

Etalonnage de capteurs de température et conductivité, et détermination des incertitudes de mesure associées



Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		date de publication : 12/2007 nombre de pages : 29 bibliographie : oui illustration(s) : oui langue du rapport : Français
Validé par : Florence NEDELEC & Philippe RIOU Adresse électronique :		
Titre de l'article Etalonnage de capteurs de température et conductivité, et détermination des incertitudes de mesure associées		
Contrat n° Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>		
Auteur(s) principal(aux) : F.JACQUELINE	IFREMER, Direction des Opérations, Laboratoire Environnement Ressources de Normandie.	
	Ifremer/DPO/LERN – Port en Bessin	
Encadrement(s) :		
Cadre de la recherche : métrologie		
Destinataire :		
Résumé : Cette étude a pour but de déterminer des incertitudes de mesure pour des thermo salinomètres Ysi de type 6560, et wTw LF197. Dans un second temps nous essayerons de quantifier l'influence du choix point de calibrage sur la qualité des mesurages, en fonction de la salinité du milieu mesuré.		
Abstract : The first aim of this experimentation is to calculate uncertainty of measurement for Ysi 6560 and wTw LF197 's sensors. In a second time we will try to quantify the influence of the choice of the calibration point for the quality of the measurements, in function of the environment measured.		
Mots-clés Incertitude de mesure, calibrage, température, salinité, conductivité.		
Words keys Uncertainty, gauging, temperature, salinity, conductivity		

SOMMAIRE

Introduction	5
Chapitre I : Matériels et méthodes	6
1. Matériels utilisés	6
2. Présentation des Méthodes	7
2.1 Etudes préliminaires Test d'évaporation	7
2.2. Calibrage des sondes wTw et Ysi6600 me92 en conductimétrie, dans une solution de «référence» de forte salinité à 25°C.	7
2.3. Etalonnage des sondes wTw et Ysi 6600 en conductivité Spécifique et température	7
2.4. Détermination d'incertitude de mesure élargie pour les capteurs de température et de conductivité Ysi et WTW	8
2.4.1. Bilan d'incertitude pour les capteurs de température	8
2.4.2. Bilan d'incertitude pour les capteurs de conductivité	10
2.5. Etudes complémentaires.	11
2.5.1 Calibrage des sondes en conductivité, à partir d'un bain de faible salinité; mesures effectuées dans un milieu en faible et forte salinité.	11
2.5.2. Calibrages des sondes en salinité, dans un bain de forte salinité à 30°C puis à 15°C	11
2.6. Tableaux récapitulatifs des différents tests effectués en conductimétrie	12
Chapitre II : Résultats	13
1. Etudes préliminaires	13
1.1. Test sur l'évaporation	13
1.2. Etalonnage de la sonde WTW	14
2. Détermination d'incertitude de mesure élargie pour les capteurs de température et de conductivité d'une sonde 6600	16
2.1. Etalonnage en température :	16
2.2. Bilan d'incertitudes	17
2.3. Vérification	17
3. Etalonnage en conductivité dans les conditions d'utilisations standard, étude de la salinité:	18
3.1. Résultats obtenus	18
3.2. Bilan d'incertitude	19
3.3. Choix de la gamme d'étalonnage	20
4. Etalonnage en conductivité dans les conditions d'utilisation standard, étude de la conductivité.	20
4.1. Résultats obtenus.	20
4.2. Bilan d'incertitude	21
5. Etude de la dérive des sondes.	22
5.1. Dérive en conductivité, résultats	22
5.2. Dérive en salinité, résultats.	22

6. Etudes complémentaires :	22
6.1. Calibrage des sondes	23
6.1.1. Calibrage en conductivité dans un bain de faible salinité, mesurages en salinité	23
6.1.2. Calibrage en forte salinité, mesurages dans un bain de forte salinité	24
6.2. Mesures de conductivité spécifique avec des sondes Ysi 6600	24
6.3. Etude de la sonde WTW sur la gamme de température 2-30°C, en conductivité spécifique et salinité.	25
6.3.1. Mesures en conductivité spécifique :	25
6.3.2. Mesures en Salinité	27
 Chapitre III. Conclusion	 28
1. Sonde Ysi 6600	28
2 Sonde WTW :	28
3 Sondes et macro Excel de référence :	29
3.1. Macro Excel :	29
3.2 : Appareils de référence :	29

Introduction

Ce travail a pour but de déterminer les incertitudes de mesures pour des sondes Ysi 6600 munies de capteurs de conductivité et de température, ainsi que pour un thermo salinomètre wTw LF197.

Les incertitudes de mesure pour la température sont déterminées suite à des séries de mesurage entre 0 à 30°C.

Pour la conductivité l'objectif est de calculer, dans un premier temps, des incertitudes de mesures, tant en conductivité qu'en salinité sur une gamme d'eau de mer de salinité variable (faible moyenne et forte). Les valeurs de salinité sont exprimées suivant l'échelle PSS78. Dans un second temps, l'influence du point de calibrage sur la qualité des mesurages est estimée, en fonction de la salinité du milieu mesuré.

Les appareils de référence utilisés sont :

- un thermomètre de précision AOIP PN5207, associé à deux sondes PT100 S1 et S2. Cet appareil est raccordé aux étalons nationaux par le biais d'étalonnages et vérifications annuelles par le biais d'un laboratoire accrédité COFRAC ;
- un conductimètre de référence Knick, étalonné et calibré régulièrement au Laboratoire de métrologie de l'IFREMER/Brest ;
- une macro Excel, développée par le Laboratoire de métrologie de Brest, capable de fournir des valeurs de conductivité spécifique, et de salinité de «référence », en fonction de la température et conductivité mesurées. Cette macro reprend la formule de salinité définie par la FAO.

Chapitre I : Matériels et méthodes.

1. Matériels utilisés

• Les bains d'étalonnage :

Deux bains d'étalonnage Thermo - Haake.

Contenance de la cuve 23 L

Sensibilité de la régulation de la température, 0,01°C

Résolution de l'affichage du régulateur, 0,1°C

Homogénéité du bain en température $\pm 0,03^\circ\text{C}$

Étalons utilisés, eau de mer filtrée ou dilutions d'eau de mer filtrée avec de l'eau douce

Mesurages : les valeurs obtenues avec le conductimètre sont le résultat de trois mesurages consécutifs identiques.

• Thermomètre AOIP de référence, et sondes de température S1 et S2.

L'AOIP PN 5207 est un appareil de mesure de température de haute précision à microprocesseur, résolution d'affichage à 0,01°C

Le thermomètre est équipé de deux capteurs à résistance thermométrique en platine (Pt100), référencées S1 et S2.

Cet ensemble de mesure est raccordé aux étalons nationaux, via un étalonnage réalisé par un laboratoire accrédité COFRAC.

Incertitude d'étalonnage : $\pm 0,05^\circ\text{C}$

• Conductimètre de référence Knick.

Le conductimètre de référence est utilisé pour le calibrage des sondes (Figure.1). Il est muni d'une sonde conductimétrique, et mesure la conductivité instantanée. Les valeurs de conductivité spécifique à 25°C, ou de salinité, sont calculées *a posteriori* avec une macro Excel, utilisant en entrée les valeurs de conductivité données par le conductimètre de référence d'une part, et les valeurs de température fournies par le thermomètre de référence AOIP d'autre part.

Résolution du conductimètre de référence : 0,01 mS.cm⁻¹

Incertitude d'étalonnage en salinité: $\pm 0,06$

Incertitude d'étalonnage en conductivité: $\pm 0,08 \text{ mS.cm}^{-1}$



(Figure 1 : Conductimètre de référence KNICK)

- **Conductimètre wTw LF197 me123.**

Les conductimètres wTw LF197 sont utilisés pour les mesures en mer. Leur constante de cellule est réglable ce qui permet l'ajustage des sondes par rapport au conductimètre de référence. Ces appareils mesurent la salinité et la température.

Résolution, 0,1 en mesure de salinité

Résolution, 0,1 mS.cm⁻¹ en conductivité.

Résolution, 0,1 °C en mesure de température.

- **Sonde Ysi 6600.**

Deux sondes multi - paramètres Ysi 6600, référencées me218 et me92 dans le système qualité du LERN sont utilisées pour les mesures *in situ*.(figure 2) Ces sondes sont munies de capteurs optiques pour la mesure de la turbidité, de la conductimétrie – salinité (type 6560), de l'immersion, de la température, et d'un capteur à membrane pour la mesure de l'oxygène dissous.



(Photographie 2 : Sonde Ysi 6600)

Résolutions du thermomètre : 0,01°C

Résolutions du salinomètre : 0,01

Résolutions du conductimètre : 0,01 mS.cm⁻¹

- **Logiciel EcoWatch.**

Les sondes Ysi 6600 sont reliées à un ordinateur par une plate-forme d'acquisition de données et sont pilotées par le logiciel EcoWatch . Ce programme permet le calibrage, et la programmation des sondes multi paramètres et des capteurs de température, par l'intermédiaire d'une interface de communication.

