



HAL
open science

Développement et essais d'un salinomètre optique

Marc Le Menn

► **To cite this version:**

Marc Le Menn. Développement et essais d'un salinomètre optique. 7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Jan 2016, Saint-Nazaire, France. hal-01280210

HAL Id: hal-01280210

<https://hal.science/hal-01280210>

Submitted on 29 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement et essais d'un salinomètre optique

Marc Le Menn¹, Damien Malardé², Arnaud David², Patrice Brault², Philippe Grosso³, Jean Louis de Bougrenet de la Tocnaye³, Serge Le Reste⁴, Claude Podeur⁴

¹SHOM, 13 rue du Chatellier, CS 92803, 29228 Brest Cedex 2

²NKE Instrumentation, 56700 Hennebont, France

³TELECOM Bretagne, Département d'optique, Technople Iroise, 29238 Brest, France

⁴IFREMER RDT/I2M, ZI de la pointe du diable, BP 70, 29280 Plouzané, France

Marc.lemenn@shom.fr

Abstract: *Development and trials of an optical salinometer*

Salinity is the essential parameter for ocean dynamics studies. Its definition and using in the equations used to calculate the thermodynamic properties of seawater, have been revised in 2010, opening the possibility of new sensors developments. In this context, NOSS (NKE Optical Salinity Sensor) has emerged as one of the first underwater instrument for in situ refractive index measurement in the past years open up the scope of possibilities to access to density parameter. This achievement is the fruit of the cooperation between several institutions and the fruit of several years of developments and trials. NOSS sensor has been designed to be deployed in coastal environment and open-ocean waters up to 2000 m, especially on profiling floats of the Argo network.

1. Introduction

La salinité est une grandeur définie comme étant 'la fraction de masse de matière dissoute contenue dans un échantillon d'eau de mer, dans des conditions de référence ($t = 25$ °C et pression atmosphérique normale)'. Cependant, la quantité de matières dissoutes dans l'eau de mer ne peut pas être mesurée en routine par des capteurs spécifiques. De ce fait, la salinité est calculée traditionnellement à partir des équations de la PSS-78 (Practical Salinity Scale of 1978) [1] et de mesures de conductivité électrique, température et pression (appelées CTD). Or, depuis 2010, et l'apparition du TEOS-10 (Thermodynamic Equation Of Seawater – 2010) [2], la salinité absolue est devenue le paramètre à entrer dans ces équations. Si sa valeur peut être approchée à partir de S_p et de corrections empiriques, il n'existe toujours pas d'instrument permettant une approche directe de sa mesure. Contrairement à la conductivité électrique qui n'est sensible qu'au contenu ionique du milieu, l'indice de réfraction varie en fonction de l'ensemble des composants dissous. Le développement d'un instrument permettant de mesurer ce paramètre in situ, revêt alors un intérêt particulier.

Afin de répondre aux spécifications des océanographes et rester concurrentiel vis-à-vis des capteurs de conductivité, se pose d'emblée le problème de la résolution nécessaire sur la mesure d'indice ($>1.10^{-6}$), pour atteindre ou approcher l'incertitude de 0,002 nécessaire sur les mesures de S_p , et qui est atteignable, sous certaines conditions, avec des capteurs de

conductivité [3]. Se posent ensuite le problème de l'intégration mécanique de la partie optique pour fabriquer un instrument qui pourra résister à des immersions répétées à plus de 2000 m et celui de sa masse thermique, car il doit pouvoir réaliser des profils d'indice à des vitesses de descente entre 0,2 et 1 m/s. La salinité étant obtenue à partir d'équations polynomiales [4], comme dans le cas des mesures de conductivité, il est nécessaire d'aligner les temps de réponse du capteur d'indice sur celui du capteur de température afin d'éviter les artéfacts liés aux formules de calcul et à un mauvais échantillonnage des tranches d'eau [5]. Ce problème est particulièrement difficile à résoudre dans les premières couches océaniques où l'on peut rencontrer parfois des gradients de température supérieurs à 0,5 °C/m. La lumière solaire pouvant pénétrer jusqu'à une dizaine de mètres dans ces premières couches, le détecteur doit être protégé contre ses effets afin de ne pas biaiser les mesures. En zones côtières et en particulier dans les panaches des fleuves, la turbidité peut être importante. Il a été montré qu'elle pouvait avoir un impact non négligeable sur les mesures de déviation de faisceaux lumineux [6]. Le travail réalisé, et toujours en cours, consiste à répondre au mieux à toutes ces contraintes.

