

## ***Etape de calibration : mesures expérimentales***

Dans ce chapitre, on présente les résultats des mesures des trois délais ( $S_0-S_1$ ,  $S_0-S_2$  et  $S_0-S_3$ ) et l'évaluation de leur incertitude. On rappelle la procédure suivie composée des trois étapes suivantes :

Enregistrer les signaux  $S_0$  de référence et  $S_i$  pour chaque délai à des fréquences horloge différentes : les enregistrements sont répétés 50 fois pour obtenir une série de 50 mesures à chaque fréquence. L'analyse statistique de ces mesures donne les valeurs moyennes et les écarts types associés à chaque délai et chaque fréquence horloge.

Résoudre le problème de l'ambiguïté entière : à partir des valeurs moyennes calculées à chaque fréquence horloge, on procède à la recherche de la valeur du délai sans ambiguïté. Pour cela, on fait varier la valeur de l'entier  $k$  pour chaque fréquence horloge jusqu'à déterminer la valeur de mesure commune à toutes les fréquences. Cette valeur commune correspond à la mesure du délai sans ambiguïté.

Déterminer la mesure précise du délai et son incertitude à travers la méthode de régression linéaire. En utilisant les valeurs moyennes des mesures des délais et les écarts types associés à chaque fréquence horloge, on trace une droite de régression linéaire horizontale ( $y=a$ ). On déduit ainsi une estimation du délai réel et son incertitude.

Dans la suite, on présente les résultats des deux dernières étapes (de résolution d'ambiguïté et d'estimation du délai réel) pour chacun des délais  $S_0-S_1$ ,  $S_0-S_2$  et  $S_0-S_3$ .

### **Résultats de la résolution d'ambiguïté**

La valeur d'ambiguïté initiale  $k$  est estimée en utilisant la longueur  $L_c$  et l'indice de réfraction  $n_{ref}$  donnés par le fournisseur de la fibre optique par l'expression  $k = \left\lfloor \frac{n_{ref} \times L_c}{\lambda} \right\rfloor$ . La longueur d'onde  $\lambda$  est celle du signal RF à la fréquence horloge choisie. Pour chaque mesure de déphasage associée à un signal RF, on calcule le délai associé aux valeurs d'ambiguïté  $k \pm i$ , où  $i$  est entier positif. Dans la Figure VIII-1, la Figure VIII-2 et la Figure VIII-3, on présente les résultats de la résolution d'ambiguïté pour les délais  $S_0-S_1$ ,  $S_0-S_2$  et  $S_0-S_3$  respectivement. Dans ces figures, on trace les valeurs des délais calculés pour chaque valeur d'entier  $i$  (allant de 0 à  $i_{max}$ ) en fonction de la fréquence horloge du signal RF. La valeur de  $i_{max}$  varie selon la fréquence horloge testée et elle est fixée lorsque une valeur commune est atteinte pour toutes les séries de mesures. On trace une droite horizontale sur chacune des figures pour déterminer cette valeur de délai commun à toutes les fréquences horloge.

Dans le cas du dernier délai  $S_0-S_3$ , il y a deux valeurs communes associées à deux entiers différents  $i$  (Figure VIII-3). Pour trancher entre ces deux valeurs équiprobales, on refait des mesures du même délai à d'autres fréquences horloge : 54 MHz, 55 MHz, 66 MHz et 80 MHz. En ajoutant cette liste de résultats, l'une des deux valeurs communes (celle autour de 2500 m) est éliminée. La valeur restante correspond à la solution du délai  $S_0-S_3$  sans ambiguïté. Avec un nombre aussi élevé de résultats de mesures, on choisit d'appliquer un algorithme automatique pour trouver la valeur commune (à une incertitude inférieure à 10cm) à toutes les fréquences horloge.

