



Carole Saout-Grit
océanographe physicienne

1 avenue de la Prémondière
44000 Nantes

Tél. : +33 (0) 6 30 33 81 63
carole.saout@glazeo.net

<http://www.glazeo.net>

Catherine Jeandel

LEGOS – Observatoire Midi-Pyrénées

14 avenue Edouard Belin
31400 Toulouse

catherine.jeandel@legos.obs-mip.fr

Rapport de calibration des données CTD-oxygène de la campagne SWINGS 2021

par Carole Saout-Grit – avril 2022

RÉSUMÉ

Ce travail concerne la calibration des profils de CTD-oxygène standard collectés pendant la campagne SWINGS (pour South West Indian Geotraces Section).

Cette campagne a été menée à bord du N/O Marion -Dufresne II dans l'océan austral de janvier à mars 2021. Elle a permis la réalisation de deux types de profils CTD : des profils « standard », faits à presque toutes les stations à l'aide d'une rosette classique sur câble acier équipée de bouteilles Niskin; et les profils « clean » faits uniquement à certaines stations à l'aide d'une rosette au maxi dépourvue de pièces métalliques et équipée de bouteilles Go-Flo dédiée aux prélèvements propres.

Au total, la campagne SWINGS 2021 a permis la réalisation de :

- 99 stations « standard », dont 57 accompagnés de 647 prélèvements d'eau de mer
- 13 stations « clean », dont 2 stations réalisées avec 19 prélèvements d'eau de mer

La présente étude concerne uniquement les profils CTD « standard » pour lesquels les données chimiques de comparaison seront en nombre suffisant pour des résultats fiables sur l'ensemble de la durée de la campagne.

SOMMAIRE

I. CONTEXTE SCIENTIFIQUE	4
II. PROCÉDURE DE CALIBRATION DES DONNÉES CTD-02	5
1. Acquisition des mesures hydrologiques	5
2. Acquisition des mesures chimiques	6
3. Méthode de Calibration	6
III. RÉSULTATS	9
A. Statistiques sur les données bouteille	9
B. Ajustement en densité	10
C. Minimisation des écarts	11
D. Données calibrées	14
IV. Fournitures	14
V. Bibliographie	15
Annexe 1 : Liste des stations hydrologiques de la campagne SWINGS-21. (en bleu) : stations avec prélèvements chimiques	16
Annexe 2 : Liste des stations avec prélèvements chimiques, et nombre d'échantillons prélevés	18
Annexe 3 : Statistiques sur les données chimiques, répartition par station et numéros de bouteilles. (en orange) : pas de prélèvement - (en jaune) : données flaggées (Qc 4) à la fin du processus de calibration - (en bleu) : doublet sur la bouteille - (en vert) : fuite au moment du prélèvement - (en gris) : pas de valeur en pression associée.	19
Annexe 4 : Fiche de pré-calibration du capteur primaire s/n 0511	20
Annexe 5 : Fiche de pré-calibration du capteur secondaire s/n 1755	21
Annexe 6 : Schématisation du processus de calibration des données CTD-02 : données input (bleu), intermédiaires de calcul (gris) et output (noir)	22

I. CONTEXTE SCIENTIFIQUE

L'océan austral est une région difficile à explorer car lointaine, souvent agitée et peu accessible. Pourtant, son rôle est majeur dans l'équilibre de la machine climatique, et notamment dans la séquestration du CO₂ atmosphérique dans l'océan.

L'activité biologique et la dynamique de la circulation océanique sont les acteurs majeurs de cette séquestration. Mais les processus qui entrent en jeu sont complexes et encore mal compris. Mieux les comprendre implique d'être capable de les quantifier, ce qui est en partie possible grâce aux mesures d'éléments chimiques présents en concentrations infimes dans l'eau de mer appelés éléments « traces ».

Menée à bord du Marion Dufresne II du 11 janvier au 8 mars 2021, la campagne SWINGS a été l'occasion d'explorer une section traversant des zones-clés de l'Océan Austral. Pendant huit semaines, les scientifiques ont collecté une quantité exceptionnelle d'échantillons d'eau de mer et effectué de nombreuses mesures pour réussir à déterminer de manière plus précise les sources, transformations et puits de ces éléments « traces » dans cette large zone de l'Océan Indien sud.

