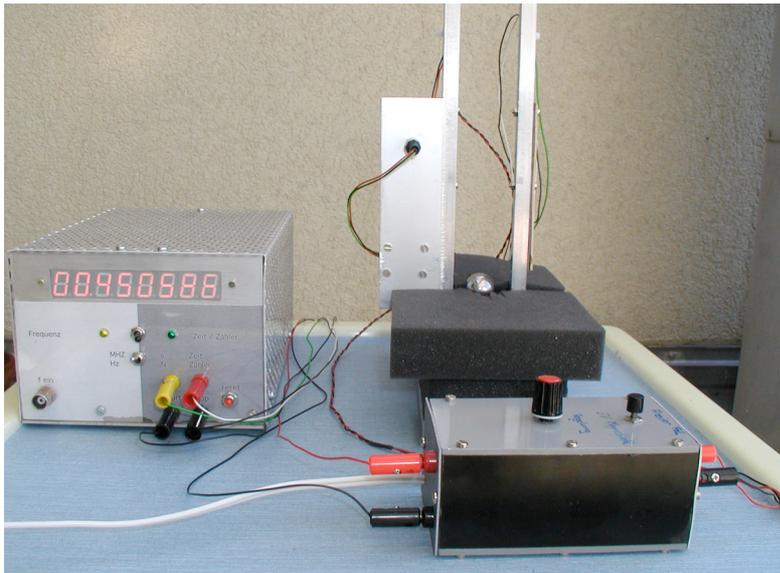


Le capteur d'arrivée avec la jauge

Les deux capteurs fonctionnent de la même façon. La masse en chute libre interrompt le rayon lumineux et le capteur augmente sa résistance c'est-à-dire qu'on obtient un signal positif interprété par l'électronique comme temps de départ ou temps d'arrivée.

1.4 L'appareil de mesure

Le chronomètre à 8 chiffres nous permet de mesurer des durées d'une microseconde à 100 secondes. L'appareil sert aussi comme fréquencemètre jusqu'à 2,5 MHz respectivement comme compteur de 1 jusqu'à 100 millions d'évènements. L'image suivante montre l'appareil à plusieurs fonctionnalités.



Les sources de tensions, les capteurs d'arrêt et le chronomètre

2 La construction électronique du fréquencemètre, chronomètre et compteur

Le schéma suivant montre le principe du fréquencemètre.

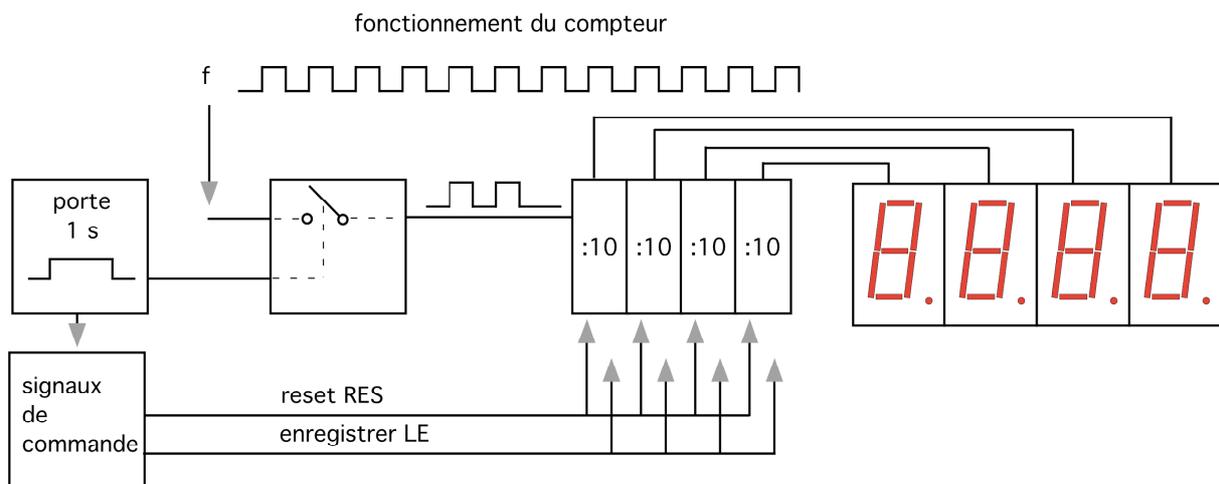
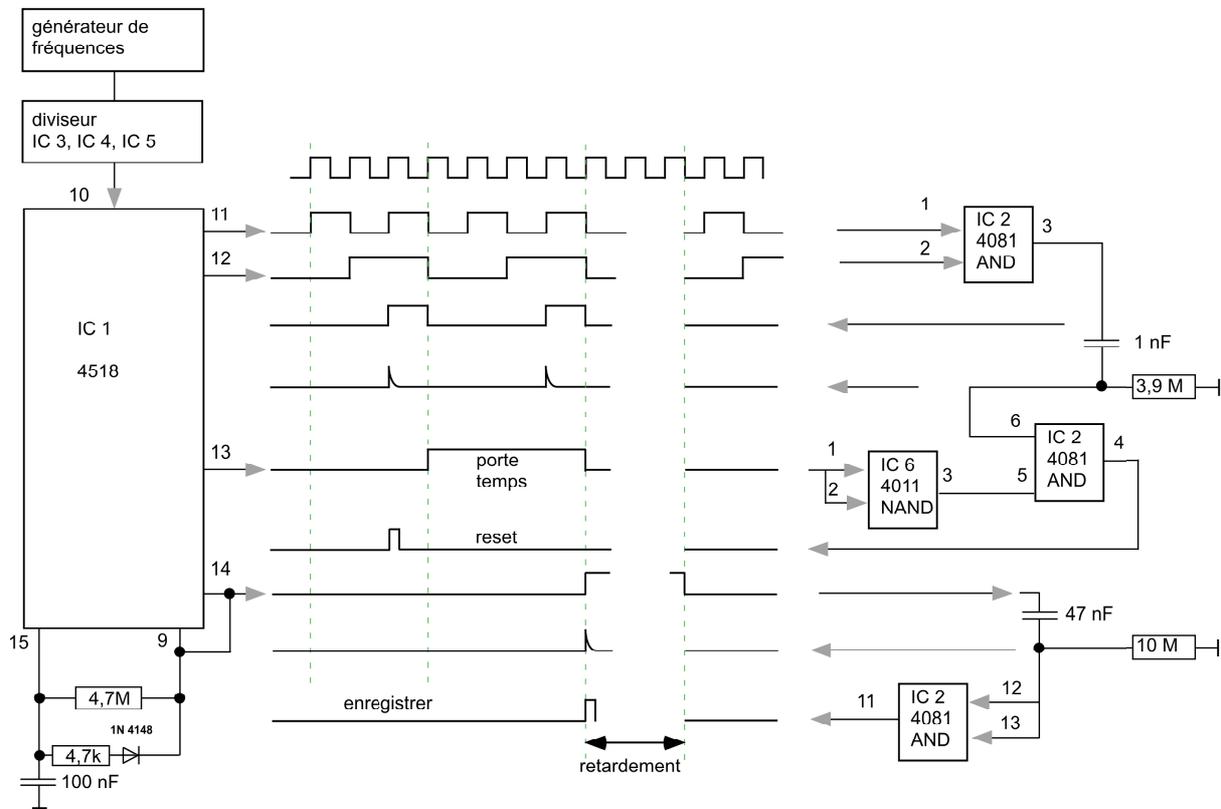


