
Développement et essais d'un salinomètre optique pour l'océanographie

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

1. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine,
13 rue du Chatellier, CS 92803, 29228 Brest Cedex 2, France
marc.lemenn@SHOM.fr

2. NKE Instrumentation, 56700 Hennebont, France

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

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

RÉSUMÉ. La salinité est un paramètre essentiel pour l'étude des propriétés dynamiques des océans. Sa définition et les équations utilisées pour calculer les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer, ont été revues en 2010, ouvrant la possibilité de développements de nouveaux capteurs. Dans ce contexte, le NOSS (NKE Optical Salinity Sensor) est apparu, ces dernières années, comme étant le premier instrument utilisable in situ pour réaliser des mesures d'indice de réfraction, ouvrant la voie à la possibilité de mesurer directement la grandeur masse volumique, qui ne peut être que calculée jusqu'à présent. Cette recherche a nécessité plusieurs années de développements et d'essais et une collaboration entre plusieurs institutions. Le Capteur NOSS a été conçu pour être déployé dans des environnements côtiers et hauturiers jusqu'à des profondeurs de 2000 m et, plus spécifiquement, sur des flotteurs dérivants du réseau ARGO.

ABSTRACT. Salinity is the essential parameter for ocean dynamics studies. Its definition and using in the equations used to calculate the thermodynamic properties of seawater, were 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 is designed to be deployed in coastal environment and open-ocean waters up to 2000m, especially on profiling floats of the Argo network.

MOTS-CLÉS : salinité, masse volumique, océan, eau de mer, indice de réfraction, capteur.

KEYWORDS: salinity, density, ocean, seawater, refractive index, sensor.

DOI:10.3166/I2M.15.1-2.53-63 © Lavoisier 2016

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 ($t = 25\text{ °C}$ et pression atmosphérique normale) ». Sa mesure est essentielle pour accéder à la connaissance de la masse volumique des océans, dont les variations spatiales et temporelles sont à l'origine des courants marins. 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*) (Perkin et Lewis, 1980) 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*) (IOC, SCOR and IAPSO, 2010), la salinité absolue est devenue le paramètre à entrer dans ces équations. Si sa valeur peut être approchée à partir de la salinité pratique 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 (Le Menn, 2004). 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 son inertie 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 (Millard et Seaver, 1990), 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 artefacts liés aux formules de calcul et à un mauvais échantillonnage des tranches d'eau (Mensah *et al.*, 2009). Ce problème est particulièrement difficile à résoudre dans les premières couches océaniques où l'on peut rencontrer parfois des gradients de température supérieurs à $0,5\text{ °C/m}$. 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 (Hou *et al.*, 2013). 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 1970 ont vu le développement de capteurs de conductivité utilisables *in situ*, ce qui a conduit à la définition de la salinité pratique (S_p) qui a été adoptée en 1978. Elle est basée sur la mesure de rapports de conductivité alors que les précédentes définitions étaient basées sur la notion de chlorinité. La chlorinité Cl est définie comme étant la masse (en g) des halogènes contenus dans un kilogramme d'eau de mer, les ions bromure et iodure étant remplacés par leurs équivalents en chlorure. C'est aussi défini comme étant 0,328 5234 fois le rapport de la masse d'argent pur nécessaire pour précipiter tous les ions chlore, brome et iode, sur la masse de l'échantillon d'eau de mer.

