

Kits de mesure *low cost*

Comparaison des altimètres

Quentin LESNIAK – Stagiaire ingénieur – LIENSs

1 Objectifs

- Identifier l'altimètre le plus adapté à notre utilisation (le plus fidèle).
- Améliorer sa précision en compensant ses erreurs de justesse et améliorant sa compensation de température.
- Donner un contexte d'utilisation aux autres capteurs (maîtrise des coûts).

2 Matériel et méthode

2.1 Altimètres à tester

Les altimètres à tester sont au nombre de 4. Le Tableau de caractéristiques 1 résume les avantages et inconvénients de chacun des capteurs.

Capteur	Exactitude annoncée	Résolution	Ouverture du faisceau	Compensation en température	Temps de réponse	Indice de protection	Consommation	Etendue de mesure
JSN SR04T	?	1mm	75°	Externe	?	Waterproof	30mA	20-600cm
A01NYUB	±1cm	1mm	40° ou 55°	Interne	100ms	IP67	<15mA	28-750cm
URM14	±1mm ±0.1%	0.1mm	12°±2°	Interne Externe	33ms (30Hz)	IP65	350mA	10-150cm
URM08	±1%	1cm	60°	Interne	70-100ms	IP65	250mA	35-550cm

TABLE 1 – Synthèse des caractéristiques des altimètres

Le JSN SR04T est probablement le capteur le plus prometteur dont nous disposons. Il permet une compensation de température externe, et donc ajustable. Son ouverture de faisceau est très large et devrait permettre de compenser la gîte ou le roulis d'un bateau. En revanche il faudra bien le placer en dehors du bateau pour ne pas perturber les mesures. Enfin, il est classé IP67, soit étanche 30min à 1m, et consomme peu. Même si son exactitude et son temps de réponse restent inconnus, ils devraient pouvoir être estimés dans la suite de ce rapport.

Ce capteur ne convertit pas le temps de parcours de l'onde sonore qu'il émet en distance. La grandeur retournée par le capteur est un temps, à partir duquel nous calculons la distance. Ce calcul fait intervenir la vitesse du son dans l'air, dépendant elle-même de la température de l'air. La formule utilisée pour calculer cette vitesse est la suivante :

$$V_T = V_0 + 0.606 \times T$$

Où $V_0 = 331.1\text{m/s}$, qui correspond à la vitesse du son dans de l'air à 0°C.

L'A01NYUB a également beaucoup d'avantages. Son ouverture de faisceau peut être utile pour compenser la gîte ou le roulis du bateau. Sa faible consommation est intéressante et son étanchéité un vrai plus. Son exactitude annoncée, combinée à sa résolution au mm, devraient permettre

de descendre en dessous du cm en moyennant plusieurs mesures. Seul hic, la compensation de température est interne au capteur et ne peut être modifiée. Il faudra alors protéger les capteur du soleil pendant l'utilisation.

L'URM14 a des arguments assez différents. Son exactitude annoncée et sa fréquence d'acquisition sont supérieures à celles de tous les autres capteurs. Il permet également une compensation en température externe. Cependant sa faible étendue de mesure pourrait être un frein à l'utilisation de Cyclopée.

L'URM08 a été mis de côté à cause de sa faible résolution (1cm), bien que son ouverture de faisceau soit intéressante.

Les altimètres retenus pour les tests sont donc le **JSN SR04T**, l'**A01NYUB** et l'**URM14**.

2.2 Le capteur de température

La mesure de la température de l'air ambiant est assurée par un capteur Dallas Temperature DS18B20 configuré à une résolution de 0.125°C.

2.3 Le banc de test

Le banc de test (Figure 1) est constitué d'un bras en aluminium fixé à l'horizontale, à une certaine hauteur par rapport au sol, sur le montant de la cloison en salle humide. Au bout du bras est fixé l'altimètre à tester, afin de mesurer sa distance au sol. La hauteur est mesurée au mètre, par rapport à l'extrémité du capteur. Afin de mesurer une température proche de celle de la tranche d'air sous le capteur, la sonde de température a été suspendue sous le capteur.