Schéma du fréquencemètre

2.1 Les signaux de commande pour l'écran à huit chiffres

Un signal rectangulaire d'une seconde permet le passage au compteur du signal de la fréquence qui doit être mesurée. La précision de la montre se base sur un oscillateur de 16 MHz. Dans une cascade, la fréquence de 4 MHz est divisée à une seconde. Pendant la durée de la seconde, le signal est transféré au compteur. Le compteur charge la mémoire avec la dernière mesure et garde celle-ci pendant la durée de l'évaluation du résultat suivant. Cette méthode de mémorisation permet au moniteur la représentation stable des valeurs mesurées. Les diviseurs électroniques sont mis à zéro, mais le moniteur montre toujours la dernière mesure. Une nouvelle mesure est initialisée etc. L'image suivante nous montre les signaux aux entrées et sorties du circuit intégré IC 1, IC 2 et IC 6 qui organisent la représentation sur le moniteur.

temps de mesure et signaux de commande pour le compteur



2.2 Le générateur de fréquence

Le schéma suivant montre le générateur de fréquence. Le signal à la sortie a une fréquence de 4 MHz. Il est branché à l'entrée du circuit intégré IC 1. La fréquence de base est de 16 MHz. Le circuit intégré HEF4013 la divise deux fois par deux.

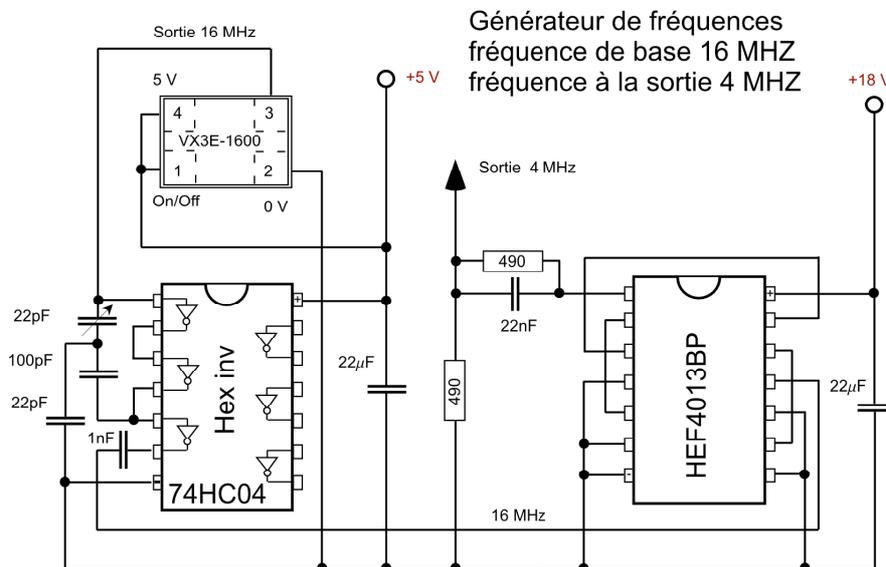


Schéma du générateur de fréquence avec une fréquence de 4 MHz à la sortie

2.3 Le traitement des signaux

Le schéma suivant montre l'électronique du traitement de signaux de l'appareil permettant les mesures de temps, de fréquences ainsi que le compteur. Les signaux dirigent le circuit intégré MM74C926, un compteur à quatre chiffres équipé d'une mémoire interne, un décodeur et le conducteur pour le moniteur. Un circuit s'occupe des signaux pour toujours quatre chiffres. Par les quatre transistors, les quatre cathodes communes des chiffres sont périodiquement mises au potentiel zéro.