2. Rappels sur la salinité, la masse volumique et l'indice de réfraction

Les années 70 ont vu le développement de capteurs de conductivité utilisables in situ, ce qui a conduit à la définition de la salinité pratique a été adoptée en 1978, basée sur la mesure de rapports de conductivité alors que les précédentes définitions étaient basées sur la notion de chlorinité. S_p est une approche de la salinité absolue S_A , définie précédemment et, alors qu'elle s'exprime sans unité contrairement à S_A dont l'unité est le g.kg^{-1} , elle est utilisée pour calculer les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer telle que sa masse volumique, dont la variation est l'origine principale des courants marins. Cette approche a deux inconvénients principaux : toutes les eaux qui ont la même conductivité ont la même salinité pratique S_p , même si leur composition et leur chlorinité sont différentes, et, les substances 'non-ioniques' ne sont pas prise en compte. De plus, la conductivité électrique de l'eau de mer est fortement dépendante de sa température. Dans certaines zones océaniques, la température intervient pour 80 % des variations de conductivité. Cette sensibilité entraîne des problèmes d'alignement de temps de réponse et de correction en température des cellules de conductivité.

En se basant sur l'approche adoptée pour l'eau pure depuis les années 70 par l'IAPWS (*International Association for the Properties of Water and Steam*), le calcul des propriétés de l'eau de mer a été redéfini par un groupe de travail de l'UNESCO baptisé SCOR/IAPSO WG 127, en 2009. Ils ont créé le TEOS-10 ou *International Thermodynamic Equation of Seawater*, basé sur le potentiel de Gibbs qui est une fonction qui représente l'état thermodynamique d'un système. Pour l'eau de mer, cette fonction dépend de sa salinité absolue S_A , de sa température t et de sa pression p .

La salinité absolue S_A étant une notion complexe, afin de conserver un lien avec ce que l'on sait mesurer c'est à dire S_p , le WG 127 a adopté plusieurs définitions pour S_A . Ainsi, pour corriger les erreurs entre une composition standard déterminée par F. Millero [7] et S_p , une notion de salinité de référence S_R a été définie :

$$S_R = \left(\frac{35,16504}{35} \right) S_p \quad (1)$$

Pour de l'eau standard, $S_R = S_A$ et pour $S_P = 35$, $S_R = 35,165\ 04 \pm 0,007$ g/kg. Par contre, pour des eaux dont la composition (en fraction de masse des constituants) est différente de celle de l'eau standard, S_A n'est plus proportionnel à S_P , et il est nécessaire d'apporter une correction d'anomalie de salinité δS_A : $S_A = S_R + \delta S_A(p, \lambda, \varphi)$, où λ représente la longitude et φ la latitude où les mesures sont réalisées. En 2010 McDougall *et al.* [8] ont construit un algorithme qui permet d'estimer δS_A (de façon empirique) selon la zone géographique des mesures, mais le TEOS-10 autorise l'emploi d'autres moyens.

Parmi les autres définitions qui ont été adoptées, il y a S_A^{dens} ou 'salinité-densité' qui correspond à « la fraction de masse de la solution qui possède la même masse volumique que l'échantillon dont elle est issue, à la température de 25 °C et à la pression de 101325 P ». C'est cette définition qui se rapproche le plus de la notion de salinité absolue. La masse volumique peut se mesurer en laboratoire, avec une incertitude proche de celle requise (+/- 0,004 kg/m³), à l'aide de densitomètres à tubes vibrants, mais, il n'existe pas d'instrument permettant de réaliser cette mesure in situ. Le principe du tube vibrant peut difficilement être adapté aux mesures in situ. Or, il existe une relation directe entre l'indice de réfraction d'un liquide n et sa masse volumique ρ . Il s'agit de la relation dite de Lorenz – Lorentz :

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = A \cdot \frac{\rho}{W} \quad (2)$$

où A est la réfractivité molaire et W le poids moléculaire. D'où l'intérêt du développement d'un réfractomètre utilisable in situ, et la naissance du projet NOSS (NKE Optical Salinity Sensor).