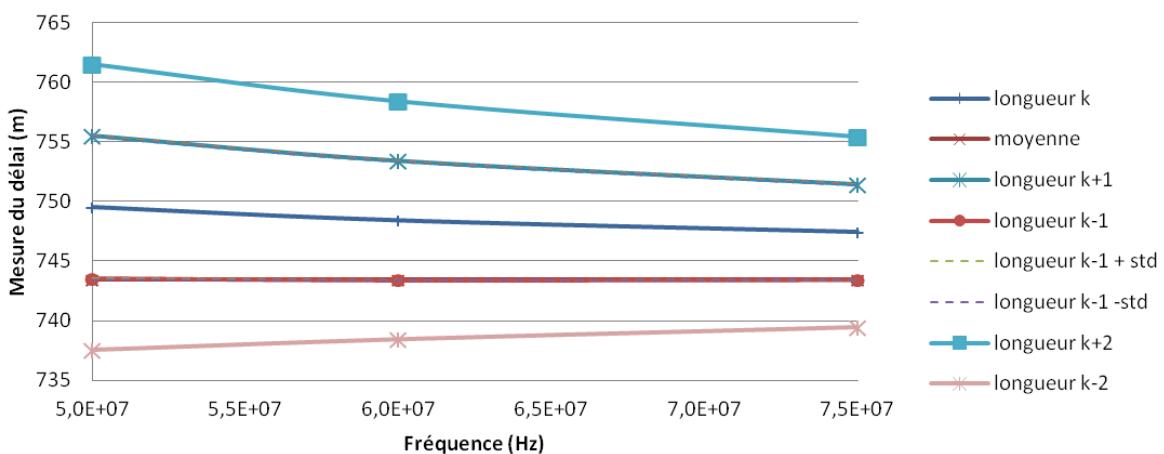
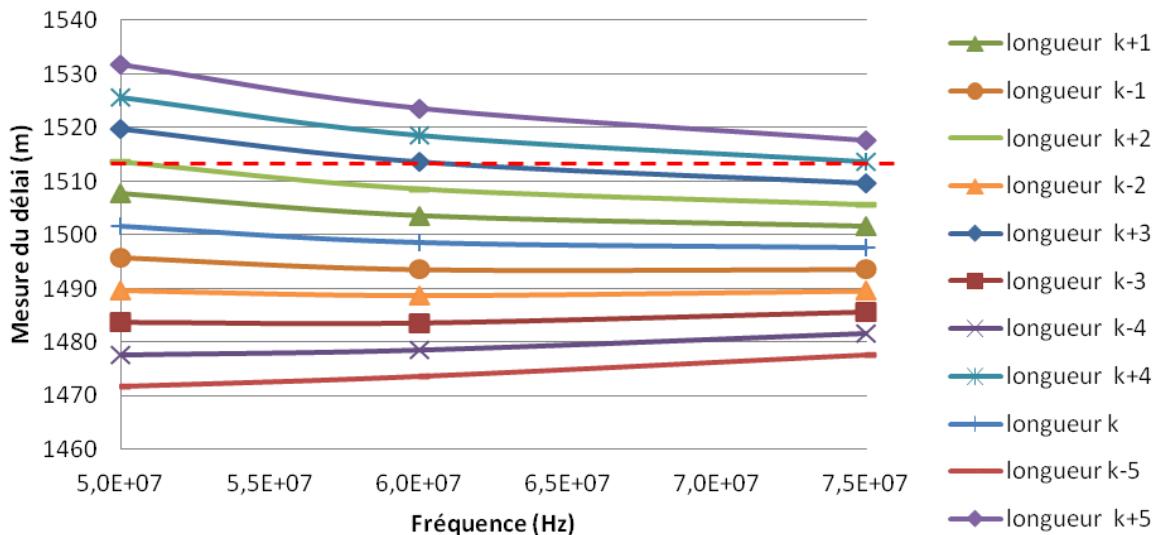
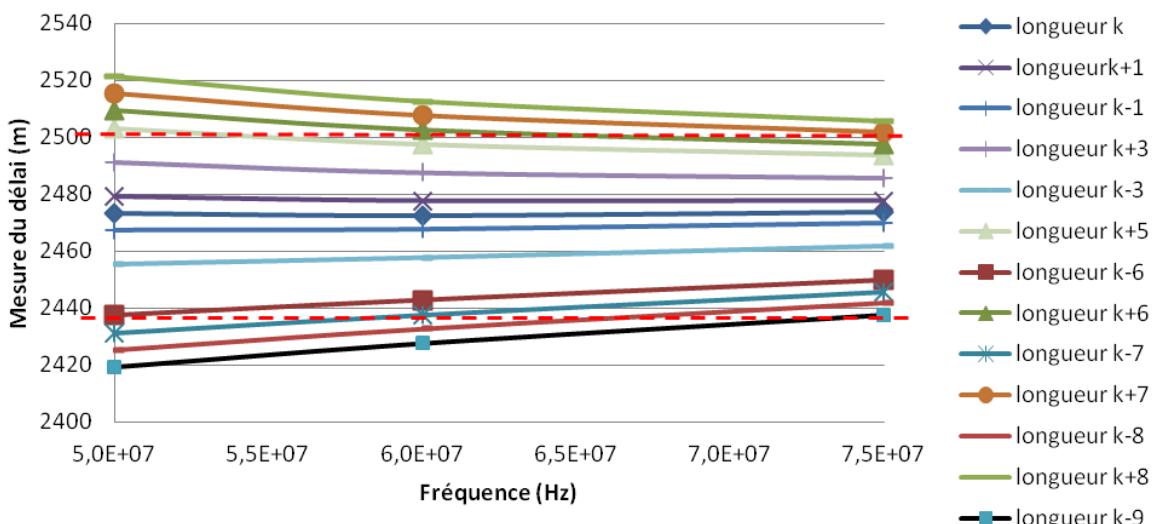


