

Ateliers Expérimentation Instrumentation 2012

Une solution optique pour la mesure in situ de la salinité absolue : évolution du projet NOSS

Marc Le Menn, Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye, Philippe Grosso, Hou Bo, Patrice Brault, Damien Malardé, Laurent Delaunay

SOMMAIRE :

- 1 - Rappels concernant la salinité.
- 2 - L'indice de réfraction : un moyen d'accéder à la masse volumique.
- 3 - Le projet NOSS et son capteur.
- 4 - Les résultats des essais.
- 5 - Les expérimentations à venir.
- 6 – L'évolution du concept.

Rappels concernant la salinité

La salinité désigne à l'origine la masse totale de substances solides dissoutes par kilogramme d'eau de mer.

C'est la définition de ce que l'on appelle la salinité absolue S_A qui s'exprime en g/kg.

Elle montre qu'il ne s'agit pas uniquement de mesurer les sels dissous, mais toutes les matières dissoutes.

Depuis 2010, et la mise en place du TEOS-10, S_A est la variable à utiliser pour calculer les propriétés thermodynamiques de l'eau de mer : masse volumique, entropie, énergie interne...

Or, à ce jour, S_A est une grandeur non mesurable dans la pratique.

Rappels concernant la salinité

Depuis les années 70 et la mise en place de la PSS-78, la salinité est évaluée traditionnellement à partir de mesures de conductivité, de température et de pression, et à l'aide de relations polynomiales qui conduisent à calculer une valeur de salinité pratique S_p .

Le premier problème posé par cette définition est que S_p n'a pas d'unité et qu'il est donc difficile d'assurer son rattachement au système international d'unité et l'homogénéité des équations dans lesquelles elle est utilisée.

Le second problème vient du fait que les substances non-ioniques ne sont plus prises en compte dans l'évaluation de la salinité.

Ainsi, reprenant un exemple bien connu, si on échange une petite quantité d'eau contre la même quantité de silicates, la conductivité de l'échantillon ne va pas changer alors que sa salinité absolue ne sera plus la même.

A l'inverse, si on enlève la même masse de silicates et qu'on la remplace par du NaCl, la conductivité va augmenter alors que la salinité absolue sera la même.

Rappels concernant la salinité

Tout cela entraîne des biais difficiles à évaluer sans l'aide de prélèvements ou de corrections empiriques, et de ce fait, toutes les eaux qui ont la même conductivité ont la même salinité pratique même si leurs compositions sont différentes.

Cela conduit à dire que si l'on s'écarte d'une composition et donc d'une salinité absolue de référence, des biais sont possibles.

De ce fait, alors que l'on peut étalonner des capteurs de conductivité avec une incertitude élargie de l'ordre de 0,003 en salinité pratique, il peut subsister des erreurs systématiques de plusieurs centièmes de g/kg selon la composition du milieu.

D'autre part, il a été démontré en 2010 que la conductivité de l'eau standard qui sert à étalonner les salinomètres de laboratoire et donc les instruments de mesure in situ, ne peut être rattachée qu'avec une incertitude élargie (rapportée en salinité pratique) de 0,021, par rapport aux références des laboratoires primaires de métrologie travaillant sur la conductivité.

Rappels concernant la salinité

Ce constat a pour effet de limiter temporellement, à cette incertitude, la traçabilité métrologique des mesures de salinité réalisées par ce procédé.

Les 0,002 requis, jusqu'à présent, dans les recommandations WOCE sur les mesures de salinité pratique et à fortiori sur les salinités de référence, ne peuvent être garantis que sur de courtes périodes de temps.

Conscient de ces biais, le groupe de travail de l'UNESCO/SCOR/IAPSO qui a mis en place le TEOS-10, a adopté plusieurs définitions à la notion de salinité, dont celle de salinité-densité S_A^{dens} qui se rapproche le plus de S_A .

S_A^{dens} permettra d'assurer la traçabilité de la salinité sur le long terme, via des références de masse volumique stables et indépendantes de l'évolution des propriétés (chimiques) de l'eau de l'Atlantique Nord qui sert actuellement de référence.

Rappels concernant la salinité

Ce groupe de travail a également publié des algorithmes de corrections empiriques pour passer de la salinité mesurée S_p à S_A par l'évaluation d'une anomalie de salinité δS_A .

Mais, ces algorithmes ne sont pas applicables en côtier et restent des approximations en domaine hauturier.

Conscients de ces limites, ils n'ont pas interdit l'emploi d'autres méthodes pour évaluer la correction δS_A .

Le projet NOSS en fait partie.

La masse volumique peut se mesurer en laboratoire, avec une incertitude proche de celle requise ($\pm 0,004 \text{ kg/m}^3$), 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 .

L'indice de réfraction : un moyen d'accéder à la masse volumique.

Cette relation est celle de Lorenz – Lorentz.

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

A = réfractivité molaire

W = poids moléculaire

A travers W , n se trouve également en relation directe avec la composition du milieu.

D'où l'intérêt du développement d'un réfractomètre utilisable in situ, et la naissance du projet NOSS (NKE Optical Salinity Sensor).