3. Développement de l'instrument

NOSS est né d'une collaboration entre le SHOM et Télécom Bretagne, UMR Foton en 2005. Porté par la Société NKE, qui assure le développement des prototypes, le projet a été labellisé par le Pôle mer, et financé par le FUI et le Ministère de l'Industrie (DGE). L'IFREMER a rejoint le consortium pour la partie essais aux conditions d'environnement, protection contre le bio-fouling et intégration mécanique.

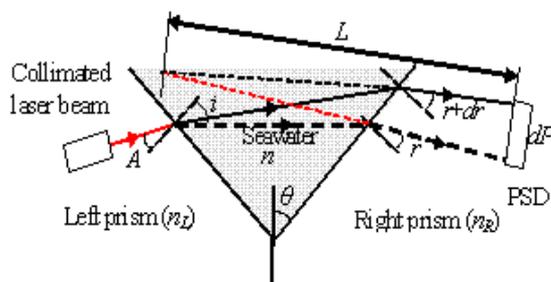


Figure 1 : schéma de principe du réfractomètre bi-prisme

Peu de techniques optiques permettent d'atteindre une résolution supérieure à 1.10^{-6} sur la mesure d'indice, dans la gamme assez large de variation de l'eau de mer ($1,330 < n < 1,341$ pour $0 < t < 40$ °C et $0 < S_A < 40$ g/kg). Afin de répondre aux contraintes

environnementales (température, pression) le choix s'est porté vers la fabrication d'un réfractomètre bi-prisme, avec une zone de mesure en V, composé d'une diode Laser et d'un détecteur PSD (Position Sensitive Device) [9] (Fig. 1).

La fabrication d'un premier prototype de laboratoire a conduit à la réalisation d'un prototype utilisable in situ, où le faisceau est replié pour placer la diode et le PSD dans le même plan. Un capteur de température (t_{externe}) a été intégré à proximité de la zone de mesure. Un autre a été intégré en contact avec la diode Laser (t_{Laser}) afin de pouvoir corriger ses variations de longueur d'onde (λ) en fonction des variations de température du milieu. Un capteur de pression (p) a également été ajouté au montage afin de disposer d'un ensemble autonome pouvant être intégré sur différents porteurs (Profileurs CTD, flotteurs dérivants, mouillages). Sur ces premiers prototypes, les verres ont été choisis pour avoir des dn/dt qui se compensent. Ils sont, de plus, peu sensibles à la pression : $dn/dp = 4.10^{-8}$ /dbar et cet effet peut être compensé par la mesure de pression additionnelle.

L'électronique permet d'acquérir les paramètres *Position*, t_{Laser} , t_{externe} et p , à la fréquence de 24 Hz. Les valeurs sont envoyées sur un port RS232C. Ces prototypes ont été testés et leurs capteurs ont été étalonnés au laboratoire de métrologie du SHOM. L'étalonnage en indice ne peut se faire que par l'utilisation de relations polynomiales mises au point en 1990 par Millard & Seaver [4]. Elles permettent de relier n à λ , t_{externe} , S_P et p avec une incertitude 10^{-6} à la pression atmosphérique. Selon ces auteurs, cette incertitude est cependant 60 fois moins bonne en pression.

3. Essais et mises au point

Une première campagne de mesures en mer a été réalisée en 2010, permettant d'obtenir des profils de salinité jusqu'à une profondeur de 2000 m, mais laissant apparaître également des problèmes de conception dont une infiltration d'eau sous les dépôts d'or servant de miroir et une sensibilité à la lumière solaire. Deux profils ont toutefois donnés des résultats très encourageants. Le premier a été réalisé jusqu'à 2000 m. Après application de l'algorithme de Millard et Seaver sur les données t , n , p mesurées, et extraction de la salinité, le tracé obtenu avec le prototype est très ressemblant au profil CTD correspondant. C'est le premier profil de salinité obtenu avec un capteur optique, à 2000 m [10].