S_p est une approche de la salinité absolue S_A , définie précédemment et, alors qu'elle s'exprime sans unité car elle est mesurée à partir d'un rapport de conductivités (contrairement à S_A qui est en g.kg^{-1}), elle est utilisée pour calculer les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer, telles que sa masse volumique, dont la connaissance est d'une grande importance pour modéliser la dynamique des océans. Cette approche a deux inconvénients principaux : toutes les eaux qui ont la même conductivité ont la même salinité pratique S_p , même si leurs compositions et leurs chlorinités sont différentes et, les substances « non ioniques » ne sont pas prises 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 plus de 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 1970 par l'IAPWS (*International Association for the Properties of Water and Steams*), 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 Millero *et al.* (2008), 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 $S_p = 35$, $S_R = 35,165 04 \pm 0,007 \text{ g/kg}$. Le calcul de S_R permet de corriger une erreur systématique qui existait sur les mesures de salinité depuis l'origine de ces mesures. 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.* 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 Pa ». 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 en milieu marin. 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 ou masse molaire (en g/mol). Cette équation montre l'intérêt du développement d'un réfractomètre utilisable *in situ*, et l'intérêt du projet NOSS (*NKE Optical Salinity Sensor*). Cependant, l'indice de réfraction dépend aussi de la fréquence de l'onde électromagnétique qui traverse le milieu. Cette dépendance a été mise en équation par Sellmeier à partir des travaux de H. A. Lorentz. Son équation établit le lien entre l'indice de réfraction et la longueur d'onde de la lumière. L'équation de dispersion de l'eau de mer fait intervenir de plus sa salinité, sa température et sa pression.

3. Développement de l'instrument

Le projet 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.

Peu de principes optiques permettent d'obtenir la résolution et au final l'incertitude requises sur la mesure d'indice, pour concurrencer les mesures de conductivité et répondre aux recommandations émises par le WG 127 en 2007, à savoir : 1.10^{-6} sur la mesure d'indice à pression nulle, 3.10^{-6} sous haute pression (600 bar) 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 en plus aux contraintes environnementales (température, pression, turbidité, *bio-fouling*) 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 analogique du type PSD (*Position Sensitive Device*) (Malardé *et al.*, 2009) (figure 1). Une méthode de calcul différentiel a été utilisée pour déterminer la sensibilité théorique du montage (rapport dn/dP où P représente la position du faisceau mesurée sur le PSD) et étudier l'influence des différents paramètres opto-géométriques sur sa résolution. Ce calcul conduit à la relation suivante :

$$dn = \frac{n_R}{\sin(2\theta)} \sqrt{1 - \left(\frac{n_L \sin(A)}{n}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{n}{n_R} \sin(2\theta - i)\right)^2} \tan^{-1}\left(\frac{dP}{L}\right) \quad (3)$$

où L représente la longueur des prismes, A l'angle de sortie du faisceau du premier prisme d'indice n_L , θ le demi-angle d'ouverture des prismes, i l'angle de réfraction dans le milieu d'indice n et n_r l'indice du second prisme.

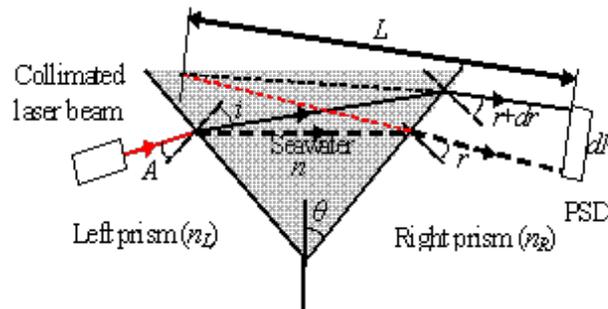


Figure 1. Schéma de principe du réfractomètre bi-prisme

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, mais il est toujours possible de corriger les erreurs résiduelles avec les mesures de température qui sont réalisées. La sensibilité du verre à la pression est connue : $dn/dp = 4.10^{-8}/\text{dbar}$. 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 (indice, température externe, laser et pression) ont été étalonnés au laboratoire de métrologie du SHOM, dans une cuve dont la température peut être stabilisée à moins de 0,001°C près, dans la gamme des températures océaniques. Le capteur de pression a été étalonné avec une correction de sa dérive en température pour rentrer dans les spécifications des mesures océanographiques. Ces mesures ont permis également de tester l'influence du brassage sur la mesure d'indice. Afin de tenir compte des propriétés de dispersion de l'eau de mer, l'étalonnage en indice ne peut se faire que par l'utilisation de relations polynomiales mises au point en 1990 par R.C. Millard et G. Seaver. 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. Il sera nécessaire à l'avenir de compléter la base de données de l'indice de réfraction de l'eau de mer pour refondre les relations de R.C. Millard et G. Seaver.