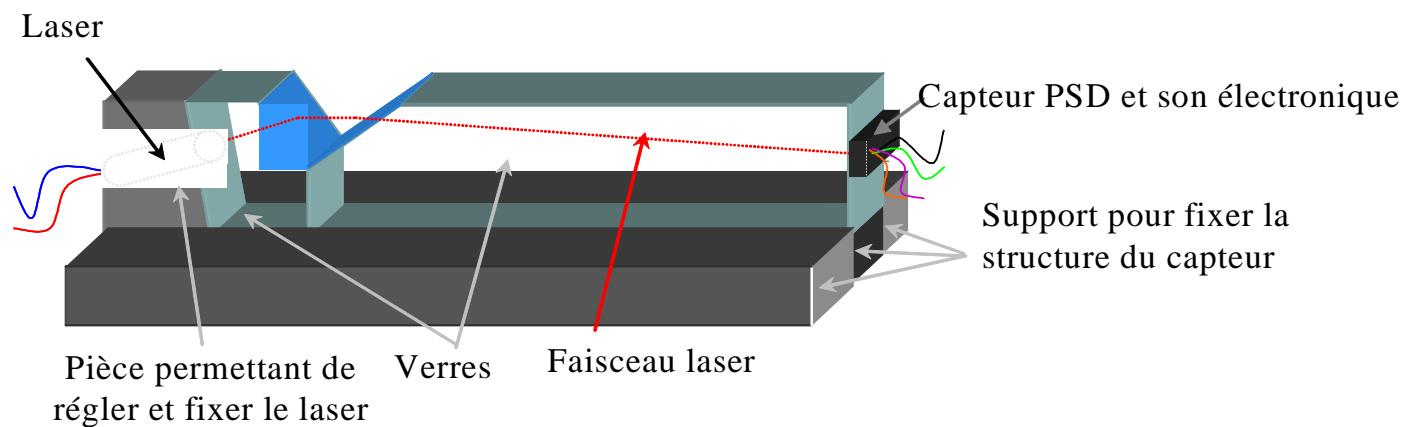
NOSS est né d'une collaboration entre le SHOM et Télécom Bretagne, UMR Foton en 2005.

Porté par la Société NKE, qui assure le développement des prototypes, le projet a été labellisé par le Pôle mer, et financé par le Ministère de l'Industrie (DGE).

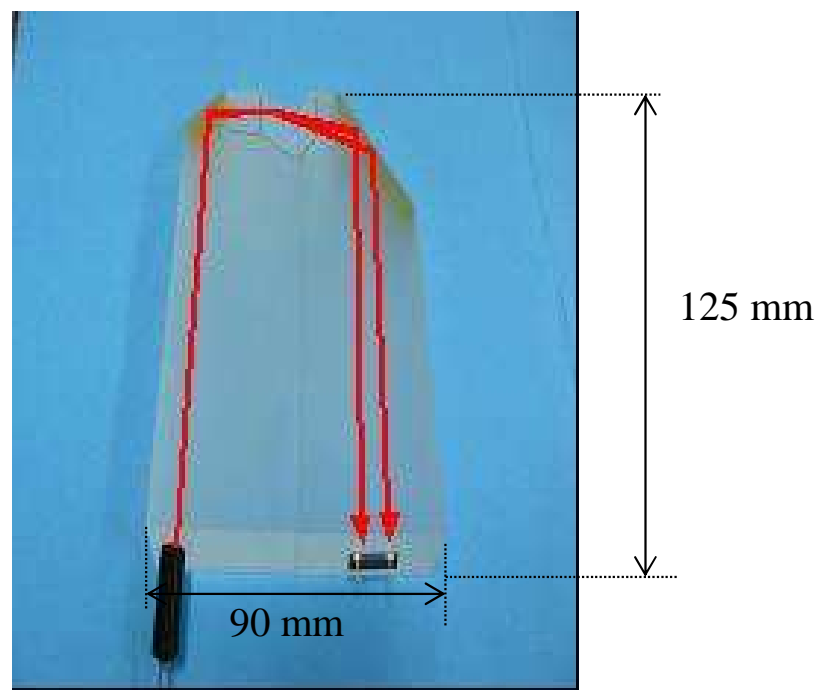
L'IFREMER a rejoint le consortium pour la partie essais aux conditions d'environnement, protection contre le bio-fouling et intégration mécanique.

Le projet NOSS et son capteur

Partant d'un prototype de laboratoire 'démonstrateur' de faisabilité,



il a aboutit à la réalisation d'un prototype utilisable en mer ou le faisceau est replié pour avoir le Laser et le détecteur dans le même plan.



Le projet NOSS et son capteur.

Ce prototype a été testé en laboratoire et en mer :

- l'électronique a été intégrée dans un corps cylindrique.
- un capteur de pression, un capteur de température externe et un capteur de température Laser ont été intégrés.



t_{Laser} sert à compenser la dérive en $d\lambda/dt$ du Laser.

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.