- **Macro Excel :**

Une macro Excel réalisée par le laboratoire d'étalonnage d'IFREMER/Brest est utilisée au LERN pour donner, à partir de valeurs de température et de conductivité, des valeurs de référence de conductivité spécifique et de salinité.

2. Présentation des Méthodes.

Afin de pouvoir déterminer au mieux des incertitudes de mesure pour les conductimètres utilisés au LERN, a été effectué un test préliminaire ayant pour but d'évaluer l'évaporation de l'eau de référence contenue dans le bain d'étalonnage en fonction du temps. En effet, il s'agit de ne pas imputer une éventuelle augmentation de la conductivité due à l'évaporation, à une dérive des capteurs

2.1. Test d'évaporation.

Pour ce test les matériels suivants sont utilisés

- Sonde de référence de température : S1 AOIP.
- Sonde de référence de conductivité : Knick.
- Sonde Ysi 6600, me92.
- Bain thermostaté : Haake V26.

La quantification de l'augmentation éventuelle de la conductivité de la solution étalon est faite par des mesurages étalés dans le temps, au moyen du conductimètre et du thermomètre de référence.

L'eau de mer sera portée à 25°C dans le bain d'étalonnage. Une fois la température du bain stabilisée, la conductivité est mesurée avec le Knick et avec la sonde, et les valeurs sont relevées environ toute les 30 minutes sur 5 heures. La première série est effectuée à T=0 heure.

Avant chaque relevé de mesure, les capteurs de température et salinité sont agités, sans les sortir du bain, pour les débuller.

2.2. Calibrage des sondes wTw et Ysi 6600 me92 en conductimétrie, dans une solution de «référence» de forte salinité à 25°C.

Les sondes utilisées pour cette expérience seront calibrées en conductivité, dans un bain à forte salinité à 25°C

La constante de cellule de la sonde wTw est ajustée

Les données de référence sont fournies par les appareils de référence cités précédemment.

2.3. Etalonnage des sondes wTw et Ysi 6600 en conductivité spécifique et température.

Une fois les calibrages réalisés, les deux sondes Ysi et la sonde wTw sont étalonnées en conductivité, conductivité spécifique salinité et température. Pour ce faire elles sont immergées successivement dans des bains de forte salinité, moyenne salinité et salinité faible.

Les bains de forte salinité sont de l'eau de mer filtrée.

L'eau de moyenne salinité est obtenue en vidangeant le bain jusqu'à ce que l'alarme de niveau bas se déclenche (environ une demie cuve). Le niveau est effectué avec de l'eau douce.

L'eau de faible salinité est obtenue suivant la même procédure que décrite au paragraphe précédent, avec un niveau d'eau de mer encore plus faible.

Ces trois bains de salinité différentes sont portés aux températures successives de 2°C, 5°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, et 30°C

Pour chaque point d'étalonnage, que ce soit en température et conductivité, sont relevées :

- la conductivité vraie du bain (3 mesures identiques successives) ;
- la température de référence toutes les minutes pendant 10 minutes ;
- la conductivité, conductivité spécifique à 25°C, salinité et température, toutes les minutes pendant 10 minutes pour les sondes.

2.4. Détermination d'incertitude de mesure élargie pour les capteurs de température et de conductivité pour les sondes Ysi 6600 et wTw sur une gamme de salinité (faible moyenne et forte salinité).

Les incertitudes de mesure élargies sont calculées pour les sondes Ysi 6600 en température, conductivité, conductivité spécifique à 25°C et salinité

Les incertitudes de mesure élargies sont calculées pour la wTw en conductivité spécifique à 25°C, et salinité

Pour les sondes Ysi 6600, les incertitudes de mesure seront calculées en prenant à chaque fois en compte le résultat le plus pénalisant des deux sondes, quelle que soit la salinité et la température de l'eau de référence considérée. Cette incertitude est applicable à tous les capteurs des sondes Ysi 6600.

Quant à la sonde wTw, elle n'est plus utilisée comme appareil de mesure dans le cadre des réseaux de surveillance. Pour cet appareil, L'étude permet de déterminer son incertitude de mesure et son erreur de justesse, afin de l'utiliser éventuellement au Laboratoire de métrologie en temps qu'étalon de salinité de secours.

2.4.1. Bilan d'incertitude pour les capteurs de température.

L'incertitude de mesure élargie (notée U) comprend plusieurs composantes (incertitudes types) susceptibles d'influencer le résultat de mesure.

Les composantes d'incertitude prises en compte pour le capteur de température sont les suivantes :

- Incertitude liée à l'étalon :

$$u_{t1} = \frac{\text{Incertitude d'étalonnage de l'étalon (SI)}}{\text{Coefficient d'élargissement}}$$

- Incertitude liée à la dérive de l'étalon

$$u_{t2} = \frac{\text{Dérive annuelle}}{\sqrt{3}}$$

- Incertitude liée à la résolution de l'étalon :

$$u_{t3} = \frac{\text{Résolution du thermomètre étalon}}{2\sqrt{3}}$$

- Incertitude liée à l'homogénéité du bain d'étalonnage :

$$u_{t4} = \frac{\text{Homogénéité du bain}}{3}$$

- Incertitude liée à la résolution de la sonde :

$$u_{t5} = \frac{\text{Résolution de la sonde}}{2\sqrt{3}}$$

- Incertitude liée à la fidélité de la sonde :

$$u_f = \text{écart type}$$

L'application de la loi de propagation de l'incertitude permet d'estimer l'incertitude composée u_c par la somme quadratique des incertitudes types :

$$u_c = \sqrt{u_{t1}^2 + u_{t2}^2 + u_{t3}^2 + u_{t4}^2 + u_f^2}$$

L'incertitude de mesure (U) est alors égale à l'incertitude composée multipliée par le facteur d'élargissement :

$$U = \pm k \cdot u_c \quad \text{avec } k=2$$

2.4.2. . Bilan d'incertitude pour les capteurs de conductivité.

Les causes d'incertitudes sur l'étalonnage des sondes de conductimétrie sont déterminées

L'incertitude de mesure avec les sondes de conductimétrie relève des facteurs suivants :

- Incertitude liée à l'étalon :

$$u_{t1} = \frac{\text{Incertitude d'étalonnage du conductimètre de référence}}{\text{Coefficient d'élargissement}}$$

- Incertitude liée à la dérive de l'étalon

$$u_{t2} = \frac{\text{Dérive annuelle}}{\sqrt{3}}$$

- Incertitude liée à la résolution de l'étalon

$$u_{t3} = \frac{\text{Résolution du conductimètre de référence}}{2\sqrt{3}}$$

- Incertitude liée à la résolution de la sonde :

$$u_{t4} = \frac{\text{Résolution de la sonde à vérifier (Ysi ou)}}{2\sqrt{3}}$$

- Incertitude liée à la fidélité de la sonde vérifiée (ou):

$$u_f = \text{écart type}$$

d'où

$$u_c = \sqrt{u_{t1}^2 + u_{t2}^2 + u_{t3}^2 + u_{t4}^2 + u_f^2}$$

et

$$U = \pm k \cdot u_c \text{ avec } k=2$$

2.5. Etudes complémentaires.

Afin de mieux appréhender l'influence du choix du point de calibrage pour les sondes Ysi6600, tant en conductivité - salinité qu'en température des tests complémentaires au-delà des étalonnages déjà réalisés sont effectués (Tableau 1).

Ces tests sont réalisés avec les mêmes matériels que précédemment, et les résultats obtenus sont issus de :

- trois mesurages identiques consécutifs pour la valeur de conductivité de référence ;
- la moyenne de 10 mesurages consécutifs effectués au rythme d'un relevé par minute, tant pour la conductivité- salinité que pour la température.

2.5.1 Calibrage des sondes en conductivité, à partir d'un bain de faible salinité ; mesures effectuées dans un milieu en faible puis en forte salinité.

L'objectif de l'étude est de déterminer l'incertitude de mesure des sondes lorsqu'elles sont calibrées dans un milieu de mesure différent de l'eau de mer, d'une salinité d'environ 33.

Le test consiste à calibrer les sondes dans de l'eau de mer de faible salinité (eau de mer diluée) et d'effectuer les mesures, sur toute la gamme de température dans ce milieu, puis dans un milieu de forte salinité. Le but est de quantifier les éventuelles distorsions dues au choix du point de calibrage par rapport au milieu de mesure considéré.

2.5.2. Calibrages des sondes en salinité, dans un bain de forte salinité à 30°C puis à 15°C

L'objectif est de calibrer les sondes en forte salinité à 30°C, puis d'effectuer comme précédemment l'acquisition de données sur la gamme de température 2°C à 30°C.

Ensuite les sondes sont calibrées en forte salinité à 15°C et l'acquisition de données est de nouveau effectuée sur la gamme de température 2°C à 30°C.

Ces deux tests ont pour but d'évaluer en terme de justesse l'influence éventuelle du choix de la température du point de calibrage en salinité.