4. Essais et mises au point

Une première campagne de mesures en mer a été réalisée en 2010, permettant de réaliser des profils de salinité « petits fonds » dans les panaches de la Loire et de la Garonne, mais aussi trois profils « grands fonds » jusqu'à une profondeur de 2 000 m. Ces profils ont laissé apparaître 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 d'entre eux ont toutefois donné des résultats très encourageants. Le premier est un profil « grands fonds » et le second est un profil « petits fonds » constitué de fortes variations de salinité. Après application de l'algorithme de Millard et Seaver sur les données t , n , p mesurées, et extraction de la salinité, les tracés obtenus avec le prototype sont très ressemblants aux profils CTD correspondants. Concernant le plus profond, c'est le premier profil de salinité obtenu avec un capteur optique, à 2 000 m (Le Menn *et al.*, 2011).

Afin de pouvoir poursuivre ces expérimentations, en 2011 elles ont été intégrées au projet Equipex NAOS (*Novel Argo Ocean Observing System*). ARGO est un programme de l'Unesco/COI (*Commission Océanographique Internationale*) et du WMO (*World Meteorological organisation*) dont le but est le développement d'un réseau global de 3 000 flotteurs dérivants pour suivre l'évolution de la température et de la salinité des premiers 2 000 m des océans. Le but de NAOS est le développement d'une nouvelle génération de flotteurs ARGO. Ils seront équipés de capteurs biogéochimiques et certains sont prévus pour descendre à 4 000 ou 6 000 m. NOSS pourrait faire partie des nouveaux capteurs embarqués par ces flotteurs.

Un troisième prototype a été fabriqué en 2012, sur lequel les dépôts d'or ont été remplacés par des miroirs encastrés et la sensibilité à la lumière solaire 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 les flotteurs dérivants. 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 (figure 2). Des profils de salinité ont pu être extraits des profils d'indice.

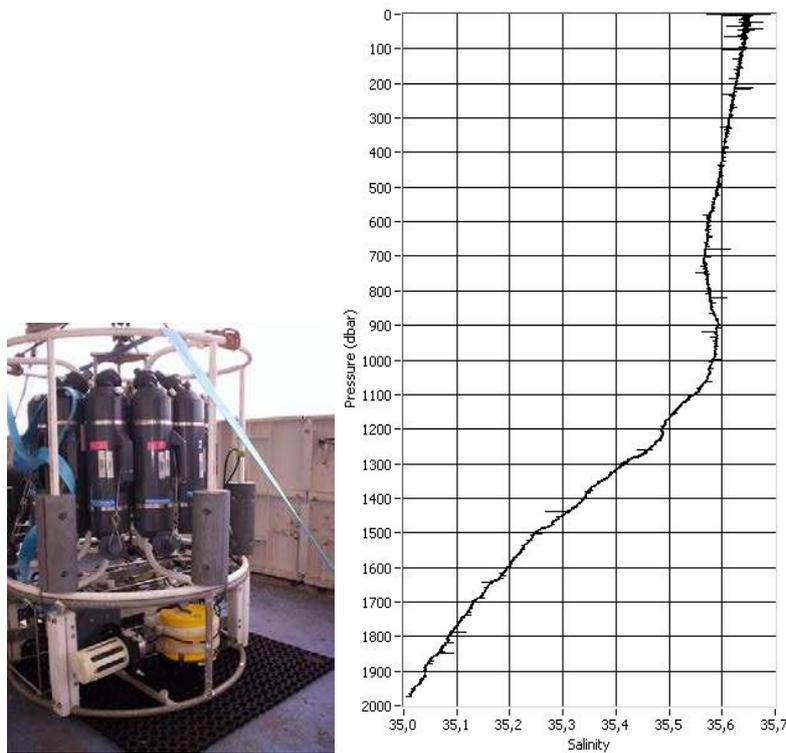


Figure 2. Prototype raccordé à un profileur CTD durant une campagne en mer réalisée en 2010, et exemple de profil de salinité obtenus durant cette campagne

Ces profils restent bruités dans les premières couches océaniques (figure 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 (Mensah *et al.*, 2009) 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.