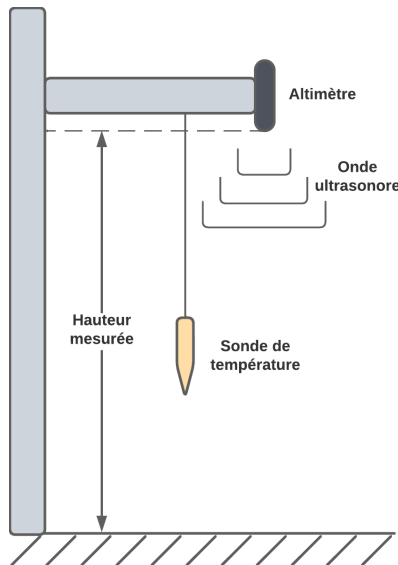


FIGURE 1 – Schema du banc de test

2.4 Méthode

2.4.1 Justesse et incertitude d'un capteur

Afin de départager les altimètres, leur exactitude a été évaluée. Cette dernière représente la capacité d'un capteur à fournir des mesures proches de la valeur vraie d'une grandeur que l'on essaie de mesurer. Elle peut être séparée en deux composantes : la justesse, et la fidélité.

La justesse caractérise la proximité moyenne des mesures à la valeur vraie. Elle est relative aux erreurs systématiques du capteur (biais, offset) et est caractérisée par l'écart de la moyenne des mesures à la valeur supposée vraie.

La fidélité peut être définie comme la :

“Capacité, pour un détecteur (manomètre, analyseur) à donner une mesure reproductible à partir d’une même grandeur mesurée.”[2]

En d’autres termes plus intelligibles :

“Elle définit la dispersion des résultats. Si on n’effectue qu’une seule mesure, la fidélité représente la probabilité qu’elle soit représentative du résultat moyen.”[4]

Elle est relative aux erreurs aléatoires de mesure et est souvent caractérisée par l’écart type. Elle est également très dépendante de conditions de mesure.

La Figure 2 propose une représentation schématique des composantes de l’exactitude.



FIGURE 2 – Représentation graphique de l’exactitude

L’erreur de mesure d’un capteur peut donc être séparée en un erreur systématique, dite de justesse ; et une erreur aléatoire, caractéristique de la fidélité.

L’erreur systématique, comme son nom l’indique, est identique pour chaque mesure d’une même valeur, quelles que soient les conditions. Elle peut donc être quantifiée et compensée.

L’erreur aléatoire doit être quantifiée statistiquement, et donne lieu à l’incertitude sur la mesure. Cette dernière correspond à un intervalle autour de la mesure, dans lequel se situe statistiquement la valeur vraie. Comme la fidélité, elle est très dépendante des conditions de mesure.

Nous avons donc tenté de quantifier la justesse et l’incertitude des trois capteurs à notre disposition. Pour cela nous avons adopté un raisonnement statistique sur de grands jeux de mesures (évaluation de type A), car notre système nous le permet, plutôt que d’essayer de quantifier les sources d’erreurs (évaluation de type B).

2.4.2 Evaluation de l’incertitude

L’écart de justesse étant compensable, car non aléatoire, la fidélité a constitué notre principal critère de comparaison. De plus, les conditions de mesure utilisées ont permis de réaliser des tests pratiques, permettant de rapidement quantifier l’incertitude et d’identifier les capteurs les plus sujets aux erreurs aléatoires.