Figure VIII-1: Figure de la résolution d'ambiguïté pour le délai  $S_0-S_1$

Dans la Figure VIII-1, la ligne horizontale correspond à la courbe associée à la valeur d'ambiguïté «  $k-1$  » (longueur  $k-1$ ). Cette courbe est une droite qui joint la valeur commune déterminée aux trois fréquences horloge.

Figure VIII-2 : Figure de la résolution d'ambiguïté pour le délai  $S_0-S_2$ Figure VIII-3 : Figure de la résolution d'ambiguïté pour le délai  $S_0-S_3$ 

## Résultats de l'estimation de la valeur réelle des délais et de leurs incertitudes.

Une fois la valeur sans ambiguïté de chaque délai déterminée, on cherche à définir la plus proche estimation de la valeur réelle et son incertitude au moyen des valeurs moyennes et écarts types associés aux différentes fréquences.

A chaque fréquence horloge testée, on associe une mesure de délais non ambigus et son incertitude. La valeur de l'incertitude est estimée par le rapport écart type sur nombre de

mesures effectuée à cette fréquence et l'estimation du délai correspond à leur valeur moyenne. On applique alors, en utilisant ces séries de donnés, la méthode de régression linéaire détaillée au chapitre II pour définir la droite horizontale ‘ $y=a$ ’ et son incertitude. La valeur du paramètre ‘ $a$ ’ correspond à l'estimation du délai réel. L'incertitude associée est équivalente à celle de cette estimation de ce paramètre ‘ $a$ ’. Les Figures IX- 4, IX- 5 et IX- 6 présentent les résultats de la méthode de régression linéaire pour les délais  $S_0-S_1$ ,  $S_0-S_2$  et  $S_0-S_3$  respectivement.

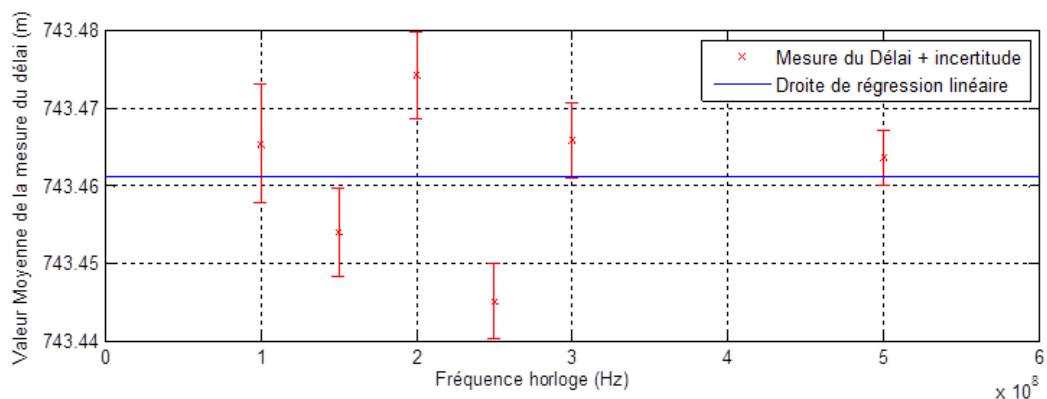


Figure VIII-4 : Tracé de la droite de régression linéaire pour le délai  $S_0-S_1$