2.6. Tableaux récapitulatifs des différents tests effectués en conductimétrie.

Calibrage	Salinité de l'étalon	Mesurages dans une solution de salinité		
		Forte	Moyenne	Faible
Conductivité	Forte	oui	oui	oui
Conductivité	Faible	oui	non	oui

Calibrage	Salinité de l'étalon	Mesurages dans salinité	
		Forte à 30°C	Forte à 15°C
Salinité	Forte	oui	oui

(Tableau 1 : Récapitulatifs des différents tests effectués en conductimétrie)

Chapitre II : Résultats.

1. Etude Préliminaire.

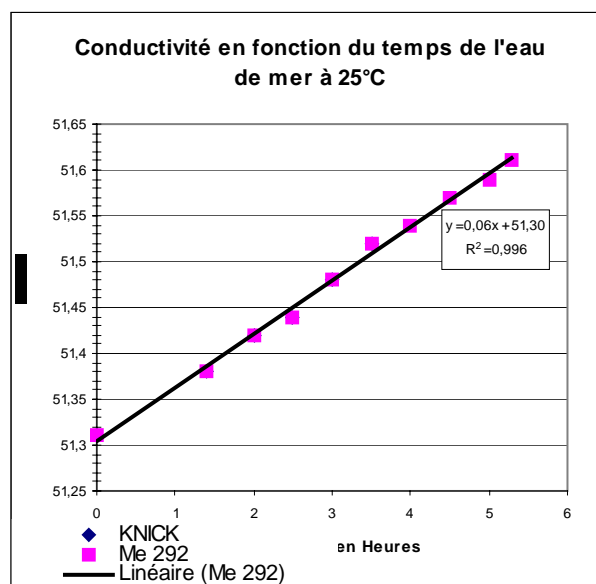
1.1 Test sur l'évaporation.

Les valeurs de conductivité de la sondes Ysi me92 et du conductimètre de référence Knick en fonction du temps, ainsi que la différence entre les deux sont présentées dans le tableau 2.

	Temps	C(Knick)	C (me92)	Différence
unité	Heures	mS.cm ⁻¹	mS.cm ⁻¹	mS.cm ⁻¹
11h50	0	51,31	51,31	0,00
12h10	1,4	51,38	51,38	0,00
13h50	2	51,42	51,42	0,00
14h20	2,5	51,44	51,44	0,00
14h50	3	51,48	51,48	0,00
15h20	3,5	51,52	51,52	0,00
15h50	4	51,54	51,54	0,00
16h20	4,5	51,57	51,57	0,00
16h50	5	51,59	51,59	0,00
17h10	5,3	51,61	51,61	0,00

(Tableau 2 : évolution de la conductivité dans le temps)

Tous les écarts obtenus au cours de ce test étaient égaux à 0,00 mS.cm⁻¹. Cette parfaite cohérence entre le conductimètre de référence et la sonde étudiée prouve que la sonde ne subit aucune dérive mesurable avec les moyens dont nous disposons, au cours d'une demie journée de mesure.



(Figure 1 : évolution de la conductivité en fonction du temps)

La courbe de l'évolution de la conductivité (Figure 1) en fonction du temps était linéaire (R^2 de 0,996). L'augmentation de la conductivité était de 0,06 mS.cm⁻¹ par heure, due *a priori* à l'évaporation de l'eau dans le bain à 25°C.

1.2. Etalonnage de la sonde wTw.

Cette opération consiste à quantifier l'erreur de justesse, à l'incertitude de mesure près, à partir des mesures de la sonde wTw en conductivité spécifique à 25°C. Cette sonde pourrait être utilisée comme référence pour le calibrage des sondes en cas d'absence ou de dysfonctionnement du conductimètre de référence Knick.

Les tableaux ci-dessous (Tableaux 3,4 & 5) regroupent les résultats de mesures de température et de conductivité spécifique nécessaires à l'étalonnage de la sonde wTw. Les mesures de températures ont été prises avec le thermomètre de référence, la conductivité spécifique a été relevée par la sonde wTw et par le conductimètre de référence Knick. Ces paramètres ont été étudiés à 25°C à trois salinités différentes : forte salinité (Tableau 3), moyenne salinité (Tableau 4) et faible salinité (Tableau 5).

Eau de mer				
	T°C(S2)	Knick	wtw	écart
unité	°C	mS.cm ⁻¹	mS.cm ⁻¹	mS.cm ⁻¹
M1	24,93	47,33	47,1	0,2
M2	24,93	47,33	47,1	0,2
M3	24,93	47,33	47,1	0,2
M4	24,93	47,33	47,1	0,2
M5	24,93	47,33	47,1	0,2
M6	24,93	47,33	47,1	0,2
M7	24,93	47,33	47,1	0,2
M8	24,93	47,33	47,1	0,2
M9	24,93	47,33	47,1	0,2
M10	24,93	47,33	47,1	0,2
moyenne	24,93	47,33	47,1	0,2
médiane	24,93	47,33	47,1	0,2
écart type	0,00	0,00	0,0	0,0

(Tableau 3 : Etalonnage de la conductivité Sp à Salinité forte)

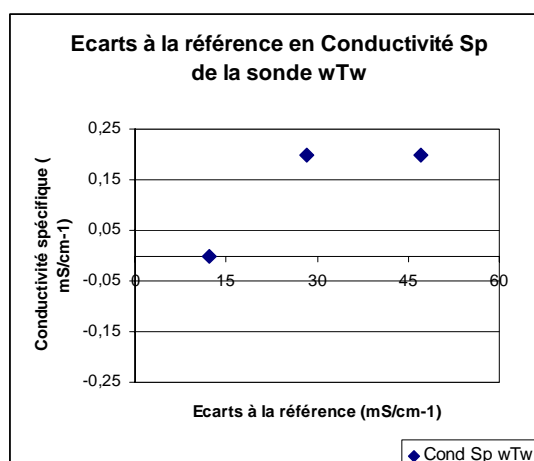
1/2 Eau de mer-1/2 Eau douce				
	T°C(S2)	Knick	wtw	écart
unité	°C	mS.cm ⁻¹	mS.cm ⁻¹	mS.cm ⁻¹
M1	24,91	28,22	28,0	0,2
M2	24,91	28,22	28,0	0,2
M3	24,91	28,22	28,0	0,2
M4	24,91	28,22	28,0	0,2
M5	24,91	28,22	28,0	0,2
M6	24,91	28,22	28,0	0,2
M7	24,91	28,22	28,0	0,2
M8	24,91	28,22	28,0	0,2
M9	24,91	28,22	28,0	0,2
M10	24,91	28,22	28,0	0,2
moyenne	24,91	28,22	28,0	0,2
médiane	24,91	28,22	28,0	0,2
écart type	0,00	0,00	0,0	0,0

(Tableau 4 : Etalonnage de la conductivité Sp à Salinité moyenne)

1/4 Eau de mer - 3/4 Eau douce				
	T°C(S2)	Knick	wtw	écart
unité	°C	mS.cm ⁻¹	mS.cm ⁻¹	mS.cm ⁻¹
M1	24,94	12,12	12,1	0,0
M2	24,94	12,12	12,1	0,0
M3	24,94	12,12	12,1	0,0
M4	24,94	12,12	12,1	0,0
M5	24,94	12,12	12,1	0,0
M6	24,94	12,12	12,1	0,0
M7	24,94	12,12	12,1	0,0
M8	24,94	12,12	12,1	0,0
M9	24,94	12,12	12,1	0,0
M10	24,94	12,12	12,1	0,0
moyenne	24,9	12,12	12,1	0,0
médiane	24,9	12,12	12,1	0,0
écart type	0,0	0,0	0,0	0,0

(Tableau 5 : Etalonnage de la conductivité Sp à Salinité faible)

La figure 2 représente la moyenne des écarts sur les mesurages entre la sonde référence et la sonde wTw, en conductivité spécifique.



(Figure 2 : Moyenne des écarts à la référence en conductivité spécifique de la sonde wTw)

En prenant en compte les caractéristiques techniques des appareils d'une part, et les résultats les plus pénalisants obtenus par la sonde wTw d'autre part, on obtient une incertitude composée élargie de $\pm 0,1$ mS.cm⁻¹ en conductivité spécifique à 25°C (c.f. tableau 5), et une erreur de justesse de 0,2 mS.cm⁻¹.

incertitudes types			u
Sonde étalon	ut1 : Incertitude d'étalonnage	0,08	0,00160
	ut2 : Dérive étalon	0,01	0,00003
	ut3 : Résolution étalon	0,01	0,00001
WTW	ut4 : Résolution wTw	0,1	0,00083
	uf : Fidélité	0,0	0,00000
somme quadratique			0,00248
Incertitude composée			0,0497
Incertitude élargie (pour k=2) U, à 25°C en mS.cm-1			0,10

(Tableau 6 : bilan d'incertitudes types sur la mesure de conductivité spécifique de la sonde wTw)

2. Détermination d'incertitude de mesure élargie pour les capteurs de température et de conductivité d'une sonde Ysi 6600.