L’incertitude, par définition, est un intervalle indépendant des conditions d’utilisation. Pour l’évaluer, il faut donc faire varier un maximum de paramètres, tels que la procédure de mesure, le lieu, le temps de répétition, des paramètres environnementaux (température), pour produire un résultat indépendant de ceux-ci. Ce genre de test étant difficilement réalisable, nous avons choisi de les réaliser dans des conditions relativement proches des conditions d’utilisation des capteurs. Les mesures ont donc été réalisées dans la même salle, sur le même banc de test (Figure ??), situé au même endroit, avec des variations lentes de température comprises entre 21 et 24°C, pendant plusieurs heures, à une fréquence d’acquisition de 1Hz, et à hauteur quelconque, identique entre les tests. Pour un résumé plus visuel des conditions de test, voir le Tableau 2.

Pour départager les capteurs, l’écart type de l’échantillon, la normalité, les valeurs minimales et

Lieu	Compensation en température	Température	Hauteur	Durée	Fréquence d'acquisition
Identique Salle humide Banc de test	Oui	Entre 21 et 24°C Variations lentes	Identique	Plusieurs heures	1Hz

TABLE 2 – Caractéristiques des tests de fidélité

maximales, ainsi que des intervalles à différents niveaux de confiance ont été étudiés.

L'écart type de l'échantillon nous renseigne sur la variabilité. Dans le cas d'une distribution normale des mesures, il permet de déterminer avec certitude l'intervalle dans lequel la totalité des mesure se situera, et donc l'incertitude. Dans le cas contraire, il sert uniquement de comparaison avec les autres capteurs. Les valeurs minimales et maximales et les intervalle de confiance ont alors été utilisées pour estimer l'incertitude.

A noter que ces estimations sont uniquement valables dans les conditions du test, et peuvent être différentes de celles en conditions réelles.

2.4.3 Evaluation de la justesse

Les tests de justesse ont pour but de quantifier l'erreur systématique entâchant les mesures des capteurs. Celle-ci étant la même pour des mesures d'une même valeur, elle peut donc être compensée. Elle peut néanmoins varier en fonction de la valeur de la grandeur mesurée. On peut par exemple imaginer que, en augmentant la hauteur ou la température, cette erreur augmente. Cependant, pour plusieurs mesures à une même hauteur et température, elle reste identique.

Afin d'éliminer les erreurs aléatoires des mesures, et ne conserver que celle de justesse, la moyenne de jeux de mesure a été utilisée comme valeur mesurée par le capteur. Si on réalise plusieurs jeux de mesure à la même hauteur, on remarque que la moyenne calculée n'est pas toujours identique. Ceci souligne le fait qu'elle suit elle aussi une loi de probabilité, et allons donc chercher à minimiser sa variabilité. En considérant un jeu de mesure de taille n , comme une suite de réalisations de variables aléatoires indépendantes et suivant une distribution identique de paramètres (μ, σ^2) , le théorème Central Limite atteste que la moyenne du jeu de mesure suit une loi normale de paramètres $(\mu, \frac{\sigma^2}{n})$. Ayant déterminé l'écart type pour une mesure, lors de l'évaluation de l'incertitude (Section 3.1), on constate alors que pour faire baisser la variabilité de la moyenne, il suffit d'augmenter la taille des jeux de mesures. L'écart type le plus élevé étant de 1.119mm pour le JSN SR04T, des jeux de 120 mesures (soit 2 minutes à 1Hz) permettent alors de concentrer les valeurs entre $\pm 3\sigma = 0.1\text{mm}$.

En réalité, pour calculer la distance, deux grandeurs doivent être mesurées : le temps de parcours de l'onde sonore, et la température de l'air ambiant. Nous pouvons donc séparer l'erreur de justesse en deux composantes, liées à chacune de ces mesures. Pour réduire le temps de réalisation et la complexité des tests, nous avons choisi de les estimer indépendamment, en réalisant deux tests par capteur : un à température constante, et hauteur variable, afin d'évaluer la justesse du capteur même ; et un à hauteur constante, et température variable, afin d'évaluer la qualité de la compensation de température. Les erreurs déterminées serviront à corriger la mesure de temps et la compensation de température. Pour quantifier l'erreur de justesse sur les plages de mesures des capteurs, nous allons donc réaliser pour chaque capteur, des jeux de 120 mesures, à différentes hauteurs. Les incréments de hauteur ont été définis arbitrairement à 10cm pour l'URM14, et 50cm pour le JSN SR04T et l'A01NYUB, afin de parcourir l'entièreté des plages de mesure, sans demander trop de temps.