Dans le cadre du projet EQUIPEX NAOS (*Novel Argo Ocean Observing System*), dont le but est le développement de flotteurs dérivants de nouvelle génération, un second prototype a été fabriqué en 2012, sur lequel les dépôts d'or ont été remplacés par des miroirs encastrés, et sur lequel la sensibilité à la lumière solaire a été réduite à l'aide d'un filtre placé sur le PSD. La taille des prismes a également été réduite, afin de permettre l'intégration de ce prototype sur des flotteurs dérivants du réseau ARGO. La résolution en indice, dont elle dépend, est restée sensiblement inférieure à 1.10^{-6} . Cet ensemble a été étalonné en laboratoire et testé une nouvelle fois durant une campagne en mer (Fig. 2). Des profils de salinité ont pu être extraits des profils d'indice.

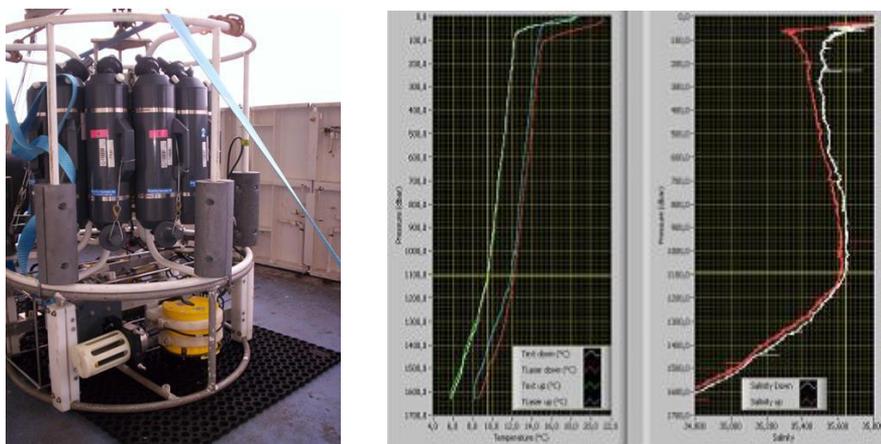


Figure 2 : prototype raccordé à un profileur CTD durant une campagne en mer réalisée en 2010, et exemple de profils de température et de salinité obtenus en 2012.

Ces profils restent bruités dans les premières couches océaniques (Fig.2), car d'une part, ce prototype a conservé une certaine sensibilité à la lumière solaire. Cette sensibilité a été corrigée sur une troisième version, par un algorithme de séquençage des mesures et de soustraction du niveau continu. D'autre part, l'instrument traverse alors des zones de forts gradients thermiques ce qui implique des problèmes d'alignement des temps de réponse entre le capteur de température et le réfractomètre et des problèmes d'inertie thermique. Ils sont connus et traités dans le cas des profileurs CTD à l'aide d'algorithmes de filtrage numériques [5] associés ou pas à un système de pompage permettant de fixer la vitesse du flux d'eau qui traverse la cellule et donc le temps de réponse des capteurs. Le problème est alors de déterminer les coefficients de ces équations. Cela reste à réaliser en effectuant des profils dans des zones de forts gradients thermiques.

4. Essais sur des flotteurs dérivants

Deux exemplaires d'un troisième prototype (Fig. 3) ont donc été intégrés sur des flotteurs dérivants du type PROVOR, destinés au réseau ARGO. ARGO est un programme de l'UNESCO/COI et du WMO dont le but est le développement d'un réseau global de 3000 flotteurs dérivants de sub-surface, pour suivre l'évolution de la température et de la salinité des premiers 2000 m de l'océan.

Ces exemplaires ont été étalonnés une première fois en juin 2014 avant leur intégration sur les flotteurs puis une seconde fois en juin 2015, à l'issue de leurs essais en mer, afin d'observer une éventuelle dérive de la mesure d'indice. Sur la Figure 3, des différences d'indice sont observables aux températures extrêmes, mais elles sont imputables à des différences de composition de l'eau de mer utilisée, plus qu'à une dérive instrumentale. Ces résultats mettent en évidence une difficulté supplémentaire de la maîtrise de la mesure d'indice.