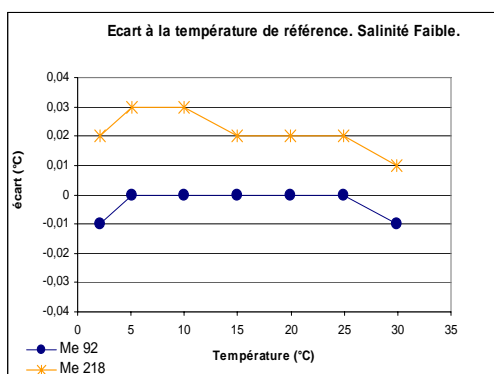
2.1 Etalonnage en température.

Initialement l'étalonnage en température des sondes ne devait être réalisé que sur trois séries de dix mesurages, sur une gamme de température allant de 2°C à 30°C à différentes salinités : faible salinité (série 1), moyenne salinité (série 3) et forte salinité (série 4).

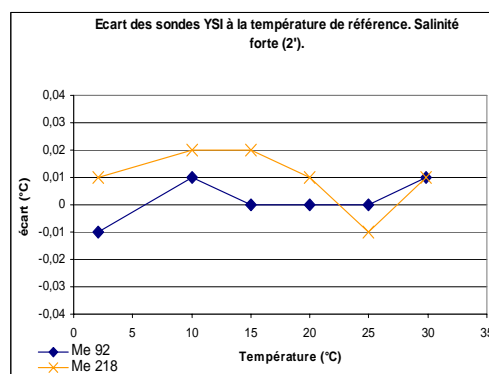
En fait les séries de mesure de température complémentaires réalisées lors de l'étude de la mesure de salinité ont aussi été traitées, afin d'obtenir un résultat plus robuste en terme de calcul d'incertitude.

La série 2 a été prise durant le test de dérive des sondes Ysi ; les séries 5 et 6 ont été relevées pendant les essais de calibrage des capteurs de conductivité des sondes.

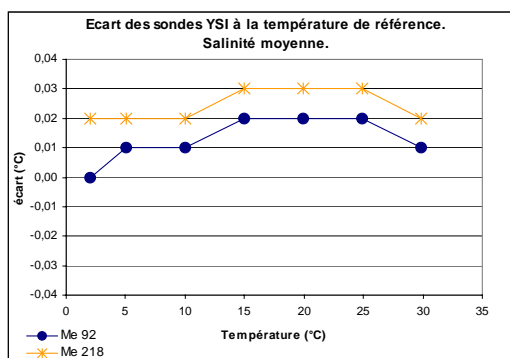
Les courbes suivantes (Figures 3 à 8) ont été obtenues en mesurant la température de bains d'eau de mer de différentes salinités avec deux sondes (me92 et me218) calibrées en conductivité.



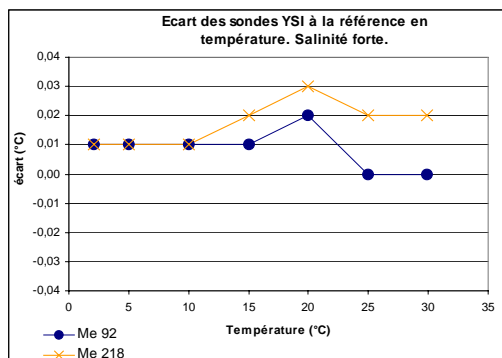
(Figure 3 : série 1)



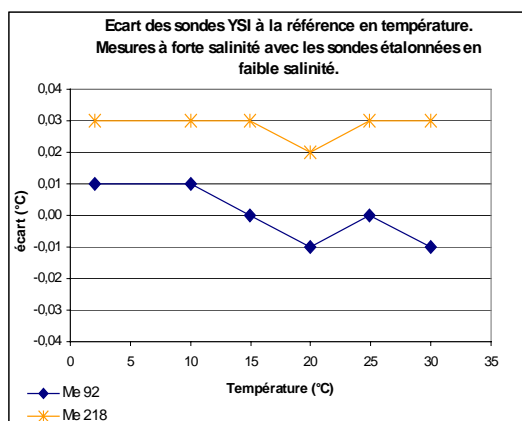
(Figure 4 : série 2)



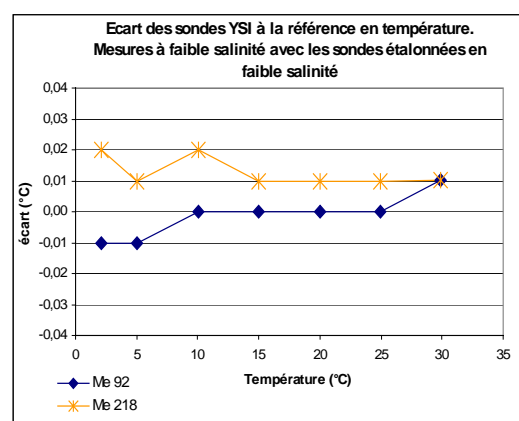
(Figure 5 : série 3)



(Figure 6 : série 4)



(Figure 7 : série 5)



(Figure 8 : série 6)

Les résultats des séries 1, 2, 3, 4 et 6 démontrent une très bonne fidélité des deux sondes en mesure de température, les écarts obtenus entre elles étant de l'ordre de deux fois, rarement trois fois la résolution.

Les résultats de la série 5, étaient un peu moins homogènes. La moins bonne homogénéité des résultats peut vraisemblablement s'expliquer par une absence de climatisation dans le laboratoire de métrologie, et la forte chaleur observée ce jour là dans le laboratoire.

Toutefois cette série 5 a été prise en compte dans le calcul d'incertitude afin de rendre ce dernier plus robuste.

2.2. Bilan d'incertitudes :

Les incertitudes types prises en compte sont regroupées dans le tableau 7: l'incertitude de résolution de l'étalon, et de la sonde fille ; l'homogénéité du bain d'étalonnage ; et l'écart type obtenu à partir des 6 séries de 10 mesures.

incertitudes types			u
Sonde étalon	ut1 : Incertitude d'étalonnage	0,05	0,025
	ut2 : Dérive étalon	0,01	0,006
	ut3 : Résolution étalon	0,01	0,003
Bain d'étalonnage			
	ut4 : homogénéité	0,02	0,007
Sonde Ysi 6600			
	ut5 : Résolution Ysi	0,01	0,003
	uf : Fidélité	0,00	0,000
somme quadratique			0,00072
Incertitude composée			0,0268
Incertitude élargie (pour k=2) U à 25°C, en °C			0,06

(Tableau 7 : Bilan d'incertitude sur les mesures de température avec les sondes Ysi 6600)

Une nouvelle EMT pourrait donc être fixée pour le LERN de l'ordre de cinq fois l'incertitude élargie
soit $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$

2.3. Vérification

L'EMT des sondes définie par le LERN est actuellement de $\pm 0,5$ °C, or l'addition des valeurs absolues de l'incertitude élargie (U) et de l'écart de justesse (Ej) doit être inférieure ou égale à l'EMT.

Tout les écarts types des séries de mesures étaient égales à 0,00 ce qui conduit à $U=0,06$ °C

Les calculs de $|U|+|Ej|$ sont présentés dans le tableau8 :

température	série 1	série 2	série 3	série 4	série 5	série 6
2°C	0,08	0,07	0,08	0,07	0,09	0,08
5°C	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,07
10°C	0,09	0,08	0,08	0,07	0,09	0,08
15°C	0,08	0,07	0,09	0,08	0,08	0,07
20°C	0,08	0,07	0,09	0,09	0,09	0,07
25°C	0,08	0,07	0,09	0,08	0,09	0,07
30°C	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,07

(Tableau 8 : facteurs U + écarts de justesse des séries 1 à 6)

L'incertitude composée élargie plus l'écart de justesse le plus important est donc de 0,09°C.

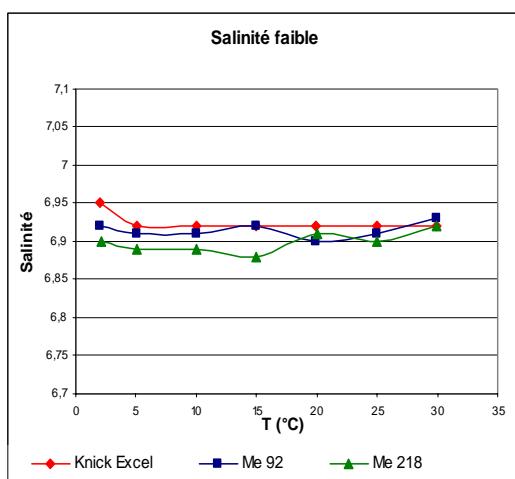
Les sondes ont été déclarées conformes suite à cette expérience.