La fréquence stable est engendrée par l'oscillateur à quartz en liaison avec les sept compteurs décimaux (IC 1, IC 3, IC 4, IC 5). La représentation ci-dessus montre la production du signal « reset » par différentiation et ignorance. Le signal prépare la mesure suivante par le MM74C926. La sortie 13 du circuit intégré IC 1 met la seconde à disposition. Le signal est relié à l'entrée (8 et 9) du circuit intégré IC 6. La sortie correspondante donne le signal inversé branché au circuit intégré AND (IC 2). Ce signal et l'entrée 6 forment le signal « reset automatique ». L'entrée 8 et 9 du circuit intégré AND permet la mesure des fréquences. En cas de signal positif à l'entrée 8 (IC 2), le signal d'entrée (f_{in}) (entrée 9 IC 2) ouvre l'entrée 10 du circuit intégré IC 2 et fait que le signal accède l'entrée (12) du compteur MM74C926. Après la mesure, la sortie 14 du circuit IC 1 devient positive, interrompt l'entrée 10 par le signal de 0 V à l'entrée 9 et enclenche une phase de repos qui finalement agit sur l'entrée 15 (IC 1). En même temps, l'on obtient par cette transition positive de la sortie 14 de l'IC 1 un signal pour l'activation de la mémoire du circuit intégré (l'entrée 5 du MM74C926). Après le temps de repos (la tension positive aux bornes de la capacité branchée au circuit intégré IC 1 dépasse le seuil de l'entrée 15) toutes les sorties sont mises à zéro et une nouvelle mesure est initialisée.

2.4 Le schéma de montage du chronomètre, du fréquencemètre et le compteur d'évènements

Un fréquencemètre demande un signal rectangulaire, bien défini par l'électronique interne dans l'échelle du temps. Si le signal rectangulaire arrive de l'extérieur, on peut compter la quantité de microsecondes, c'est le chronomètre. Le schéma suivant montre le circuit électronique de l'appareil combiné. Si la base de temps interne n'intervient pas, on obtient un compteur simple d'évènements. Chaque flanc du signal avance le conteur d'une unité. La montre interne est un système utilisant un quartz de 16 MHz. La division de la fréquence de base se fait dans IC1 IC 3, IC 4 et IC 5. À la sortie, on obtient la seconde. Les capteurs lumineux sont branchés au circuit intégré IC 6. La grille A du circuit intégré IC 7 transmet le signal « reset » automatique ou manuel, dépendant de la position du commutateur S1. Au cas d'une mesure de fréquence, le signal « reset » n'a aucune influence. Si le commutateur est mis dans la position A (mesure des fréquences), l'on peut choisir entre la représentation en Hz ou en MHz. Si le commutateur S1 est à la position B (chronomètre ou compteur d'évènements), le compteur compte la quantité de microsecondes ou la quantité des d'évènements détectés par les capteurs lumineux. L'unité d'une microseconde est obtenue en divisant la fréquence de base de 4 MHz d'abord dans la grille A du IC 3 par deux et puis dans la grille A du IC 1 par le même facteur. La sortie Q1 contient la microseconde. La grille B du IC 7 peut envoyer ce signal de base à l'entrée du IC NAND 6 (grille 4). La deuxième entrée de cette grille 4 obtient le signal des capteurs lumineux. Les grilles 1 et 2 du IC 6 forment un circuit basculant à deux positions stables (« flip-flop »). Les deux capteurs lumineux changent l'état du circuit basculant. Le changement d'état a lieu sous certaines conditions. Si le capteur lumineux de l'arrêt est exposé à la lumière, le capteur lumineux du départ change l'état du circuit basculant à condition qu'il y ait une transition lumière-ombre. Il continue de compter des microsecondes même s'il y a une transition ombre-lumière.

Si le capteur lumineux de l'arrêt est dans l'ombre, le capteur lumineux du départ initialise le compteur seulement pendant la durée de l'ombre. Ce comportement nous permet plus tard de placer précisément la sphère métallique.

Si le capteur lumineux du départ est dans l'ombre, aucune transition ne peut être engendrée par le capteur lumineux de l'arrêt.

Deux diodes lumineuses montrent l'état du compteur. La diode allumée indique que le compteur est activé. Si la diode est éteinte, le compteur montre le résultat de la dernière mesure. La mise à zéro du compteur est possible à condition que l'on mesure le temps ou bien que l'on compte les évènements.