Le tracé des écarts des moyennes calculées aux valeurs considérées vraies, par rapport à ces dernières, permettra de représenter l'évolution des erreurs de justesse sur la plage de mesure des capteurs. La détermination de l'équation régissant ces écarts permettra de compenser les compen-

2.5 Exposition au soleil

Les altimètres ultrasonores sont sensibles au rayonnement solaire. Si exposés directement à celui-ci, ils chauffent plus que l'air ambiant. La température qu'ils mesurent n'est donc plus la bonne et la valeur fournie par le capteur se retrouve faussée.

La méthode à suivre pour évaluer le comportement des capteurs au soleil n'a pas encore été définie.

3 Résultats

3.1 Evaluation de l'incertitude

L'objectif de ces tests est de quantifier l'incertitude des capteurs, afin de le comparer leur fidélité, et ensuite travailler sur leur justesse et leur compensation de température.

Avant de comparer les trois capteurs, le mode de compensation de température introduisant le moins de variabilité a d'abord été identifié chez l'URM14. Deux tests ont donc été réalisés dans les conditions décrites Section 2.4.2, l'un en compensation interne, et l'autre en compensation externe avec un DS18B20. La Figure 3 présente la répartition des écarts des mesures à leur moyenne, pour ces deux sources de température. Avec le Tableau 3, ils permettent de constater que la compensation interne au capteur est la méthode donnant les résultats les plus fidèles. Cette dernière a donc été utilisée pour la comparaison avec le reste des capteurs.

On peut également remarquer une phase transitoire durant la première heure d'acquisition sur les deux jeux de mesures. Elle est décroissante pour la compensation externe, et croissante et représentant une grande partie de la variabilité, pour la compensation interne.

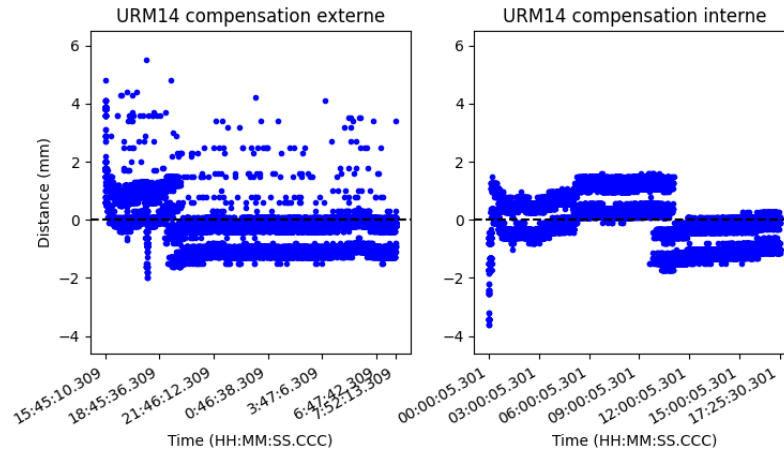


FIGURE 3 – Ecarts à la moyenne des mesures de l'URM14 en compensation interne et externe de température

	Compensation externe	Compensation interne
Ecart type (mm)	0.642	0.802
Min/Max (mm)	-2 / 5.5	-3.62 / 1.58

TABLE 3 – Comparaison de la variabilité introduite par les compensation de température de l'URM14.

La Figure 4 présente la répartition des écarts à la moyenne des mesures, pour les trois capteurs au cours des tests.

Le Tableau 4 présente la synthèse statistique des écarts à la moyenne du test.