3. Etalonnage en conductivité dans les conditions d'utilisation standard, étude de la salinité.

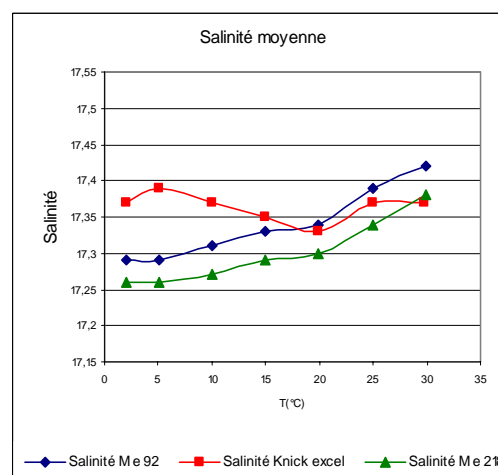
3.1. Résultats obtenus.

Les sondes ont été calibrées en conductivité «instantanée» dans le l'eau de mer à 25°C, de salinité forte (environ 33) et n'ont pas été calibrées de nouveau entre les différentes séries de mesurages.

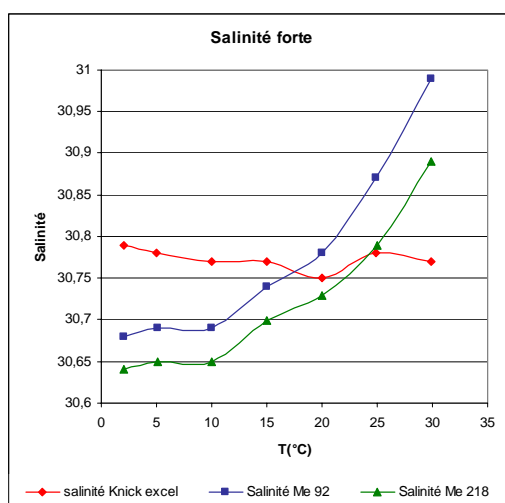
Les courbes ci-dessous (Figures 9,10 & 11) représentent graphiquement l'évolution des valeurs de salinité relevées au cours de trois séries de mesures dans de l'eau de faible salinité (Figure 9), de salinité moyenne (figure 10) et de salinité forte (figure 11).



(Figure 9)



(Figure 10)



(Figure 11)

3.2. Bilan d'incertitude.

Le bilan d'incertitude est composé des incertitudes types définies au § 2.4.1.

L'incertitude éventuelle provenant de la macro Excel calculant la salinité de référence en fonction de la température de référence et de la conductivité de référence, n'est pas prise en compte. En effet, les résultats obtenus en salinité par les sondes, et ceux calculés par la macro Excel étaient identiques, les modes de calculs étant normalisés par l'UNESCO (c.f «The practical salinity squal» dans la partie Rappel sur les capteurs en annexe.)

Le tableau 9 regroupe ces incertitudes types, sur la mesure de salinité, pour les sondes.

incertitudes types			u
Sonde étalon	ut1 : Incertitude d'étalonnage	0,06	0,00090
	ut2 : Dérive étalon	0,01	0,00003
	ut3 : Résolution étalon	0,01	0,00001
Sonde Ysi	ut4 : Résolution Ysi	0,01	0,00001
	uf : Fidélité	0,00	0,00000
	somme quadratique		0,00095
Incertitude composée			0,0308
Incertitude élargie (pour k=2) U, à 25°C, en salinité			0,07

(Tableau 9 : bilan d'incertitudes sur la mesure de salinité avec les sondes Ysi 6600.)

Là encore l'écart type des séries de mesures était égale à 0,00. L'incertitude sur la mesure de salinité, calculée pour chaque sonde était donc $U = \pm 0,07$

Pour juger de la conformité de ce type de capteur, l'incertitude la plus pénalisante des deux sondes en salinité, ajoutée à l'écart de justesse le plus important constaté est retenue. La somme doit être inférieure ou égale à l'EMT pour juger de la conformité, ou non, de ce type de matériel.

L'écart à la référence le plus important était à 30°C en forte salinité : constate (écart de 0,22)

$$\text{Donc } |U| + |E_j| = 0,29$$

Ce résultat est donc inférieur à l'EMT utilisée jusqu'à présent par le LERN qui est de 0,5

3.3. Choix de la gamme d'étalonnage.

Les mesures prises sur le terrain sont généralement comprises entre 5°C et 25°C, c'est pourquoi la gamme de température d'étalonnage peut être réduite à 5 -25°C.

Dans cette gamme, l'erreur la plus pénalisante était celle mesurée par la sonde me218 à 5°C en moyenne salinité : 0,14

En forte salinité sur la gamme 5-25°C, l'erreur la plus pénalisante était observée sur la sonde me 218 à 5°C : (écart = 0,13)

$$\text{Donc } |U| + |E_j| = \pm 0,20$$

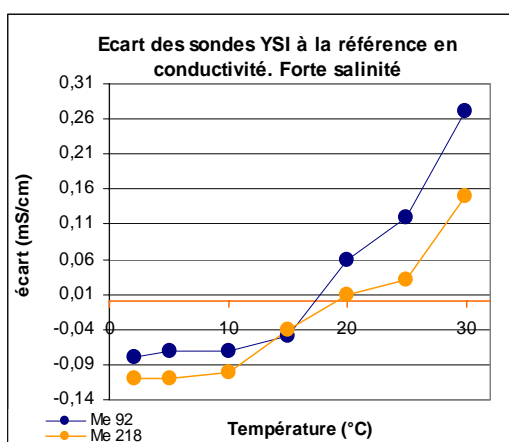
Ayant pris soin d'effectuer ces mesurages avec deux sondes de même type en fonctionnement depuis plusieurs années, cette incertitude plus l'écart de justesse de 0,20 peut être considéré comme fiable. Dans ce cas une nouvelle EMT peut être définie, de l'ordre de cinq fois l'incertitude élargie;

$$\text{soit } \pm 0,35$$

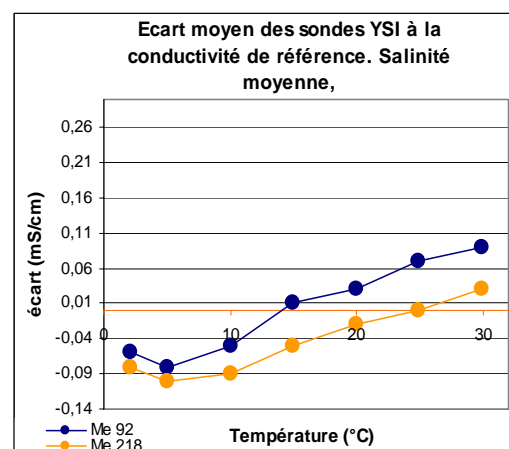
4. Etalonnage en conductivité dans les conditions d'utilisation standard, étude de la conductivité.

4.1. Résultats obtenus.

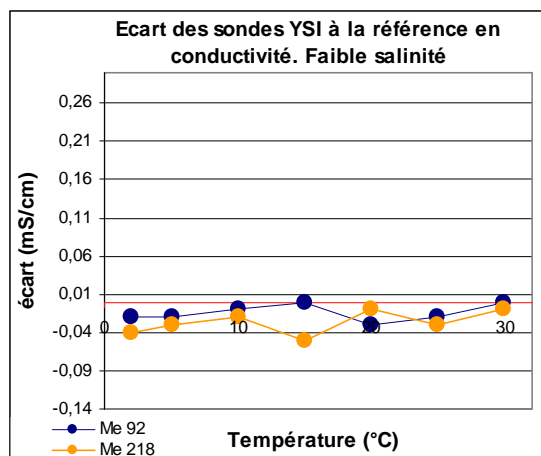
Les courbes ci dessous représentent les écarts à la référence, obtenus par les deux sondes en conductivité «instantanée» avec des «étalons» d'eau de mer à forte salinité (figure12), moyenne salinité (figure13) et faible salinité (figure14).



(Figure 12 : écart en conductivité, forte salinité)



(Figure 13 : écart en conductivité moyenne salinité)



(Figure.14: écart en conductivité, faible salinité)

L'étude de ces courbes montre que les capteurs avaient un comportement comparable en mesure de conductivité. Ils avaient tendance à sous-estimer la conductivité en basse température, et à la surestimer dans les températures plus élevées, le point d'équilibre se situant aux alentours de 15°C. Ceci était d'autant plus vrai que la salinité du milieu est importante.

D'autre part, les courbes ci dessus sont à rapprocher des courbes des figures 9, 10 & 11. Pour les mêmes points de mesure, les profils de courbe sont comparables, tant en conductivité «instantanée», qu'en salinité. Cela démontre que la macro Excel utilisée au LERN, et le mode de calcul de salinité intégré dans les sondes sont concordants.

Ainsi sur la gamme d'étalonnage 5°C-25°C, l'écart constaté le plus important a été mesuré dans un bain de forte salinité à 25°C (écart = 0,12 mS.cm⁻¹).