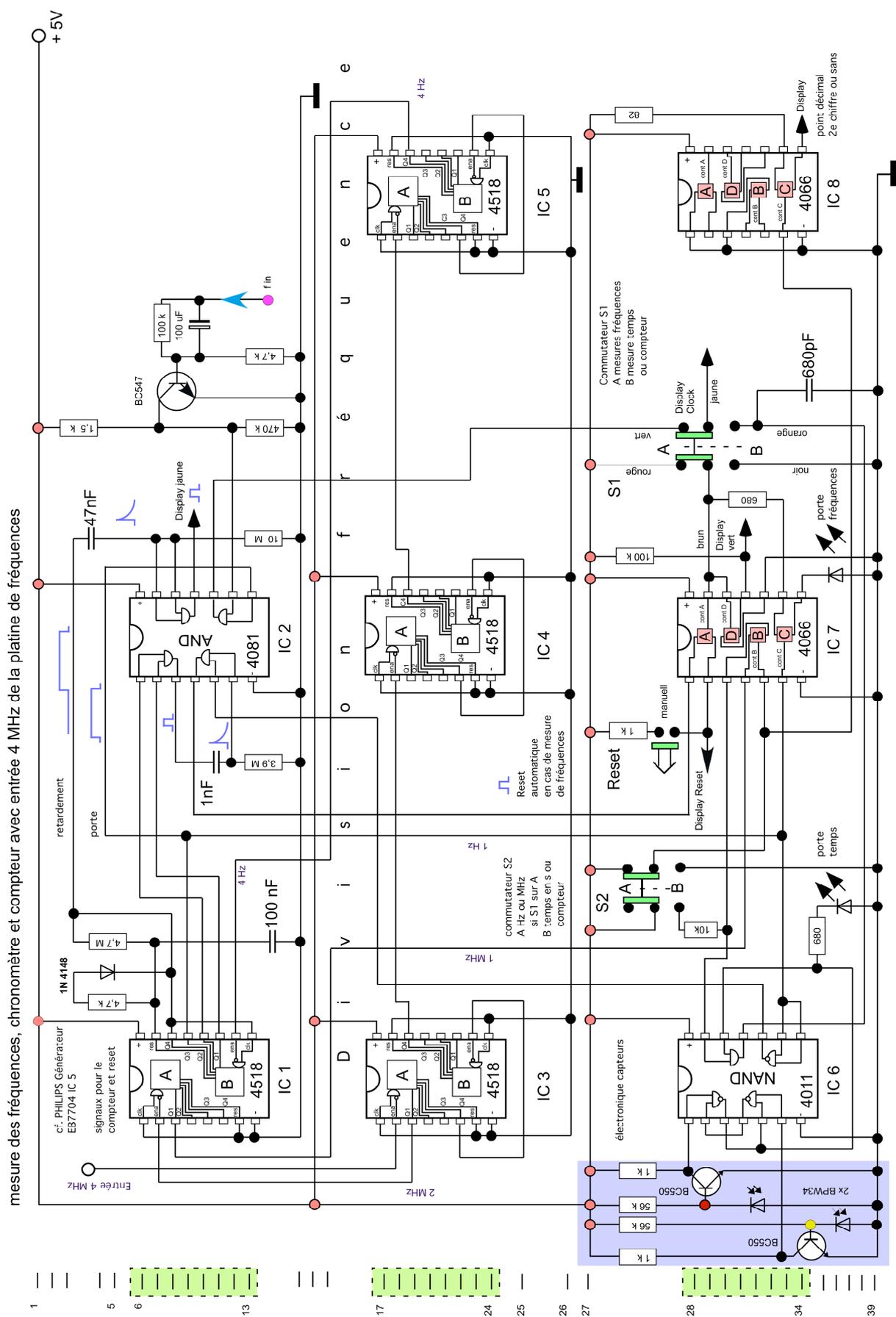
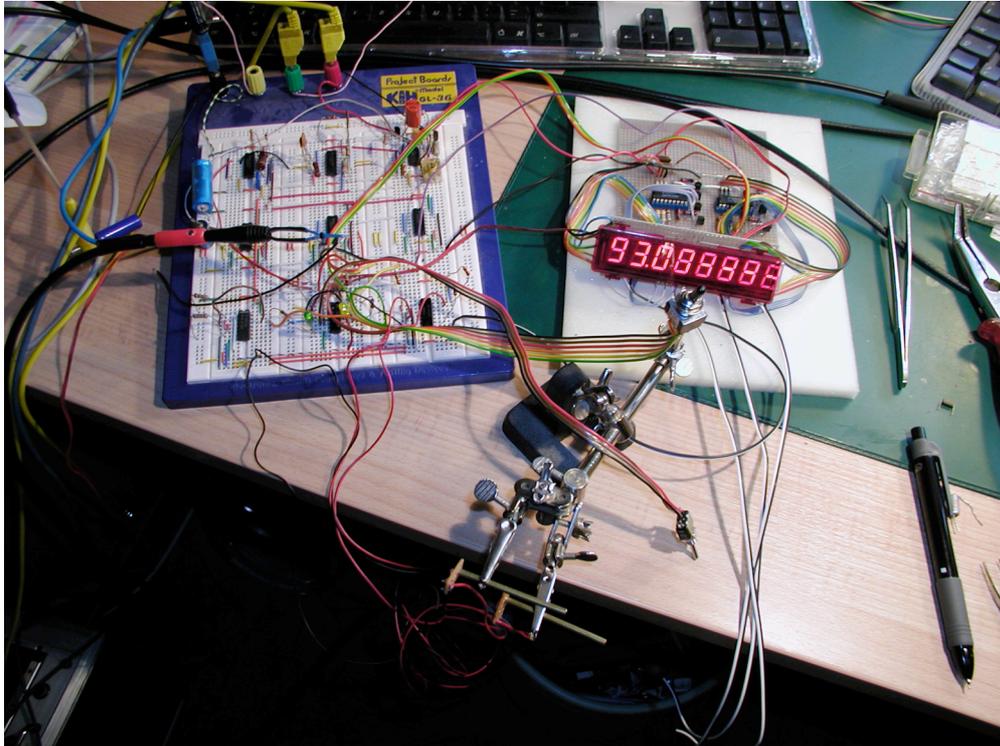