Les histogrammes et les tests de Kolmogorov-Smirnov permettent de constater qu'aucun des jeux de données ne suit de loi normale. L'écart type ne sert alors que de comparaison, et ce sont

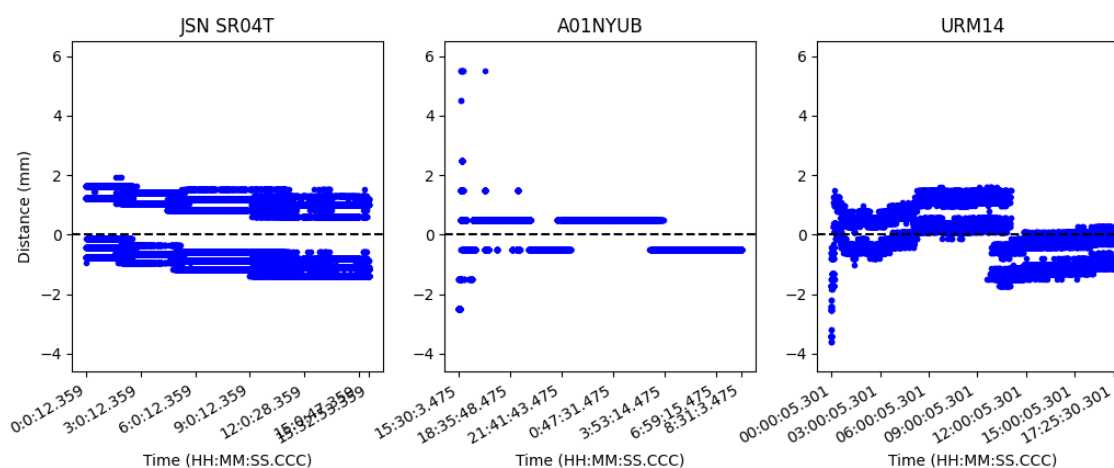


FIGURE 4 – Répartition des écarts à la moyenne

Les écarts supérieurs à 6mm de l'A01NYUB, ne représentant que deux valeurs, on été omis sur ce graphique.

	JSN SR04T	A01NYUB	URM14
Date	27/07/2023	19/07/2023	26/07/2023
Plage horaire	De 0:00:12 à 15:32:53	De 15:30:03 à 8:31:03	De 0:00:05 à 17:25:30
Taille de l'échantillon	55 897	59 337	62 726
Ecart type (mm)	1.119	0.542*	0.802
Distribution			
Test KS Statistique / p-valeur	0.22 / 0.0	0.33 / 0.0	0.39 / 0.0
Min / Max (mm)	-1.400 / 1.947	-2.497 / 25.503	-3.617 / 1.582
Intervalle de confiance à 100%	± 1.947	± 25.503	± 3.617
Intervalle de confiance à 99.9%	± 1.65	± 2.5	± 1.72
Intervalle de confiance à 95%	± 1.52	± 0.51	± 1.32
Valeurs aberrantes Nombre / %	30 / 0.05%	1924 / 3.24%	165 / 0.28%

TABLE 4 – Synthèse statistique des écarts à la moyenne, par capteur

* Les écarts supérieurs à 6mm de l'A01NYUB, ne représentant que deux valeurs, ont été omis pour le calcul de l'écart type, car il est sensible aux grands écarts ; et sur les histogrammes pour mieux visualiser l'étalement des mesures. Le résultat produit est plus représentatif de la variabilité du capteur. Elles ont néanmoins été prises en compte pour le calcul de la moyenne et des intervalles de confiance. Les bornes des intervalles de confiance ont été calculées à partir des proportions, et non des écarts types.

les intervalles de confiance qui serviront à estimer l'incertitude.