4.2. Bilan d'incertitude.

Le tableau 10 regroupe les incertitudes types pour la mesure de conductivité, obtenues avec les sondes Ysi.

incertitudes types			u
Sonde étalon	ut1 : Incertitude d'étalonnage	0,08	0,00160
	ut2 : Dérive étalon	0,01	0,00003
	ut3 : Résolution étalon	0,01	0,00001
Sonde Ysi	ut4 : Résolution Ysi	0,01	0,00001
	uf : Fidélité	0,00	0,00000
somme quadratique			0,00165
Incertitude composée			0,04062
Incertitude élargie (pour k=2) U, à 25°C, en mS.cm ⁻¹			0,09

(Tableau 10 : bilan d'incertitudes types sur la mesure de conductivité avec les sondes Ysi 6600.)

$$U = \pm 0,09 \text{ mS.cm}^{-1}$$

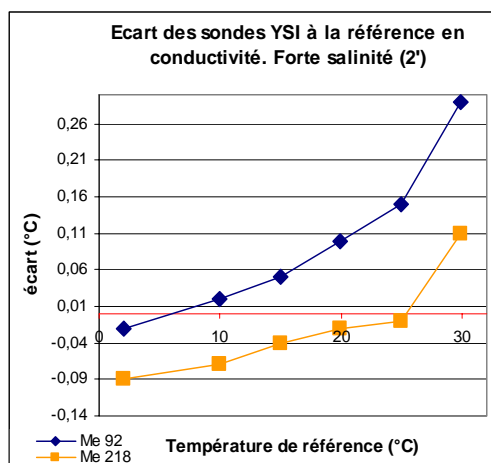
D' où

$$|U|+|E_j| = \pm 0,21 \text{ mS.cm}^{-1}$$

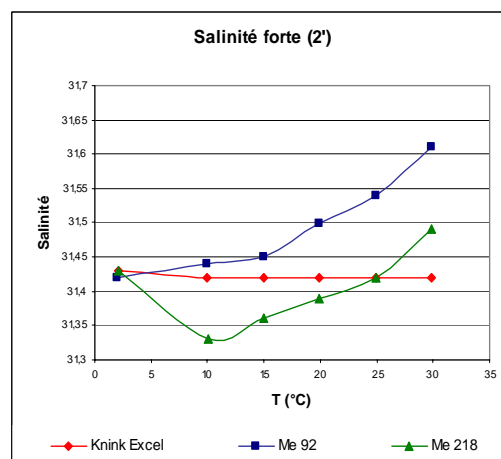
(c.f paragraphe 4.1.)

5. Etude de la dérive des sondes.

Une série de mesures a été réalisée en salinité élevée après plus de quatre jours d'utilisation sans interruption des sondes et après avoir subi les chocs thermiques imposés par les manipulations précédentes. Les deux graphiques suivants représentent l'écart à la référence en conductivité (figure 15) et en salinité (figure 16) mesurée par les sondes sur la gamme de température 2°C-30°C.



(Figure 15 : écart en conductivité é)



(Figure 16 : mesures de salinité)

5.1. Dérive en conductivité, résultats :

L'écart le plus grand constaté en conductivité après quatre jours d'utilisation a été mesuré par la sonde me92 à 25°C, soit 0,15 mS.cm⁻¹

L'incertitude de mesure plus l'écart de justesse sur la gamme 5°-25°C était donc de :

$$|U|+|E_j| = 0,24 \text{ mS.cm}^{-1}$$

5.2. Dérive en salinité, résultats.

L'écart type sur les séries de mesures est égale à 0,00

Sur la gamme 5°C-25°C l'écart de justesse le plus important a été mesuré par la sonde me 92 à 25°C , soit **0,12**

L'incertitude de mesure plus l'écart de justesse sur la gamme 5-25°C était donc

$$|U|+|E_j| = \pm 0,20$$

Ce test démontre que les sondes Ysi 6600 peuvent être utilisées 4 jours consécutifs, de façon intensive, en subissant notamment des chocs thermiques et halins importants sans voir leurs résultats dégradés au delà de l'EMT actuellement utilisée au LERN.

L'écart maximum de 0,12, obtenu au bout de quelques jours (soit un écart de justesse + U de ±0,14). Cette dérive maximale observée avec la sonde me218 confirme la proposition d'une nouvelle EMT en salinité de ± 0,25, en respectant un facteur 3 entre l'incertitude élargie, et l'EMT.

6. Etudes complémentaires.

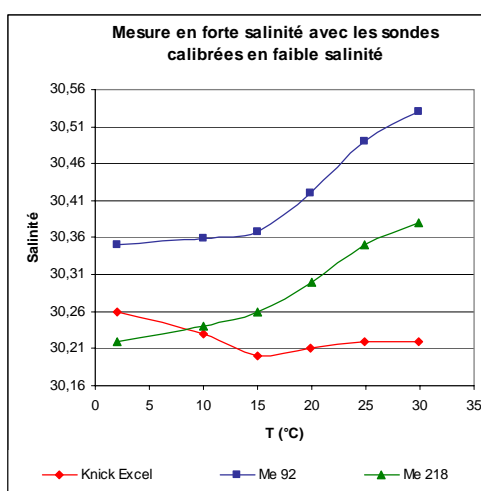
Au delà de la détermination des incertitudes de mesure pour les mesures de température, conductivité et salinité, de la vérification du respect des EMT actuelles en vigueur au LERN, et enfin de la proposition de nouvelles EMT, il était intéressant de tester différents modes de calibrage.

Durant la réalisation de ces différents tests sur les sondes, la sonde wTw a ainsi u être testée en salinité et conductivité spécifique.

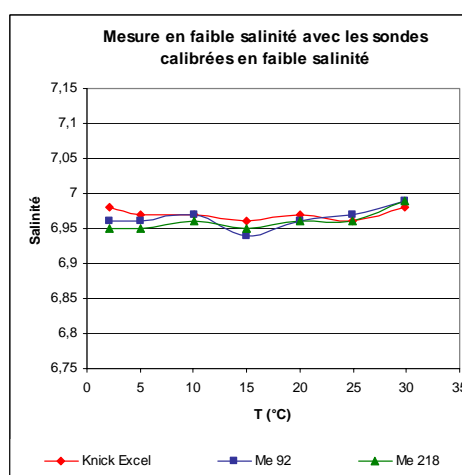
6.1. Calibrage des sondes.

6.1.1. Calibrage en conductivité dans un bain de faible salinité, mesurages en salinité :

Les graphiques ci dessous représentent l'évolution des valeurs de salinité données par les sondes me92, me218 et Knick (référence en salinité) en fonction de la température sur la gamme 0 à 30°C par pas de 5°C. La figure 17 représente les résultats obtenus avec des sondes calibrées en faible conductivité et ayant effectué des mesures dans un bain de forte salinité. La figure 18 représente les résultats obtenus avec les mêmes sondes, mais cette fois ayant effectué des mesures dans un bain de faible salinité.



(Figure17 : Mesures en forte salinité)



(Figure18 : Mesures en faible salinité)

a- Mesures en forte salinité avec un calibrage en faible salinité (figure 17).

Les écarts types des deux séries de mesures étaient nuls, et donc, comme précédemment l'incertitude U est de $\pm 0,07$

Par contre, sur la gamme de température 5°C-25°C, les écarts de justesse étaient importants. La sonde me92 enregistrait un écart de justesse, à 25°C, de 0,27, d'où,

$$|U|+|E_j| = \pm 0,34$$

Bien qu'important, ce résultat respecte toutefois l'EMT étant respectée. Cependant, calibrer en faible salinité pour effectuer des mesures en forte est à éviter car cela dégrade trop la qualité des résultats pouvant être obtenus avec ce type de matériel.

b- Mesures en faible salinité, avec un calibrage en faible salinité (figure 18).

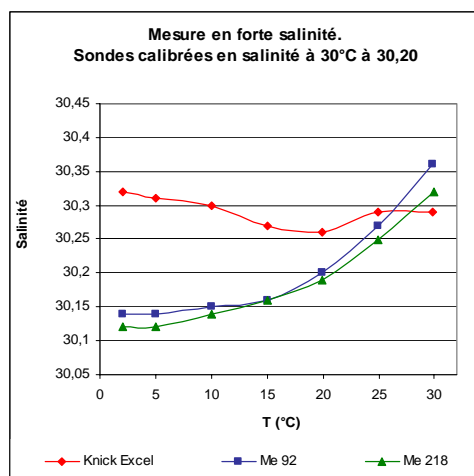
Les mesures en faible salinité étaient plus justes, l'écart le plus grand constaté sur la gamme de température 5°C-25°C étant de 0,02 (une fois avec la me218 à 5°C, et une autre fois avec la me 92 à 15° C). Dans ce cas,

$$|U|+|E_j| = 0,09$$

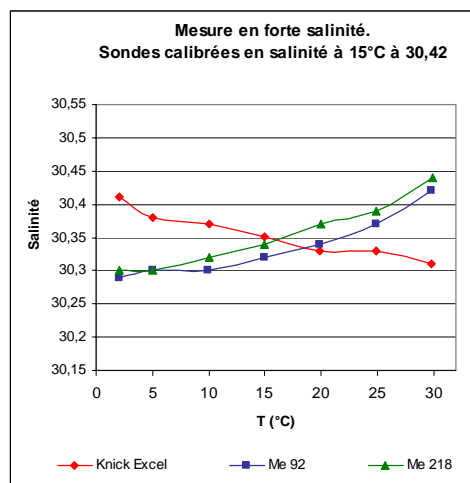
Ceci dit, ce type d'utilisation n'est pas fréquent au LERN. Néanmoins, pour des mesures de suivi d'estuaire, le calibrage en faible salinité est à conseiller.