Résultats des essais

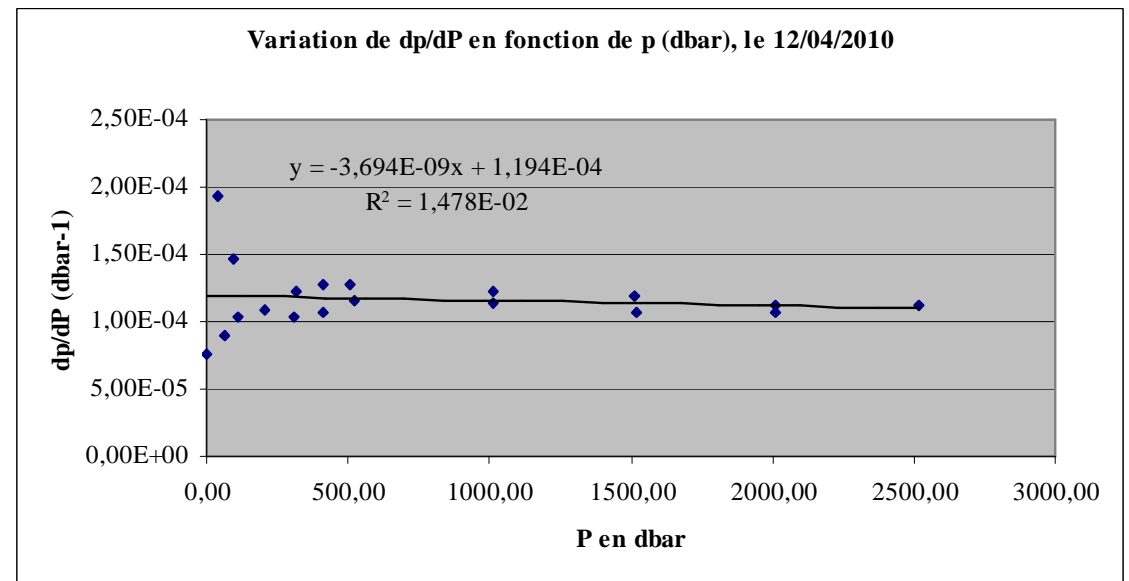
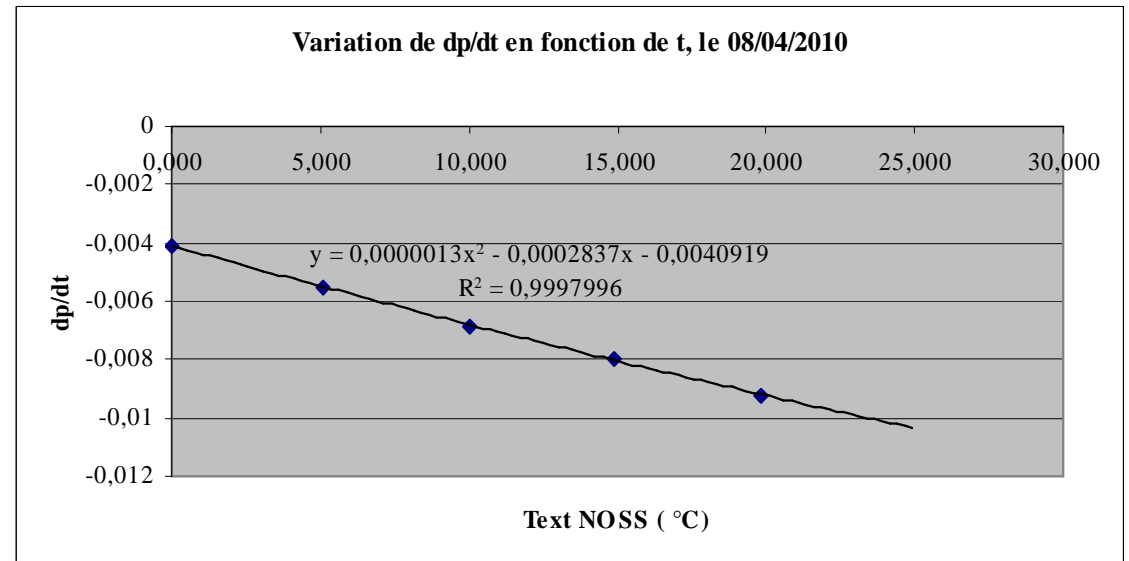
Le PSD est un détecteur analogique qui mesure des positions de faisceau P

La sensibilité du montage aux variations de température ($\partial P/\partial t$) a été mesurée en laboratoire.

Les résultats montrent que l'effet de la température peut être corrigé par une relation linéaire.

De même, la sensibilité du montage aux variations de pression ($\partial P/\partial p$) a été mesurée en caisson à l'IFREMER.

Les résultats montrent que l'effet de la pression peut être corrigé par une simple droite et que l'erreur résiduelle est $< 9.10^{-7}$ sur n .



Résultats des essais.