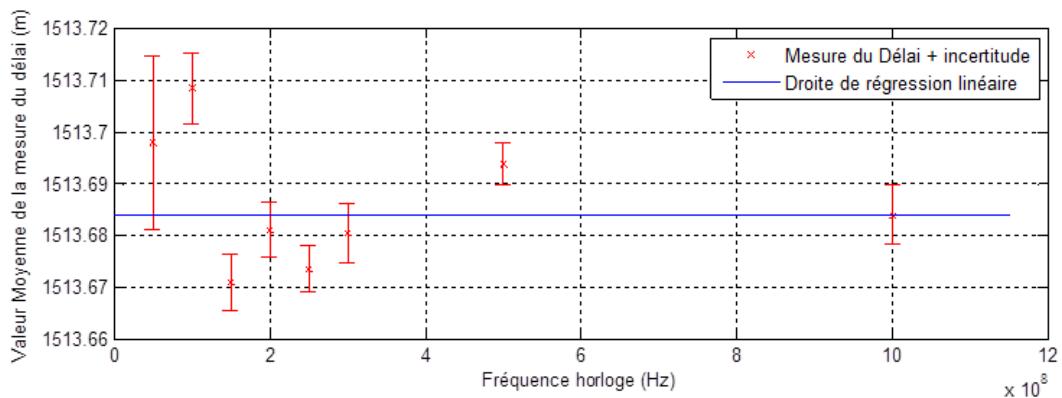


Figure VIII-5 : Tracé de la droite de régression linéaire pour le délai  $S_0-S_2$

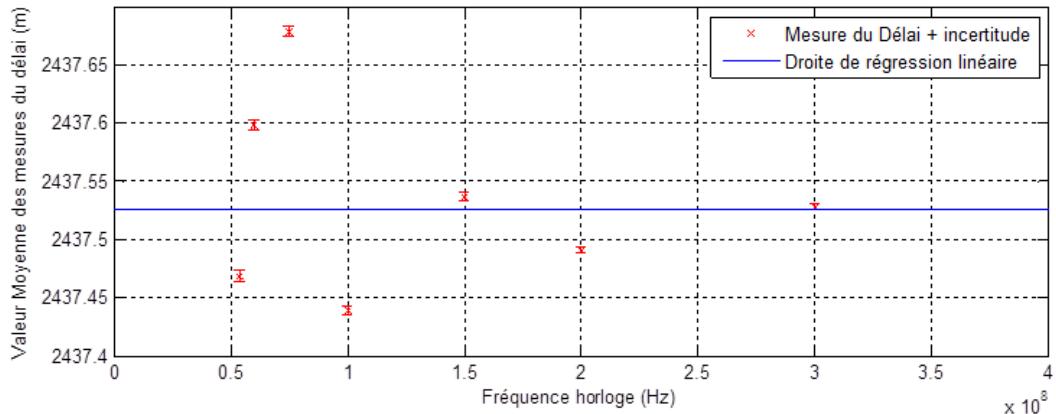


Figure VIII-6 : Tracé de la droite de régression linéaire pour le délai  $S_0-S_3$

Le Tableau VIII-1 résume les résultats de cette étape pour les trois délais. Les incertitudes calculées sont de l'ordre de quelques millimètres. Ces résultats sont donc suffisamment précis (inférieurs au centimètre) pour servir de référence de calibration pour le système à répélites. En effet (comme on l'a expliqué en introduction), pour atteindre des précisions de localisation inférieures au mètre, il est nécessaire de garantir une calibration des délais avec une incertitude inférieure au centimètre. D'après les résultats présentés ci-dessus, cette approche basée sur la mesure du déphasage et la méthode de la régression linéaire satisfait cette condition.

Tableau VIII-1 : les valeurs estimées des trois délais et leurs incertitudes

	Délais mesurés entre les signaux des répélites 0 et i		
	$S_1 - S_0$	$S_2 - S_0$	$S_3 - S_0$
Estimation du délai	743,46	1513,68	2437,52
Incertitude (mm)	2	1,9	1

Dans le chapitre suivant, on cherche à vérifier la compatibilité de notre système optique de décalage et l'approche de calibration avec le système de positionnement à répélites.