6.1.2. Calibrage en forte salinité, dans un bain de forte salinité.

Ces courbes ont été réalisées en calibrant les sondes en salinité et non en conductivité comme pour les manipulations précédentes. Le graphique 19 à été réalisé à partir des mesures prises par les sondes calibrées en forte salinité à 30°C ; le graphique 20 à partir des mesures obtenues avec les sondes calibrées en forte salinité à 15°C .



(Figure 19 : calibrage en salinité à 30°C)



(Figure 20 : calibrage en salinité à 15°C)

Ces résultats montrent que le fait de calibrer en forte salinité à 30°C augmente les écarts en salinité, à faible et moyenne température (figure 19).

La salinité étant la plus juste aux alentours du point de calibrage, la température de 15°C semble donner les résultats les plus homogènes sur la plage 2°C-30°C (figure 20). Il serait donc souhaitable dorénavant de calibrer en forte salinité à 15°C pour les mesures effectuées dans le cadre des réseaux de suivi du LERN

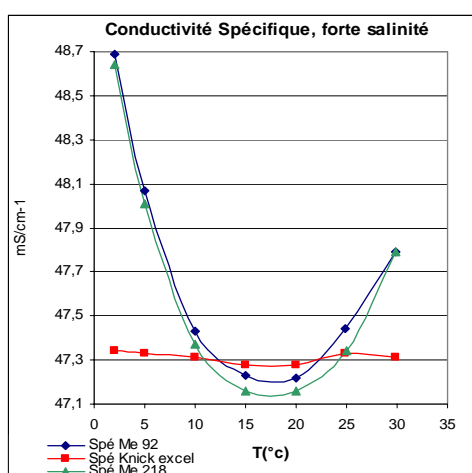
L'écart le plus grand constaté avec un calibrage à 15°C sur la gamme 2°C-25°C était de 0,10, ce qui implique que :

$$|U|+|E_j| = 0,17.$$

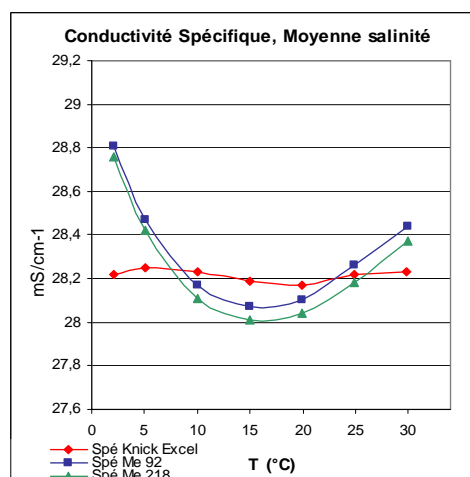
6.2. Mesures de conductivité spécifique avec des sondes Ysi 6600.

Comme décrit dans l'annexe sur le fonctionnement des capteurs, la conductivité spécifique est la conductivité mesurée ramenée à 25°C. Les sondes sont donc équipées d'un programme de calcul qui leur est propre pour les mesures de conductivité Spécifique. Lorsque les sondes sont calibrées en conductivité des distorsions dues au calcul peuvent être observées sur les mesures de conductivités spécifiques.

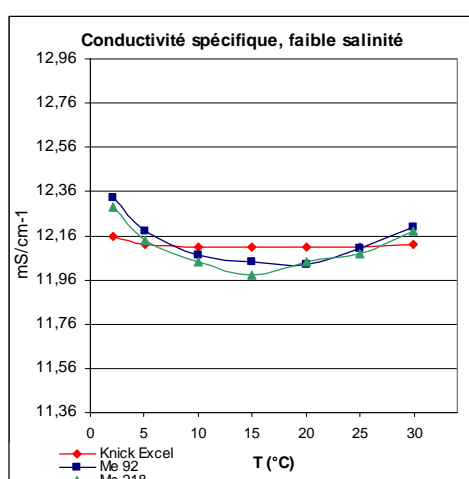
Les valeurs présentées dans les figures 21, 22, & 23 ont été prises en même temps que les mesures d'étalonnages des capteurs de température et de conductivité. La figure.24 a été constituée avec les mesures enregistrées pendant le test sur la dérive des capteurs de conductivité.



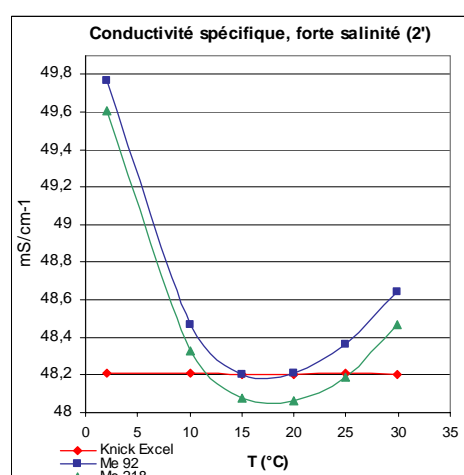
(Figure 21: conductivité spécifique forte salinité)



(Figure 22: conductivité spécifique salinité moyenne)



(Figure 23: conductivité spécifique, faible salinité)



(Figure 24 : conductivité spécifique, forte salinité)

Ces résultats montrent que plus la salinité est élevée plus les distorsions sont importantes en conductivité spécifique. Les mesures en conductivité spécifique sont difficilement exploitables si le calibrage est effectué en conductivité. Il serait donc intéressant d'étudier le comportement des sondes ayant été calibrées et mesurant en conductivité spécifique.

En conclusion, les mesures obtenues en conductivité spécifique avec un calibrage effectué en conductivité sont à proscrire avec les sondes. Ces résultats peu satisfaisants doivent provenir d'une différence entre la formule utilisée par le processeur de la sonde et celui qu'utilise la macro Excel.

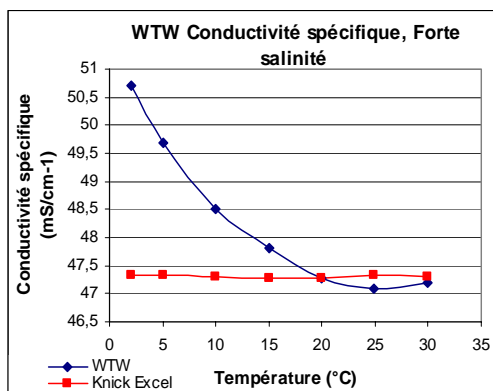
6.3. Etude de la sonde wTw sur la gamme de température 2-30°C, en Conductivité Spécifique puis en salinité.

Les sondes wTw ont été utilisées durant de nombreuses années par le LERN, la quantification de l'erreur commise par ces sondes peut donc être intéressante à effectuer, en mesure de salinité et de conductivité spécifique à 25°C.

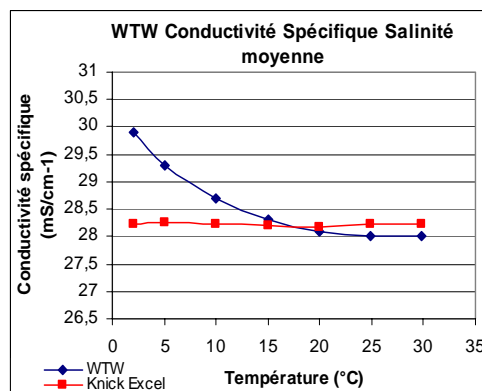
6.3.1. Mesures en conductivité spécifique.

Les courbes ci-dessous représentent l'évolution de la conductivité spécifique donnée par une sonde wTw sur l'ensemble de la gamme de température 2°C-30°C.

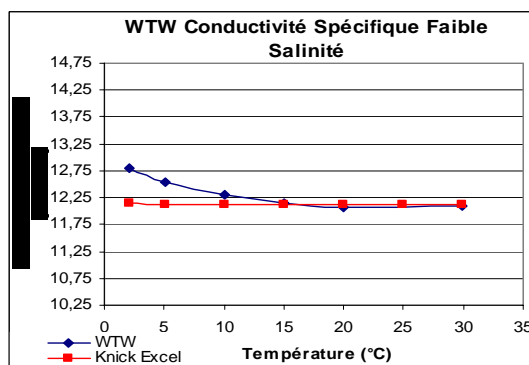
Les figures 25, 26 & 27 sont composées des valeurs enregistrées au cours de l'étalonnage des capteurs de température et de conductivité des sondes, respectivement à forte, moyenne et faible salinité.