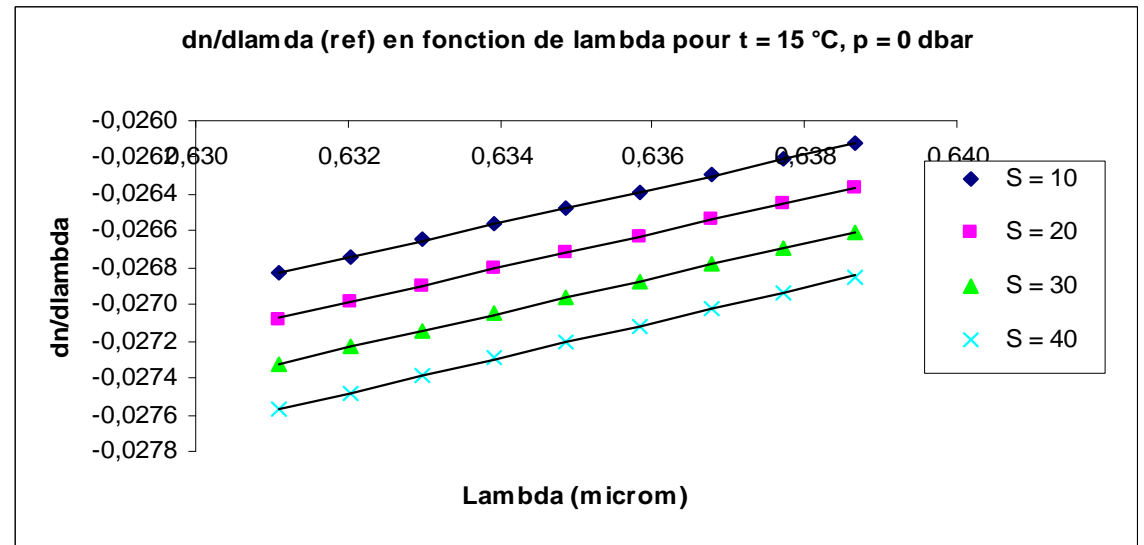
Reste à traiter la correction de la dérive en température de la longueur d'onde λ du Laser.

Le $d\lambda/dt$ du Laser est connu, et les variations $\delta\lambda$ de λ peuvent être corrigées.

Subsiste le problème du $dn/d\lambda$ qui n'est pas constant en fonction de la salinité.

Pour le calculer, il faut estimer la valeur de S (que l'on cherche à mesurer!), mais à 1 unité près.

Autre difficulté, les variations $dP/d\lambda$ sont fortement non-linéaires.



Au final, il est tout de même possible de disposer d'une valeur de position corrigée des grandeurs d'influence :

$$\delta P(t, \lambda, p) = \frac{\partial P}{\partial n} \left[\frac{\partial n}{\partial t} \delta t + \frac{\partial n}{\partial \lambda} \delta \lambda + \frac{\partial n}{\partial p} \delta p \right]$$

Résultats des essais.

Il ne reste qu'à étalonner le prototype en position – indice.

Cela a été fait avant et après campagne en mer.

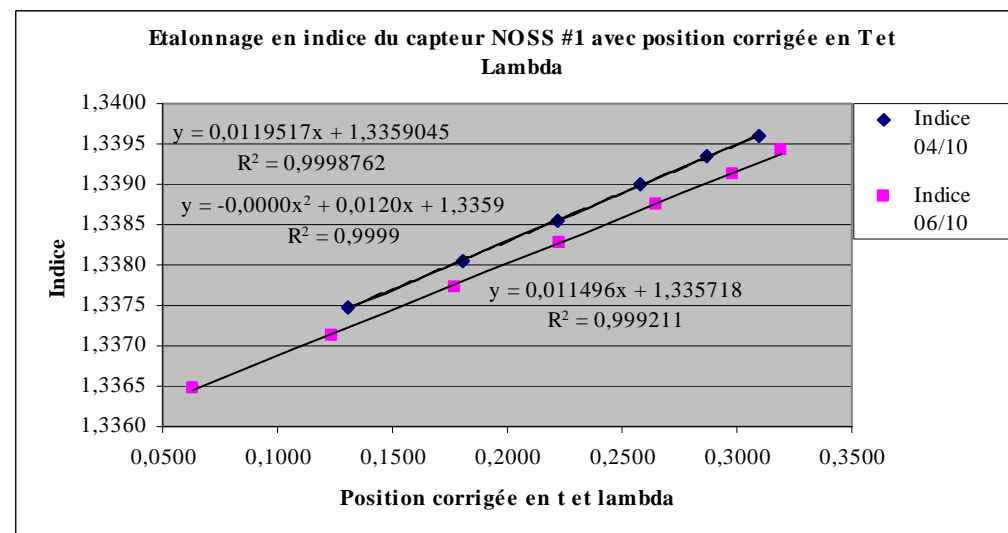
La réponse du prototype est très linéaire, ce qui est très encourageant.

Entre l'étalonnage du 04/10 et celui du 06/10, une dérive est apparue, dont la cause probable a été trouvée plus tard : infiltration d'eau sous le dépôt d'or des miroirs.

Les écarts résiduels sur la salinité restent globalement inférieurs à 0,01, sauf pour les valeurs les plus élevées de position.

Origine de ces écarts :

- inexactitude des relations de Millard – Seaver ?
- Fiabilité du prototype liée à l'infiltration d'eau ?