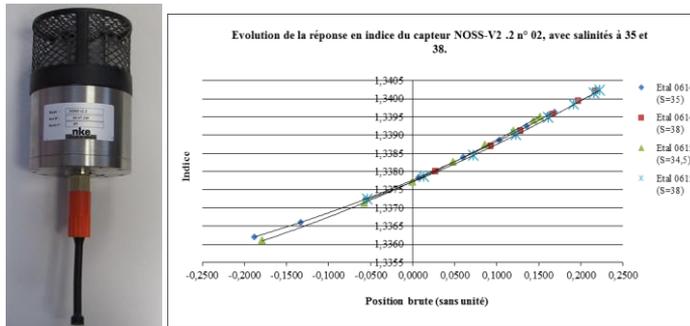


Figure 3 : photo du dernier prototype de capteur NOSS et résultat de son étalonnage en indice entre juin 2014 et juin 2015.

Les essais ont été réalisés en Méditerranée et les flotteurs ont été récupérés au bout d'une semaine après avoir réalisé des cycles à 1000 m, 1500 m et 2000 m de profondeur. Pour le traitement des données, les salinités pratiques obtenues à partir des capteurs CTD qui équipent en standard les flotteurs PROVOR, ont été converties en salinité absolues à l'aide de la relation (1), pour pouvoir être comparées aux salinités obtenues à partir des mesures d'indice.

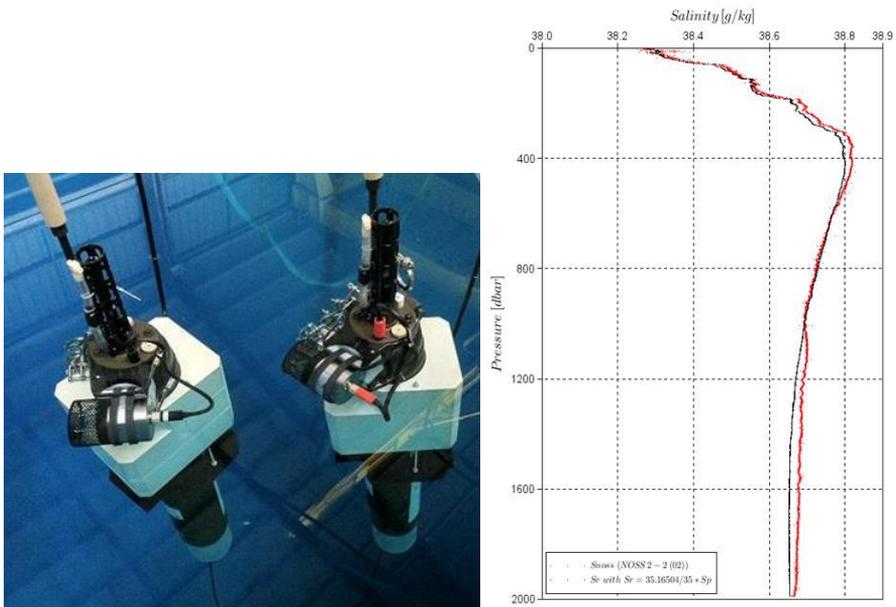


Figure 4 : capteurs NOSS intégrés sur des flotteurs dérivants durant leurs essais en bassin et comparaison d'un profil obtenu avec des capteurs CTD et avec le capteur NOSS.

Un exemple de résultat est visible sur la figure 4. On voit que le profil NOSS se superpose correctement au profil CTD. Des différences sont visibles entre 300 et 500 dbar.

Elles peuvent être imputables aux problèmes d'alignement de temps de réponse qui n'ont pas encore été résolus. Au-delà de 1000 dbar, des différences sont visibles également. Elles sont imputables à l'inexactitude des relations de Millard & Seaver en pression, mais des analyses sont toujours en cours. En fait, au-delà de 300 dbar, les écarts entre les deux procédés sont inférieurs à 0,025 g/kg, ce qui est compatible avec de potentielles anomalies de salinité δS_A du milieu, selon la publication de Woosley *et al.* [11]. Si cette hypothèse était validée, les capteurs NOSS auraient alors démontrés leur efficacité et leur utilité.