(Figure 25 : wTw forte salinité)



(Figure.26: moyenne salinité)



(Figure.27: faible salinité)

De nouveau les résultats montrent que l'écart moyen à la référence augmente avec l'augmentation de salinité du milieu mesuré.

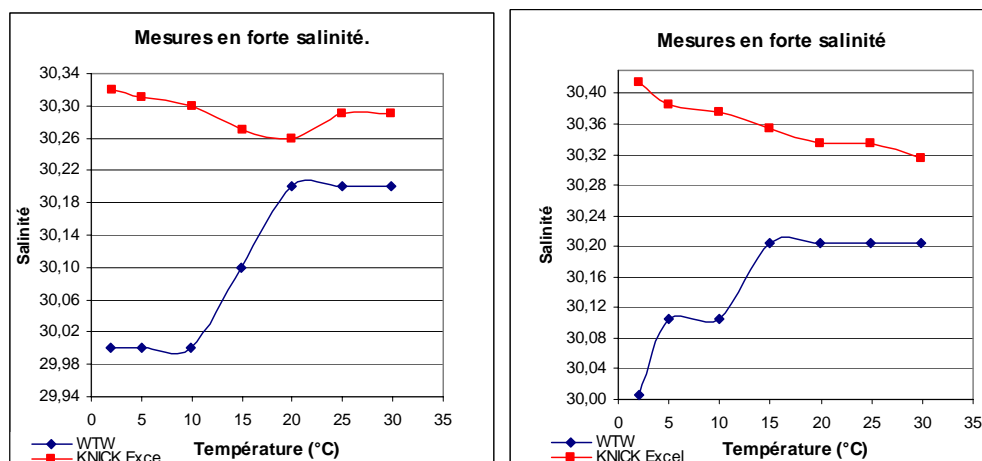
Sur la gamme 2°C-30°C en forte salinité l'écart le plus grand constaté était donc de **2,4 mS.cm⁻¹**

L'incertitude de mesure calculée pour la sonde wTw en conductivité spécifique (tableau 5) était donc de $\pm 0.2 \text{ mS/cm-1}$

D'où une incertitude composée élargie $|U|+|E_j| = 2,6 \text{ mS.cm}^{-1}$

6.3.2. Mesures en Salinité.

Les graphiques de la figure 28 représentent l'évolution de la salinité mesurée en fonction de la température, avec la sonde wTw (courbe bleue) et avec la référence en salinité (courbe rouge). Ces deux séries de mesures ont été réalisées pendant le calibrage des sondes en salinité dans de l'eau de mer de forte salinité : la première pendant la calibration des sondes à 30°C, puis en mesure sur la gamme de température 2 à 30°C (Figure 28, courbe de gauche), la seconde pendant le calibrage à 15 °C puis en mesure sur la gamme de température 2 à 30°C (courbe de droite).



(Figure. 28 & 29 : Mesures de salinité en forte salinité avec une sonde WTW)

Les différences de comportement de l'évolution des valeurs données par la sonde wTw sur ces deux séries de mesures notamment à basse température, étaient de l'ordre de la résolution de la sonde : $0,1 \text{ mS.cm}^{-1}$. Ces deux courbes prouvent une bonne répétabilité des mesures de l'appareil, surtout au regard de sa faible résolution.

Le tableau 12 regroupe les différentes incertitudes types prises en compte pour le calcul de l'incertitude élargie pour la sonde wTw, en mesure de salinité sur la gamme de température 2°C-30°C.

incertitudes types			u
Sonde étalon	ut1 : Incertitude d'étalonnage	0,06	0,00090
	ut2 : Dérive étalon	0,01	0,00003
	ut3 : Résolution étalon	0,01	0,00001
Sonde wTw	ut4 : Résolution wTw	0,10	0,00083
	uf : Fidélité	0,00	0,00000
Somme quadratique			0,00178
Incertitude composée			0,042
Incertitude élargie (pour k=2) U, à 25°C, en salinité			0,09

(Tableau 11: Bilan d'incertitude sur la mesure de salinité avec la sonde wTw)

L'écart à la référence le plus pénalisant constaté sur la gamme de température 5°C-25°, sur les deux séries de mesures, en salinité, était de 0,4. Ce qui implique que l'incertitude composée élargie plus l'écart de justesse de la sonde wTw était de : 0,49

Cette étude confirme donc le manque de justesse des sondes wTw en mesure de salinité. Ces sondes ne sont plus utilisées depuis quatre ans

Chapitre III. Conclusion.

1. Sonde Ysi 6600.

Les différents tests effectués débouchent sur les constatations suivantes :

- pour la température, le plus grand écart de justesse plus l'incertitude composée élargie observée sur 2 sondes dans la gamme de température 2-30°C est de $\pm 0,09$ °C. L'incertitude de mesure calculée est de $\pm 0,06$ °C

A la vue de ces résultats l'EMT du LERN, pour ces sondes, sur le gamme de température 2 à 30°C pourrait être ramenée de $\pm 0,5$ °C à

$$\pm 0,3^\circ\text{C} \text{ (5 fois l'U).}$$

- pour la mesure de salinité

L'étude des capteurs de conductivité et la détermination des incertitudes composées élargies sur les mesures de salinité, de conductivité spécifique, et de conductivité, a permis de mieux comprendre l'influence du point de calibrage sur le résultat des mesures.

Ces différents tests montrent que les sondes Ysi 6600, qu'elles soient calibrées en conductivité ou en salinité sont plus justes et fidèles que ne l'impose l'EMT actuelle du LERN. Les résultats obtenus avec ces sondes sont notamment fidèles, et répétables dans le temps. Quant à la justesse, les dérives observées sont faibles dans le temps, et sont compatibles avec l'utilisation qui en est fait dans le cadre des réseaux de surveillance, ces sondes étant vérifiées tout les 15 jours en bain d'étalonnage.

Par contre, les mesures de conductivité spécifique se sont avérées difficilement exploitables, sans doute à cause de la méthode de calcul interne utilisée par les sondes Ysi. En effet, les résultats obtenus dans ce mode de mesure révèlent des distorsions ou écarts significatifs avec le mode de calcul de la macro Excel, qui respecte la norme conseillée par l'UNESCO en terme de mesure de conductivité spécifique et de salinité. Cependant il pourrait être intéressant d'étudier de façon plus approfondie les résultats obtenus par une sonde Ysi 6600, calibrée en conductivité spécifique.

Afin d'améliorer la qualité des mesures de salinité, il semblerait judicieux de calibrer les sondes dans un étalon proche du milieu à mesurer, et à une température de 15°C plutôt que de 25°C .

L'incertitude de mesure calculée étant de $\pm 0,07$, sur la gamme de température 5°C-25°C, l'EMT de 0,5 utilisée par le LERN pour la mesure de salinité pourrait être abaissée à $\pm 0,35$ (soit 5 fois l'U)

2. Sonde wTw.

Les tests effectués sur la sonde wTw donnent une incertitude élargie, en salinité, de $\pm 0,09$, à 25°C. Si, comme pour les sondes Ysi, un facteur 5 entre l'incertitude élargie et l'EMT est retenu, cette dernière devra être de $\pm 0,5$ pour la wTw .

L'étalonnage en Conductivité Spécifique à 25°C de la sonde wTw révèle une incertitude composée élargie plus écart de justesse de $0,3 \text{ mS.cm}^{-1}$, mais seulement à une température du bain d'étalonnage proche de 25°C (24.9°C à 25.0°C). En effet, cette sonde donne des résultats dont l'erreur de justesse augmente avec la baisse de

température du milieu de mesure, et l'augmentation de salinité (c.f. figures 25, 26 & 27). Le point le plus juste en forte salinité (± 33) se situe à 20°C.

3 Sondes et macro Excel de référence.

3.1. Macro Excel.

Cette macro Excel, mise au point au laboratoire de métrologie d'IFREMER/Brest, permet de calculer les conductivités spécifiques et salinité à partir d'une température et d'une conductimétrie «instantanée», répondant aux spécificités définies par l'UNESCO en terme de mesurage de la conductivité et salinité.

Manifestement les sondes intègrent cette même formule pour la mesure de Salinité. Les résultats des sondes d'une part, et le conductimètre de référence Knick utilisé avec le thermomètre AOIP donnent des résultats identiques.

Par contre, la différence observée entre les résultats obtenus par la macro Excel d'une part, et les sondes Ysi 6600 d'autre part, en conductivité spécifique, tend à prouver que la formule intégrée dans les sondes Ysi 6600 ne suit pas les recommandations de l'UNESCO.

3.2 : Appareils de référence.

Que ce soit le conductimètre de référence, le thermomètre de référence, et les bains d'étalonnage, ces appareils sont très fidèles, justes et répétables à condition que :

- pour le conductimètre la justesse de la mesure soit assurée en retenant la valeur issue de trois mesurages consécutifs identiques ;
- pour le thermomètre et le bain d'étalonnage, que du temps lui soit donné pour bien se stabiliser (au moins une demie heure entre chaque point de mesure, lors de l'élévation successive de température).