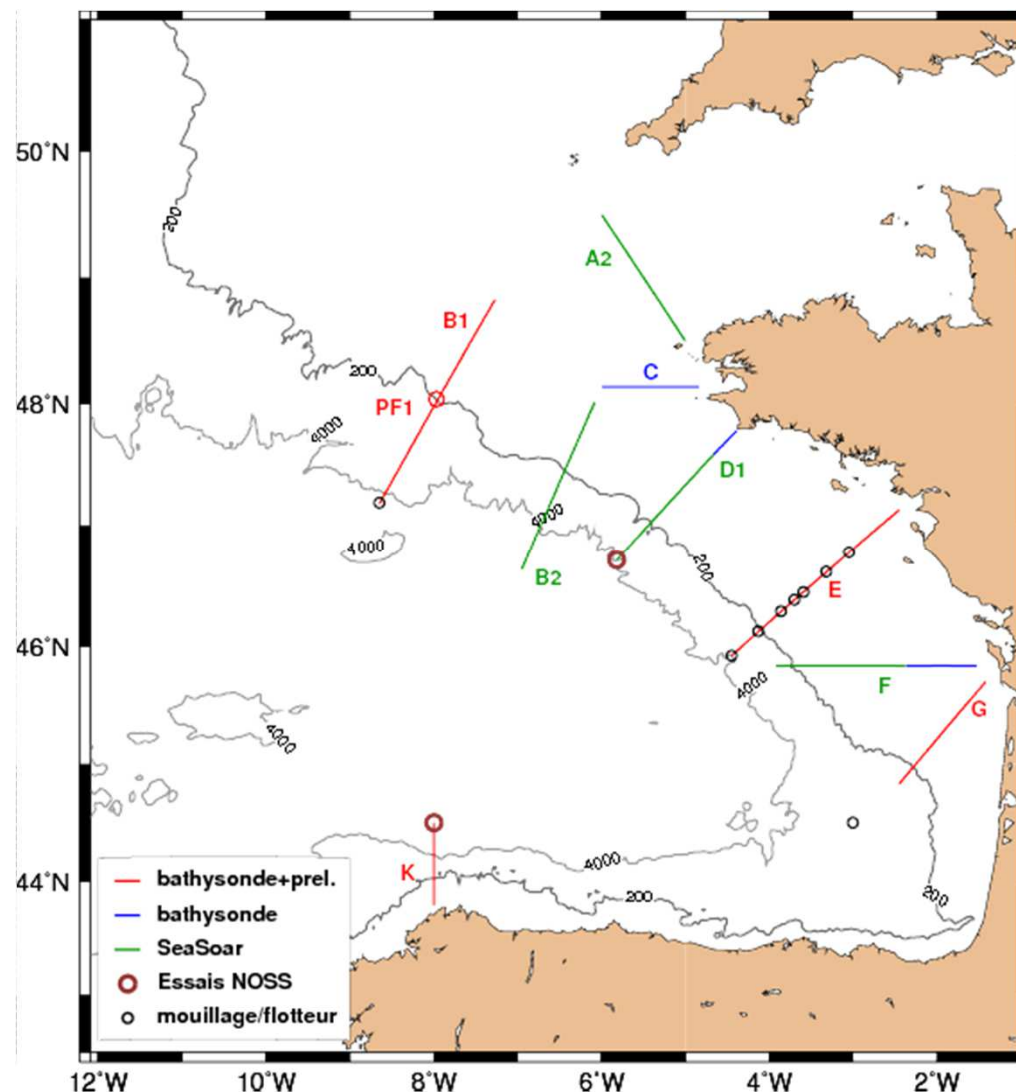


Données utilisées pour tracer les graphiques :

Position cor de T et lambda	Indice calculé avec Tref	Indice NOSS	Ecart sur n	Ecart sur S
0,250166	1,339192	1,339187	-0,0000047	-0,026
0,250363	1,339186	1,339191	0,0000047	0,026
0,211856	1,338555	1,338554	-0,0000008	-0,005
0,211972	1,338555	1,338556	0,0000010	0,005
0,136637	1,337664	1,337662	-0,0000012	-0,007
0,136868	1,337664	1,337665	0,0000013	0,007
-0,002655	1,335867	1,335866	-0,0000007	-0,004
-0,002582	1,335867	1,335868	0,0000008	0,004

Résultats des essais.

Le prototype a été testé en mer durant la campagne PROTEVS-2010 du SHOM :
3 profils à 2000 m + des profils petits fonds dans les panaches de la Loire et de la Garonne.