6. Perspectives

La société NKE envisage la commercialisation prochaine du capteur NOSS pour une application sur profileurs dérivants du réseau ARGO. L'incertitude sur les mesures en profondeur restera cependant limitée par celle des relations de Millard et Seaver [4]. Une action est en cours avec le LNE-CNAM pour lever le doute sur ce sujet et améliorer les bases de données indice-salinité-pression-température. Il a été démontré également que le bruitage des profils dépend en partie de la turbidité du milieu [6] qui introduit des biais dans les mesures réalisées à l'aide d'un PSD. Le principe d'un quatrième prototype où le PSD est remplacé par un détecteur CCD (Charge-Coupled Device) a été testé en laboratoire. Ce détecteur permet d'évaluer la part de lumière transmise. Cette information est introduite dans un algorithme qui permet de calculer le centre de masse d'un faisceau gaussien et ainsi de corriger les biais. Quand certains problèmes techniques de réalisation seront résolus, ce quatrième prototype permettra en plus de réaliser des mesures néphélogométriques et ainsi de caractériser les propriétés optiques du milieu, avec le même faisceau.

Bibliographie

- [1] - R. G. Perkin, E. L. Lewis, 'The Practical Salinity Scale 1978: Fitting the Data', IEEE J. Oceanic Eng., OE-5, n° 1, 9-16, 1980.
- [2] - IOC, SCOR and IAPSO, 'The International Thermodynamic Equation of Seawater 2010 (TEOS-2010): Calculation and Use of Thermodynamic Properties', Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides n° 56, UNESCO, 196 pp, 2010. (www.TEOS-10.org).
- [3] - M. Le Menn, 'Capteurs de conductivité en océanographie : état de l'art et perspectives', Revue des Sciences et Techniques de la Défense (RSTD), n° 64, 107-111, juin 2004.
- [4] - R.C. Millard, G. Seaver, 'An index of refraction algorithm for seawater over temperature, pressure, salinity, density and wavelength', Deep-Sea Res., Vol. 37, 12, 1909-1926, 1990.
- [5] - V. Mensah, M. Le Menn, Y. Morel, 'Thermal mass correction for the evaluation of salinity', Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Vol. 26, No. 3, 665-672, March 2009.
- [6] - B. Hou, P. Grosso, Z.Y. Wu, and J.L. de Bougrenet de la Tocnaye 'A turbidi-meter based on a refractometer using a charge-coupled device', Optical Engineering, 51(02), 2012.
- [7] - Millero F. J., Feistel R., Wright D. G., McDougall T. J., 'The composition of Standard Seawater and the definition of Reference-Composition Salinity Scale', Deep-Sea Res., I, 55, 50-72, 2008.
- [8] - McDougall T. J., Jackett D. R., Millero F. J., 'An algorithm for estimating Absolute Salinity in the global ocean', Ocean Sci. Discuss., 6, 215-242, 2009.
- [9] - D. Malardé, ZY Wu, P. Grosso, J.-L. de Bougrenet de la Tocnaye, M. Le Menn, "High-resolution and compact refractometer for salinity measurements", Meas. Sci. and Tech., vol. 20 015204, 2009.

- [10] - M. Le Menn, J.L. de Bougrenet de la Tocnaye, P. Grosso, L. Delauney, C. Podeur, P. Brault and O. Guillaume, 'Advances in measuring ocean salinity with an optical sensor', *Meas. Sci. and Tech.*, vol. 22, 8pp, 2011.
- [11] - Woosley R.J. et al., 'Estimating the absolute salinity (SA) in the world's oceans using density and composition', *Deep-Sea Res.*, 93, 14-20, 2014.

Remerciements

Ce travail a été financé en partie par le FUI sous l'acronyme NOSS, puis par l'ANR au titre de l'appel à projet des équipements d'excellence 2010, tache WP2.5 du projet NAOS.