5. Essais sur des flotteurs dérivants

Deux exemplaires d'un troisième prototype (figure 3) ont donc été intégrés sur des flotteurs dérivants du type PROVOR, destinés au réseau ARGO.

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 ont mis en évidence une difficulté supplémentaire de la maîtrise de la mesure d'indice.

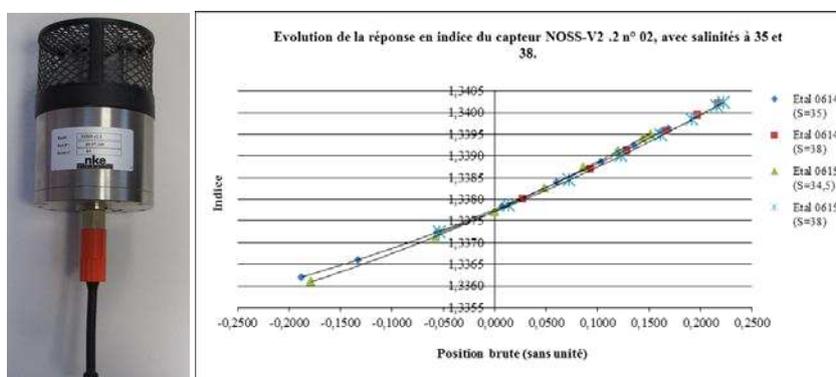


Figure 3. Photo du dernier prototype de capteur NOSS et résultat de son étalonnage en indice entre juin 2014 et juin 2015



Figure 4. Capteurs NOSS intégrés sur des flotteurs dérivants durant leurs essais en bassin

Les essais ont été réalisés en Méditerranée et les flotteurs ont été récupérés au bout d'une semaine après avoir réalisé des cycles à 1 000 m, 1 500 m et 2 000 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 salinités de référence à l'aide de la relation (1), pour pouvoir être comparées aux salinités obtenues à partir des mesures d'indice.