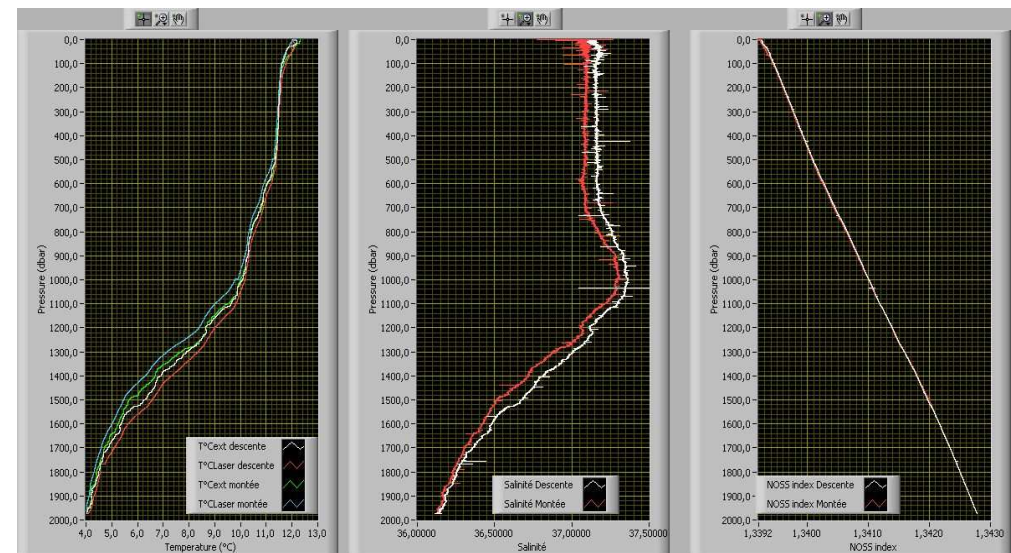
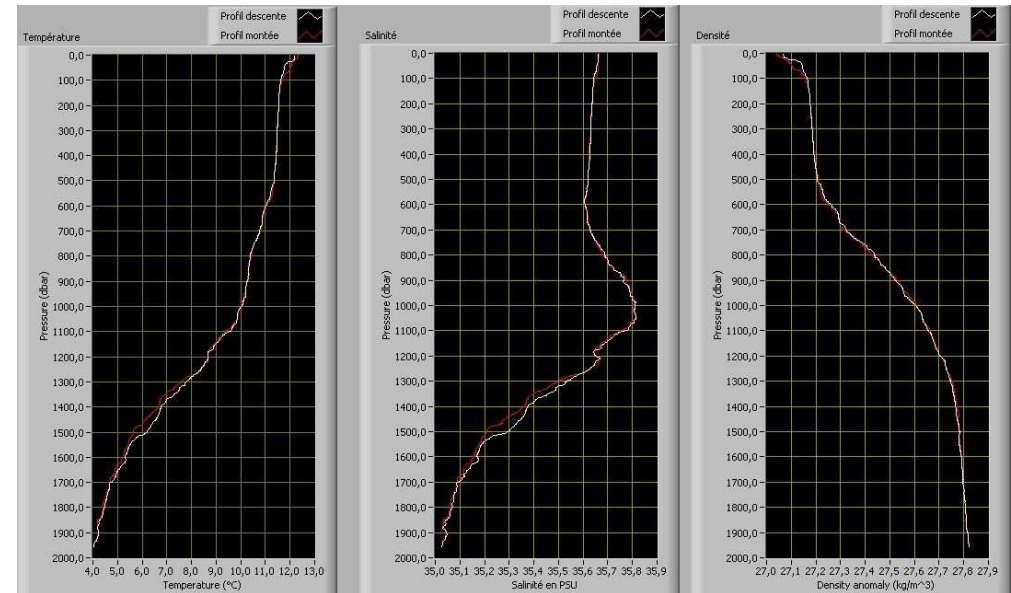
Résultats des essais

Tous les profils ont été perturbés par des problèmes ‘de jeunesse’ du prototype : infiltration d’eau sous la couche d’or, rondelle de fixation d’un circuit en contact avec une connexion...

Deux profils ont toutefois donnés des résultats très encourageants.

Le premier est le premier profil 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 profil obtenu avec le prototype (en bas au milieu) est très ressemblant au profil bathysonde (en haut au milieu).

C’est le premier profil de salinité obtenu avec un capteur optique, à 2000 m.