Schéma et montage du compteur de fréquences du chronomètre et compteur des évènements sur une platine de 100x160 mm

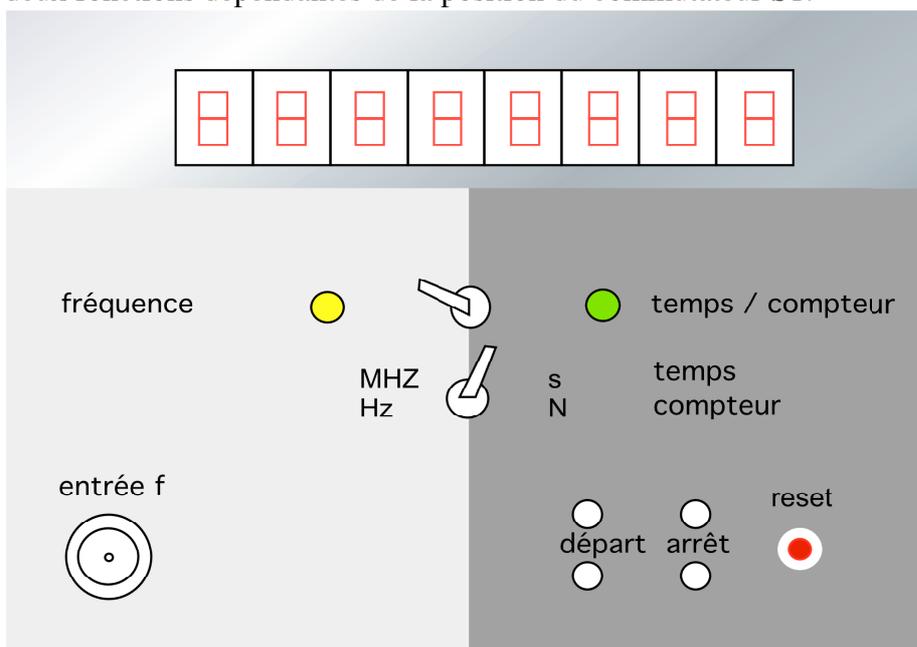
2.5 Le montage du circuit électronique sur une platine expérimentale

L'image suivante montre les composantes du schéma ci-dessus dans un montage sur une platine expérimentale, l'électronique du compteur avec les huit chiffres déjà monté et les deux capteurs lumineux du départ et de l'arrêt.



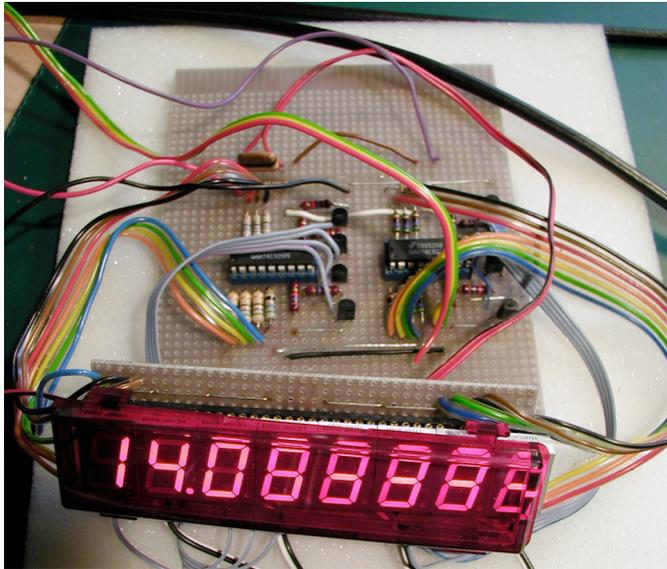
2.6 La vue de face

La vue de face montre les fonctions de l'appareil. Le commutateur S1 permet le choix entre la mesure de fréquence et le chronomètre ou compteur d'évènements. Le commutateur S2 a deux fonctions dépendantes de la position du commutateur S1.