Ces derniers montrent que 100% des mesures du JSN SR04T sont comprises entre $\pm 1.947\text{mm}$, celles de l'A01NYUB entre $\pm 25.503\text{mm}$, et celles de l'URM14 entre $\pm 3.617\text{mm}$. Les bornes de ces intervalles décroissent plus ou moins vite, en fonction du capteur, avec la proportion de mesure souhaitée. La décroissance la plus rapide est constatée chez l'A01NYUB, avec 99.9% des mesures comprises entre $\pm 2.5\text{mm}$, et 95% entre $\pm 0.51\text{mm}$. Il est suivi de l'URM14, pour lequel 99.9% des mesures sont contenues dans l'intervalle $\pm 1.72\text{mm}$, et 95% dans $\pm 1.32\text{mm}$. Enfin, 99.9% des valeurs du JSN SR04T sont comprises entre $\pm 1.65\text{mm}$, et 95% entre $\pm 1.52\text{mm}$.

On constate également une perte de mesures de 3.24% chez l'A01NYUB, pourtant quasi nulle chez les autres capteurs.

3.2 Evaluation de la de justesse

Ces tests n'ont pas encore été réalisés.

3.3 Exposition au soleil

Ces tests n'ont pas encore été réalisés.

4 Discussion

4.1 Evaluation de l'incertitude

Les tests d'incertitude ayant montré que les jeux de mesures ne sont pas normalement distribués. Des intervalles de confiance, représentatifs de l'incertitude compte tenu de la taille des jeux de mesures, ont donc été calculés.

Les résultats des intervalles de confiance permettent de conclure que, pour un intervalle contenant 100% des mesures, le JSN SR04T est notre meilleur capteur. Cependant, lorsqu'on diminue le niveau de confiance, on constate que l'A01NYUB est nettement plus fidèle que ses concurrents. L'URM14, le plus cher de ces capteurs, ne semble pas pouvoir rivaliser avec le JSN SR04T pour des niveaux de confiance à 100% et 99.9%, ni avec l'A01NYUB à 95%.

Grâce à la compensation de l'erreur de justesse, les capteurs seront calibrés par rapport à la moyenne de leurs mesures. Pour des mesures ponctuelles, l'A01NYUB peut donc être utilisé, au risque de mesurer avec une erreur de 25.503mm dans 5% des cas, ou de ne pas obtenir de valeur dans 3.24% des cas. Les répartitions des mesures du JSN SR04T et de l'A01NYUB étant relativement symétriques, on peut imaginer moyenner plusieurs mesures pour estimer la valeur vraie. Cependant, plus le nombre de mesure est grand, plus il y a de chance d'obtenir une valeur de l'A01NYUB en dehors son intervalle à 95%.

Ces incertitudes ne sont valables que pour les conditions dans lesquelles ont été réalisés les tests. Celles-ci ont été choisies pour être relativement proches des conditions d'utilisation des capteurs, mais ne sont néanmoins pas identiques.

4.2 Evaluation de la justesse

Aucun résultat pour le moment.

4.3 Exposition au soleil

Aucun résultat pour le moment.

Sources documentaires

- [1] *Fiche technique - Caractéristiques statistiques des capteurs*. URL : https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=OCDgQw7AJahcKEwjQqbnYitSAAxUAAAAAHQAAAAQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.newsteo.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F07%2FFFICHE_TECHNIQUE-capteur_metrologie__Precision__incertitude.docx&psig=A0vVaw1Ff1R09Au-AeGE8dY1ljsM&ust=1691825346774180&opi=89978449 (visité le 04/08/2023).
- [2] *Justesse d'un capteur : Définition*. URL : <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/justesse-d-un-capteur> (visité le 18/07/2023).
- [3] Philippe MEYNE. *Fiche technique - Caractéristiques statistiques des capteurs*. Université Paris 12 Val de Marne. 2008. URL : <http://pv.meyne.free.fr/Capteur/Generalites.pdf> (visité le 04/08/2023).
- [4] *Qualité métrologique d'un appareil de mesure*. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Qualit%C3%A9_m%C3%A9trologique_d%27un_appareil_de_mesure (visité le 18/07/2023).