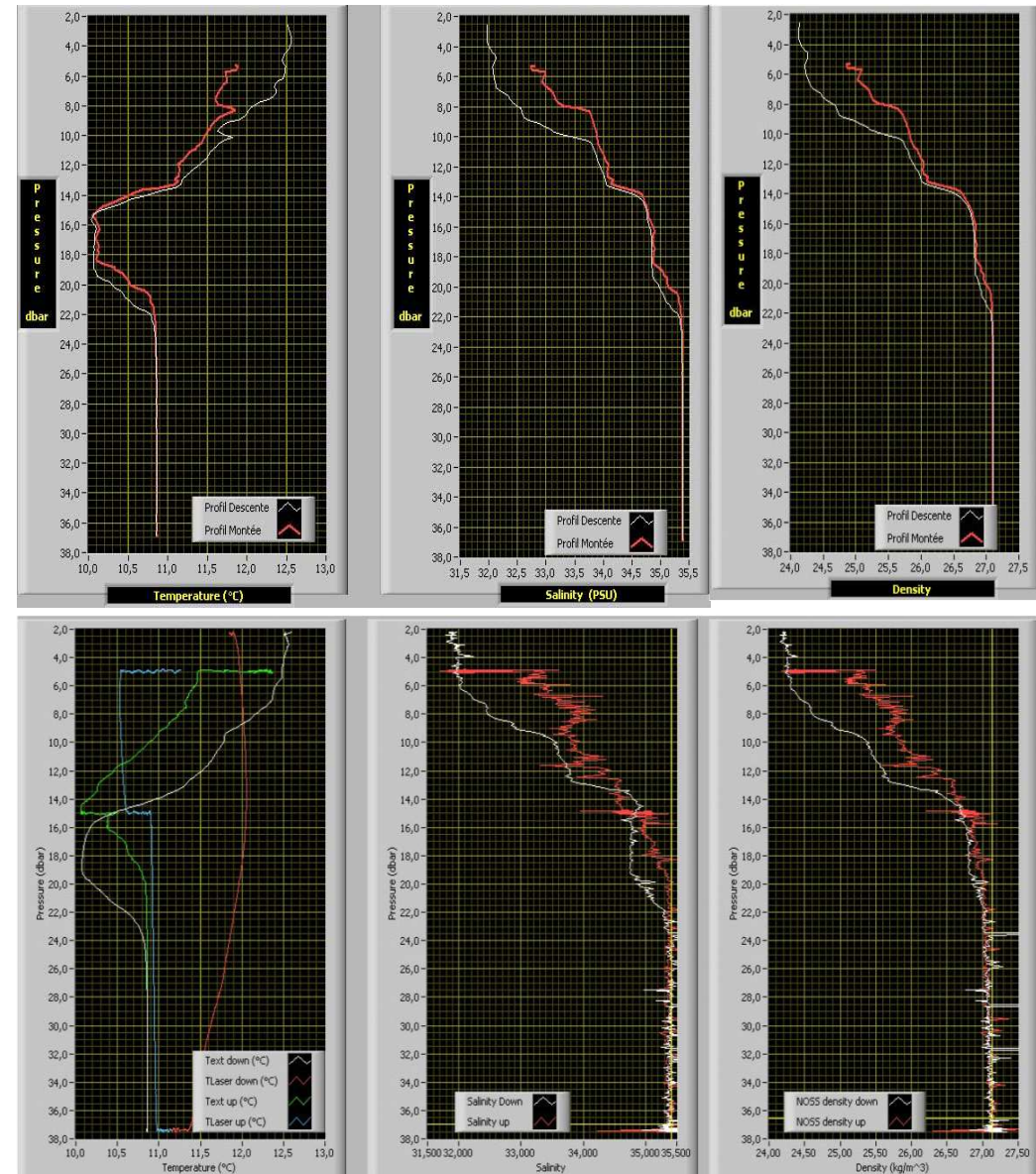


Résultats des essais

Le second est un profil petits fonds, constitué de fortes variations de salinité.

Le profil d'indice est très ressemblant avec le profil de densité SBE, malgré l'hystérésis thermique de la température Laser.

La montée est bruitée mais suit les variations de densité vue par la SBE. Descente et montée se superposent correctement.



Les expérimentations à venir

Après cette campagne en demi-teinte, il fallait trouver une suite au projet.

La suite du projet NOSS se situe dans la tâche WP 2.5 du projet EQUIPEX NAOS.

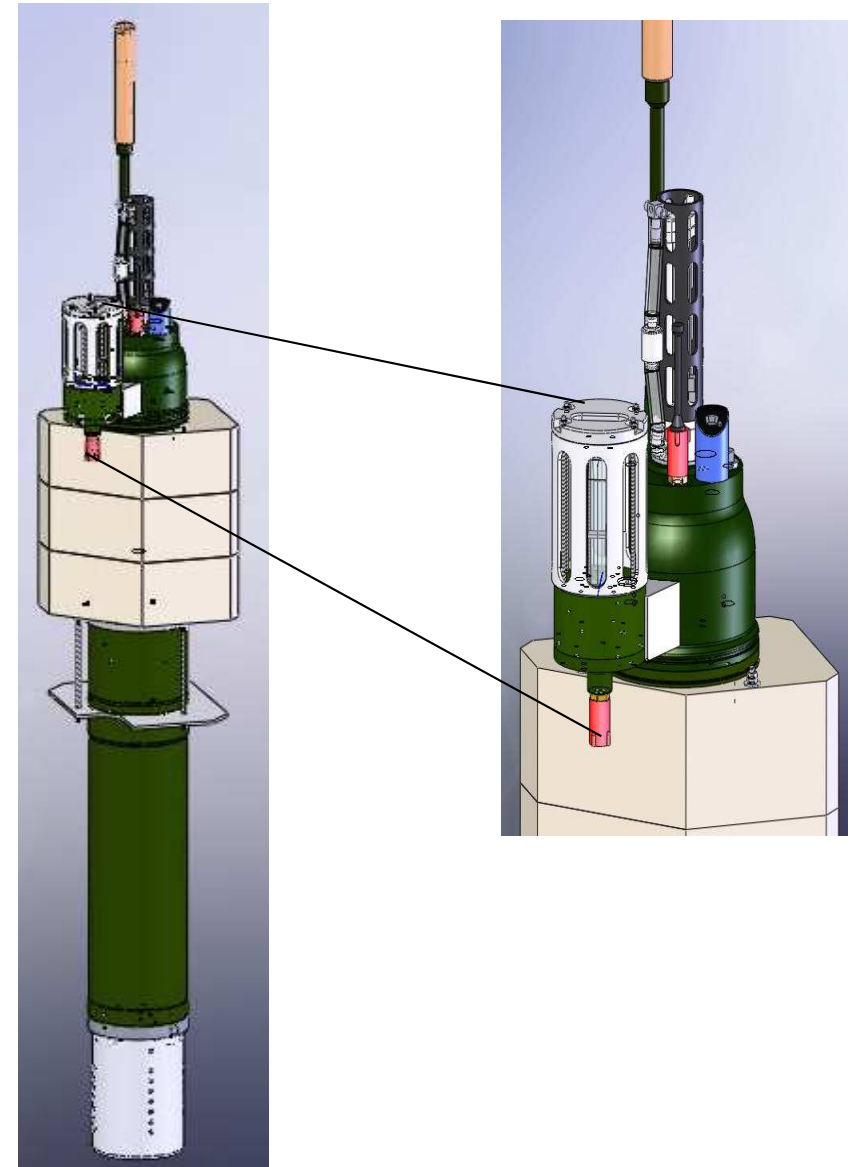
Cette tâche inclue la fabrication de 3 autres prototypes où les défauts constatés en 2010 sont corrigés.