2.7 Le compteur et les huit chiffres

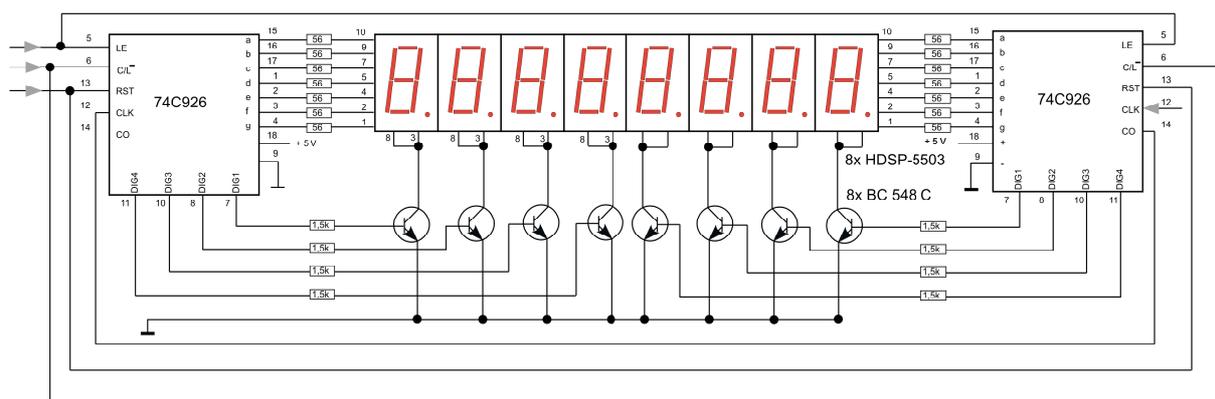
La base du compteur et des huit chiffres est le circuit intégré MM74C926. Il représente un compteur pour 4 chiffres que l'on peut combiner pour obtenir les huit chiffres de l'appareil. Les avantages du circuit intégré sont les fonctions hautement intégrées. Il demande seulement une quantité très limitée des signaux externes.



Les 8 chiffres et les deux circuits intégrés

La figure suivante montre la mise en série de deux IC MM74C926. À l'entrée CLK du compteur à droite, l'on compte les impulsions de la sortie de la platine de base. La sortie CO, activée pour des nombres plus grand que 9999 est branchée à l'entrée CLK du circuit à gauche.

compteur à 8 chiffres



entrée 5: LE Latch Enable: enregistrer
entrée 6: Display select

Schéma du compteur.

2.8 Le compteur de fréquences, le chronomètre et le compteur des évènements

La photo suivante montre l'appareil avec les trois mesures possibles. Les commutateurs sont mis pour l'emploi du chronomètre.



L'appareil monté : Le compteur de fréquences, le chronomètre et le compteur des évènements

3 Mesures de la chute libre des sphères métalliques

Le support des capteurs lumineux est placé verticalement. La jauge permet la distinction des événements favorables de ceux qui ne le sont pas. L'appareil de mesure est allumé, les capteurs lumineux sont montés. On a besoin de deux alimentations complètement séparées de 6 V pour les ampoules émettant de la lumière et d'une tension variable pour le champ magnétique qui retient les sphères métalliques. Les deux alimentations doivent être séparées pour exclure des influences sur les capteurs lumineux provoqués par l'interruption du courant à travers la bobine. L'appareil est utilisé comme chronomètre.

Avant chaque mesure, on doit ajuster la position du départ de la sphère retenue par le champ magnétique. On procède de la façon suivante. Le champ magnétique est enclenché, la sphère est mise en place. Le capteur lumineux est mis à l'ombre et l'on ajuste la vis à ailettes telle que le seuil du signal de départ n'est juste pas dépassé. Ensuite, on expose le capteur lumineux de l'arrêt à la lumière et par la touche « reset » on met le compteur à zéro. Le bouton dans le boîtier des alimentations interrompt le courant par la bobine et la sphère commence la chute libre. Le passage de la sphère par le capteur du départ engendre le signal initial pour le compteur. La sphère en chute libre fait un mouvement accéléré et arrête le compteur en passant par le capteur d'arrêt. Si la jauge montée au-dessus du capteur d'arrêt n'est pas touchée par la sphère, on accepte le temps mesuré par le chronomètre. Dans l'expérience, nous employons deux sphères métalliques. Le tableau au chapitre 3.1 montre le résultat des mesures du temps t , de la déviation du temps par rapport à la valeur moyenne et la valeur calculée de l'accélération gravitationnelle en se basant sur un dénivellement de $h = 0,9975$ m de hauteur, une fois sans jauge et une fois avec jauge:

$$h = \frac{g}{2} t^2 \Rightarrow g = \frac{2h}{t^2}$$

La jauge est une plaque d'aluminium qui a des fentes rectangulaires pour chaque sphère. Nous mesurons une fois avec et une fois sans jauge.

sphère : $\varnothing 16 \text{ mm}$ *fente :* 20,3 mm
sphère : $\varnothing 22 \text{ mm}$ *sans fente*

La jauge est montée au-dessus du capteur lumineux d'arrêt. Il s'avère très utile d'avoir la possibilité de séparer les événements favorables de ceux qui ne sont pas utilisables. Si la sphère touche la jauge, l'évènement n'est pas compté, le temps mesuré est trop grand ou la sphère ne passe pas devant le capteur. Sans jauge, on devrait, pour des petits diamètres des sphères, admettre une incertitude du rayon de la sphère pour la dénivellation. Le résultat des mesures de l'accélération gravitationnelle serait dans ce cas affecté d'une incertitude relative de l'ordre de grandeur de 1 %. Les mesures sans jauge sont très difficiles à effectuer et demandent le contrôle régulier de la perpendiculaire. L'incertitude avec la jauge est au moins 5 fois plus petite pour des petites sphères parce que l'on peut distinguer les bons événements des autres.