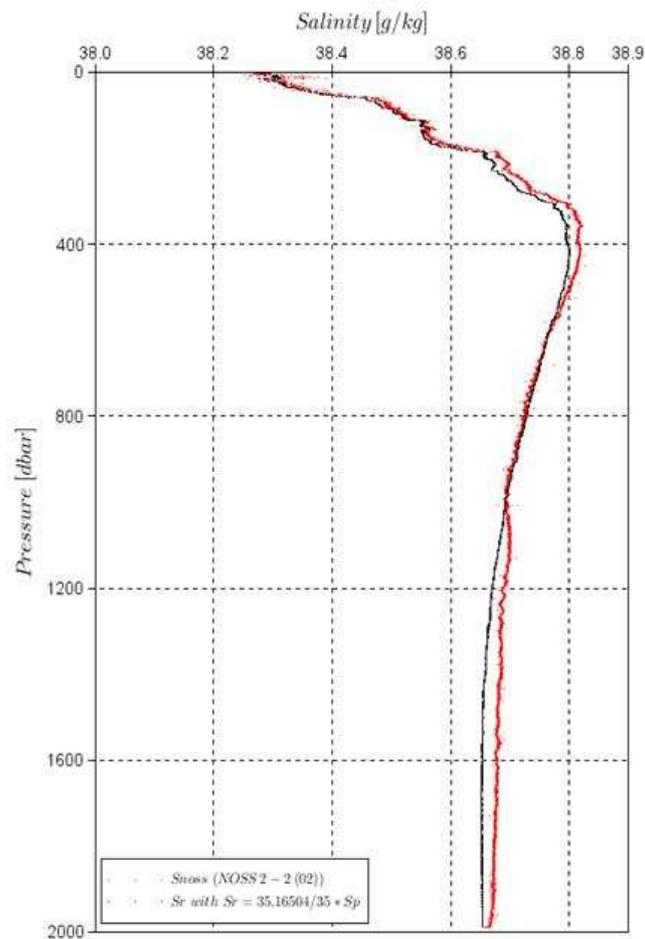


Figure 5. Profils obtenus en mer avec un flotteur dérivant. La courbe en noir représente la salinité de référence calculée à partir de mesures de conductivité alors que la courbe rouge représente la salinité obtenue à partir de l'étalonnage du capteur NOSS en indice

Un exemple de résultat est visible sur la figure 5. 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 1 000 dbar, des différences sont visibles également. Elles sont imputables à l’inexactitude des relations de Millard et Seaver en pression, mais des analyses sont toujours en cours pour en déterminer l’origine. 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.* (2014). Si cette hypothèse était validée, les capteurs NOSS auraient alors démontré 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. 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. Des travaux sont en cours également pour obtenir une relation directe entre la masse volumique de l’eau de mer, sa salinité, sa température, sa pression et l’indice de réfraction, à partir des résultats de la publication de Millard et Seaver.

Il a été démontré par ailleurs, que le bruitage des profils dépend en partie de la turbidité du milieu (Hou *et al.*, 2013) 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 néphéométriques et ainsi de caractériser les propriétés optiques du milieu, avec le même faisceau.

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, tâche WP2.5 du projet NAOS.

Bibliographie

Hou B., Grosso P., Wu Z.Y., de Bougrenet de la Tocnaye J.-L., Le Menn M. (2013). Principle and implementations of a refracto-nephelo-turbidimeter for seawater measurements. *Optical Engineering*, vol. 52, n° 4, 044402.

- IOC, SCOR and IAPSO (2010). 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 p. (www.TEOS-10.org).
- Le Menn M. (2004). Capteurs de conductivité en océanographie : état de l'art et perspectives. *Revue des Sciences et Techniques de la Défense (RSTD)*, n° 64, p. 107-111.
- Le Menn M., de Bougrenet de la Tocnaye J.-L., Grosso P., Delauney L., Podeur C., Brault P., Guillaume O. (2011). Advances in measuring ocean salinity with an optical sensor. *Measurement Science and Technology*, vol. 22.
- Malardé D., Wu Z.Y., Grosso P., de Bougrenet de la Tocnaye J.-L., Le Menn M. (2009). High-resolution and compact refractometer for salinity measurements. *Measurement Science and Technology*, vol. 20 015204.
- McDougall T. J., Jackett D. R., Millero F. J. (2009). An algorithm for estimating Absolute Salinity in the global ocean. *Ocean Science Discussion*, 6, p. 215-242.
- Mensah V., Le Menn M., Morel Y. (2009). Thermal mass correction for the evaluation of salinity. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* vol. 26, n° 3, p. 665-672.
- Millard R.C., Seaver G. (1990). An index of refraction algorithm for seawater over temperature, pressure, salinity, density and wavelength. *Deep-Sea Research*, vol. 37, n° 12, p. 1909-1926.
- Millero F. J., Feistel R., Wright D. G., McDougall T. J. (2008). The composition of Standard Seawater and the definition of Reference-Composition Salinity Scale. *Deep-Sea Research*, I, n° 55, p. 50-72.
- Perkin R. G., Lewis E. L. (1980). The Practical Salinity Scale 1978: Fitting the Data. *IEEE J. Oceanic Eng.*, OE-5, n° 1, p. 9-16.
- Woodsley R.J., Huang F., Millero F. J. (2014). Estimating the absolute salinity (S_A) in the world's oceans using density and composition. *Deep-Sea Research*, 93, p. 14-20.