Ces prototypes seront intégrés sur des flotteurs dérivants du réseau ARGO.

But : pouvoir comparer des profils CTD avec des profils nTD.

Auparavant, ils vont être testés en mer cet été durant la campagne PROTEVS-2012.

But des essais : valider le fonctionnement et calculer des coefficients d'alignement de temps de réponse qui permettront de corriger les profils obtenus avec les flotteurs.



L'évolution du concept

Une thèse a été présentée à Télécom Bretagne en janvier 2012 intitulée : 'Une solution optique pour la mesure simultanée in-situ de la salinité et de la turbidité de l'eau de mer'.

Elle a montré :

- La possibilité de réduire la taille de la partie optique (sans nuire à l'incertitude de mesure);
- L'intérêt du remplacement du détecteur analogique PSD par un CCD : la mesure de position devient entièrement numérique ;
- La possibilité de corriger les effets de la turbidité avec des algorithmes de traitement d'images : réduction d'erreurs systématiques ;
- La possibilité d'ajouter une mesure de transmission et une mesure de diffusion à 90 ou 117°.

N° d'ordre : 2011telb0217

Sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

Télécom Bretagne

En habilitation conjointe avec l'Université de Bretagne-Sud

Ecole Doctorale – sicma

An optical solution for simultaneous in-situ sea water salinity and turbidity measurements

Une solution optique pour la mesure simultanée in-situ de la salinité et de la turbidité de l'eau de mer

Thèse de Doctorat

Mention : STIC

Présentée par Bo Hou

Département : OPTIQUE

Directeur de thèse : Jean-Louis de Bougrenet de La Tocnaye

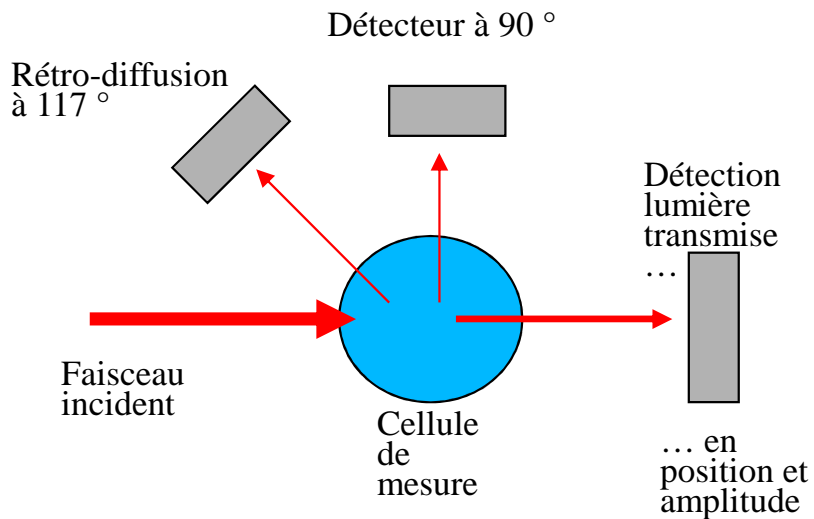
Soutenue le 11 janvier 2012

Jury :

M. Patrick Juncar, Professeur, CNAM (Rapporteur)
M. Marc Le Menn, Docteur, SHOM (Rapporteur)
M. Jean-Louis de Bougrenet de la Tocnaye, Professeur, Télécom Bretagne (Directeur de thèse)
M. Marc Sevaux, Professeur, UBS (Examinateur)
M. Philippe Grosso, Enseignant chercheur, Télécom Bretagne (Invité)
M. Patrice Brault, Ingénieur de recherche, NKE (Invité)
M. Laurent Delauney, Ingénieur de recherche, Ifremer (Invité)

L'évolution du concept

Principe d'un transmissio - néphélomètre :



L'intérêt de cette évolution du concept réside dans la possibilité :

- de pouvoir mesurer 3 grandeurs avec un même faisceau et donc de pouvoir caractériser le milieu au niveau des matières dissoutes et des matières en suspension ;
- de pouvoir intégrer ce capteur sur des flotteurs dérivants de nouvelle génération et notamment des flotteurs aéro-largables tel le PAOLA développé par le SHOM et la société NKE Electronics pour les besoins de la Marine Nationale.

L'évolution du concept

Les données du PAOLA permettraient alors d'alimenter les modèles en données de célérité via la mesure de salinité – indice et en données de visibilité sous-marine.

Les applications de ce flotteurs pourraient être autant civiles que militaires.

Conclusion :

La mesure de l'indice de réfraction constitue une rupture technologique dans la mesure de la salinité.

Elle doit permettre une approche in situ de la notion de salinité absolue.

Elle ouvre la voie à la possibilité 'd'auto-correction' numérique des données du capteur et à la possibilité de mesurer plusieurs grandeurs avec un seul faisceau.

Il reste à démontrer la fiabilité de ces nouvelles techniques...