3.1 Mesure du temps de chute, déviations par rapport à la valeur moyenne du temps et accélération gravitationnelle g

Mesure sans jauge

Mesure avec jauge

Diamètre	t	dt	g	Diamètre	t	dt	g
22 mm	0.450663	-0.000202	9.82288576	16 mm	0.451407	0.0002534	9.79053267
	0.451057	0.000192	9.8057326		0.450973	-0.0001806	9.80938585
	0.450684	-0.000181	9.82197037		0.450472	-0.0006816	9.83121733
	0.451125	0.00026	9.8027767		0.451408	0.0002544	9.7904893
	0.450796	-6.9E-05	9.81709045		0.451508	0.0003544	9.78615298
V. moyenne	0.450865		9.81409118	V. moyenne	0,451594		9.80155563
Max		0.00026	9.82288576	Max		0.0003544	9.83121733
Min		-0.000202	9.8027767	Min		-0.0006816	9.78615298

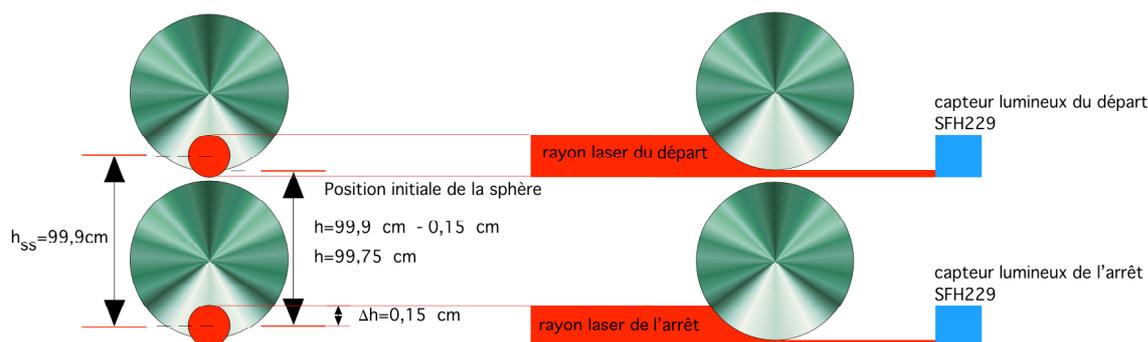
La valeur de g à Guin 680 m au-dessus de la mer, du 8 Octobre 2005 fournit:

$$g = (9,81 \pm 0,03) \text{ m/s}^2$$

$$g = (9,81 \pm 0,05) \text{ m/s}^2$$

3.2 La valeur moyenne et la déviation maximale et minimale de la valeur moyenne

Le résumé de la valeur moyenne du temps t au tableau donne la valeur de g en m/s^2 . Le calcul de l'incertitude demande la déviation maximale du temps par rapport à la valeur moyenne. Elle est $\Delta t = \pm 0,0003 \text{ s}$ sans jauge et $\Delta t = \pm 0,0007 \text{ s}$ avec jauge. Ce résultat nous montre que l'application de la jauge pour des sphères de grand diamètre ne représente pas une amélioration des mesures. L'incertitude absolue de la hauteur est le rayon de l'ouverture du capteur lumineux de l'arrêt.



3.3 Le calcul des incertitudes

Si l'on assume que la dénivellation h est affecté d'une incertitude de 1,5 mm, l'accélération gravitationnelle g et l'incertitude de g sont calculables de la façon suivante :

$$t = 0.450865 \text{ s}; \quad \Delta h = \pm 1,5 \text{ mm}$$

sans jauge

$$\Delta t = \pm 0,0003 \text{ s}$$

$$h = \frac{g}{2} t^2 \quad \Rightarrow \quad g = \frac{2h}{t^2}$$

avec jauge

$$\Delta t = \pm 0,0007 \text{ s}$$

L'incertitude relative de l'accélération gravitationnelle :

sans jauge

$$\frac{\Delta g}{g} = \pm \left(\frac{\Delta h}{h} + 2 \frac{\Delta t}{t} \right) = \pm \left(\frac{1,5}{997,5} + 2 \frac{0,0007 \text{ s}}{0,451500 \text{ s}} \right) = \pm 0,27\%$$

avec jauge

$$\frac{\Delta g}{g} = \pm \left(\frac{1,5}{997,5} + 2 \frac{0,0007 \text{ s}}{0,451500 \text{ s}} \right) = \pm 0,45\%$$

L'incertitude absolue de l'accélération gravitationnelle :

sans jauge

$$\Delta g = \pm 0,03 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

avec jauge

$$\Delta g = \pm 0,05 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

D'où le résultat :

sans jauge

$$\Rightarrow \quad \underline{\underline{g = (9,81 \pm 0,03) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}$$

avec jauge

$$\underline{\underline{g = (9,81 \pm 0,05) \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}$$

Le résultat nous montre qu'il est plus important de choisir une sphère avec un grand diamètre que de contrôler la verticale avec la jauge.

3.4 Éliminations des incertitudes les plus importantes

Beaucoup des expériences mesurant l'accélération gravitationnelle g , utilisent comme signal de départ le signal dérivé du temps d'interruption du courant qui traverse l'électroaimant. Le signal d'arrivée est dérivé du signal d'un microphone qui enregistre le bruit de l'impact de la sphère sur une surface plane. Le chronomètre employé souvent se base sur une fréquence interne de 1 kHz. Dans ce paragraphe, nous décrivons les sources des incertitudes et nous avons comme but, l'élimination de celles-ci.

Une première source d'incertitude concerne les mesures du temps. Dans l'expérience, nous nous basons sur un chronomètre de fréquence interne de 16 MHz à quartz stable et non sur un chronomètre de fréquence de base interne de 1 kHz.

Une deuxième source d'incertitude concerne le signal de départ ainsi que le signal d'arrivée. La précision mentionnée plus haut des mesures du temps ne nous rend service que si le temps de départ est mesuré indépendamment du courant traversant la bobine. L'amélioration peut être atteinte par l'emploi d'un capteur lumineux qui réagit au temps du départ de la sphère métallique. Le champ rémanent de l'électroaimant existe encore pendant la durée de 0,01 secondes, après avoir interrompu le courant par la bobine, dépendant de l'intensité du courant. La troisième source d'incertitude concerne le chemin parcouru de la sphère en chute libre. La chute libre demande une verticale contrôlée. La jauge montée juste avant le capteur d'arrêt nous donne l'option de la séparation des événements favorables. La jauge est une plaque métallique qui a une ouverture rectangulaire du diamètre de la sphère plus 2 mm. Chaque sphère qui n'a pas touché la plaque est acceptée dans l'expérience. L'expérience montre que la jauge n'est utile que pour des sphères de petits diamètres.

La quatrième source d'incertitude est le capteur du signal d'arrêt. Dans beaucoup d'expériences, l'on utilise un microphone qui enregistre le bruit de l'impact comme signal d'arrivé. Mais le temps de déplacement du signal de l'onde sonore sur une distance de 10 cm à 30 cm vaut déjà +0,3 ms à +0,9 ms. On doit ajouter un temps d'activation de la membrane du microphone. Dans notre expérience, nous utilisons le même type de capteurs lumineux pour le signal de départ et le signal d'arrivée. Les capteurs ont un temps de réaction $< 1 \mu s$. La cinquième incertitude concerne la résistance de l'air qui agit sur les sphères en chute libre. La dénivellation d'un mètre seulement limite les effets de l'air sur la chute libre. Les effets de frottement sont proportionnels à la vitesse si la vitesse est petite. Cette incertitude est contenue dans l'incertitude absolue du temps.

3.5 Remarques finales

Le résultat nous démontre que l'accélération gravitationnelle peut être déterminée correctement avec un petit effort. L'incertitude est de 0,5 %. La distinction des chutes favorables à l'aide de la jauge améliore le résultat si le diamètre des sphères est petit. Le contrôle permet d'éliminer les mesures où la sphère a touché la jauge. Les expériences ont montré que la chute d'une sphère de grand diamètre même sans jauge est à favoriser à une chute d'une sphère de petit diamètre avec jauge. L'ombre engendrée sur la sonde par une grande sphère est en général mieux définie que l'ombre d'une petite sphère. L'expérience démontre que le chronomètre capable de mesurer des microsecondes ne garantit pas que la durée des chutes libres est la même pour chaque mesure. Il y a plusieurs sources d'incertitudes et des influences externes qui ne permettent pas d'obtenir un seul résultat sans incertitude. La méthode de Cavendish permet d'obtenir des résultats plus précis.

Table des matières

1	COMPTEUR, FRÉQUENCEMÈTRE ET CHRONOMÈTRE.....	2
1.1	REMARQUES CONCERNANT LA TECHNIQUE DES MESURES	2
1.2	LES COMPOSANTES DU SYSTÈME MÉCANIQUE	2
1.3	LES CAPTEURS LUMINEUX ÉLECTRONIQUES	2
1.4	L'APPAREIL DE MESURE.....	3
2	LA CONSTRUCTION ÉLECTRONIQUE DU FRÉQUENCEMÈTRE, CHRONOMÈTRE ET COMPTEUR.....	3
2.1	LES SIGNAUX DE COMMANDE POUR L'ÉCRAN À HUIT CHIFFRES	4
2.2	LE GÉNÉRATEUR DE FRÉQUENCE.....	5
2.3	LE TRAITEMENT DES SIGNAUX	5
2.4	LE SCHÉMA DE MONTAGE DU CHRONOMÈTRE, DU FRÉQUENCEMÈTRE ET LE COMPTEUR D'ÉVÈNEMENTS	6
2.5	LE MONTAGE DU CIRCUIT ÉLECTRONIQUE SUR UNE PLATINE EXPÉRIMENTALE	8
2.6	LA VUE DE FACE.....	8
2.7	LE COMPTEUR ET LES HUIT CHIFFRES	9
2.8	LE COMPTEUR DE FRÉQUENCES, LE CHRONOMÈTRE ET LE COMPTEUR DES ÉVÈNEMENTS	10
3	MESURES DE LA CHUTE LIBRE DES SPHÈRES MÉTALLIQUES	11
3.1	MESURE DU TEMPS DE CHUTE, DÉVIATIONS PAR RAPPORT À LA VALEUR MOYENNE DU TEMPS ET ACCÉLÉRATION GRAVITATIONNELLE G	12
3.2	LA VALEUR MOYENNE ET LA DÉVIATION MAXIMALE ET MINIMALE DE LA VALEUR MOYENNE.....	12
3.3	LE CALCUL DES INCERTITUDES	13
3.4	ÉLIMINATIONS DES INCERTITUDES LES PLUS IMPORTANTES	13
3.5	REMARQUES FINALES	14