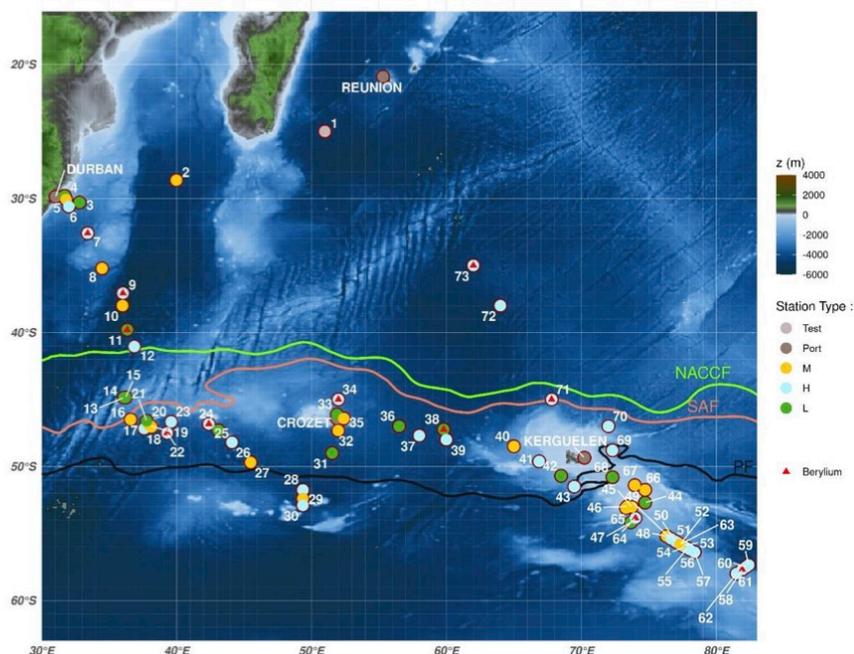


Figure 1 : Réseau des stations réalisées pendant la campagne SWINGS (source : C.Clerc/S.Sergi - SWINGS 2021). Les points bleus (H) indiquent les stations hydrologiques avec déploiement de CTD « standard » uniquement. Les points jaunes (M) indiquent les stations hydrologiques avec déploiement de CTD « standard » et CTD « clean » conjointement.

Projet multidisciplinaire de 4 ans, SWINGS est une contribution française majeure au programme international GEOTRACES (www.geotraces.org) qui construit depuis 2010 un atlas chimique des océans. Toutes les données GEOTRACES sont acquises selon des protocoles très stricts, comparées et validées entre les différents pays et mises à disposition en « open source » dans une banque de données.

II. PROCÉDURE DE CALIBRATION DES DONNÉES CTD-O₂

1. Acquisition des mesures hydrologiques

La sonde hydrologique CTD-O₂ utilisée est une sonde Seabird de type SBE911, qui comprend les capteurs suivants:

- un capteur de pression SBE9+
- deux capteurs de température SBE3
- deux capteurs de conductivité SBE4
- un capteur de concentration en oxygène dissous SBE43

A chaque station, deux profils CTD « standard » sont réalisés:

- un premier profil *downcast*, à la descente de la rosette jusqu'au fond, permettant des mesures directes de pression (P, en dbar), température (T, en ITS-90, °C), salinité (S, en PSU) et oxygène dissous (O₂, en μmol/kg)
- un deuxième profil *upcast*, à la remontée de la rosette jusqu'à la surface pour des mesures directes de (P,T,S,O₂) complémentaires.

Les caractéristiques des capteurs utilisés pour la campagne SWINGS sont détaillés [table 1](#).

Pour l'oxygène dissous, le capteur SBE43 permet de déterminer la concentration en oxygène dissous par comptage du nombre de molécules d'oxygène par seconde diffusant à travers une membrane polarographique. L'interface électronique fournit une tension, proportionnelle au courant à travers la membrane (courant oxygène) et à la température de la membrane.

La concentration en oxygène est obtenue à partir d'une équation non-linéaire, dont les paramètres doivent être ajustés car le capteur SBE43 peut dériver dans le temps. Sa calibration est nécessaire et fait l'objet de ce rapport.

Au total, 99 profils CTD hydrologiques « standard » ont été accomplis pendant la campagne SWINGS. L'[annexe 1](#) en détaille les caractéristiques.

identité du capteur	numéro de série	date de calibration	gamme	résolution	précision
Pression	2388	02/08/2017	[0-6800] dbar	0,068	0,7 dbar
[T01] - température, circuit primaire	1327	03/07/2020	[-5-35]°C	0,0002	0,001 °C
[T02] - température, circuit secondaire	4750	08/07/2020	[-5-35]°C	0,0002	0,001 °C
[CO1] - conductivité, circuit primaire	1073	02/07/2020	[0-7] S/m	4.10 ⁻⁵	0,0003 S/m
[CO2] - conductivité, circuit secondaire	3216	02/07/2020	[0-7] S/m	4.10 ⁻⁵	0,0003 S/m
[D01] - oxygène dissous, circuit primaire	0511	16/07/2020	[0-15] ml/l	0,01	0,01 ml/l
[D02] - oxygène dissous, circuit secondaire	1755	21/08/2020	[0-15] ml/l	0,01	0,01 ml/l

Table 1 : Caractéristiques des capteurs de la sonde hydrologique CTD-O₂ utilisée pour SWINGS

2. Acquisition des mesures chimiques

Pour 57 stations « standard » (voir [annexes 1 et 2](#)), des échantillons d'eau de mer ont été prélevés par bouteilles à la remontée de la rosette. 24 bouteilles de type Niskin étaient réparties verticalement pour permettre ces prélèvements.

Les analyses chimiques de ces prélèvements permettent de déterminer la salinité et la concentration en oxygène dissous à différents niveaux de fermeture des bouteilles. La concentration en oxygène dissous est obtenue par la méthode chimique de Winkler (1888).

Les données chimiques obtenues nous sont fournies sous la forme d'un fichier excel *SWINGS_O2winkler_jan2022.xlsx*, accompagné des feuilles remplies en mer au moment des prélèvements.

A partir de ces informations, un nouveau fichier statistique nommé *_all-stat-depth-swings.xlsx* a été reconstruit afin d'avoir une vue synthétique de la correspondance numéro de bouteilles/profondeur du prélèvement à chaque station. Présenté en [annexe 3](#), il a pu être complété à la fin du processus de calibration pour y indiquer (en jaune) les valeurs des mesures chimiques considérées comme douteuses.

3. Méthode de Calibration

Les capteurs DO permettent de déterminer la concentration en oxygène dissous par comptage du nombre de molécules d'oxygène par seconde qui diffusent à travers une membrane polarographique. Connaissant ce flux et la géométrie du chemin de diffusion, la concentration en oxygène peut être calculée.

La perméabilité de la membrane est fonction de la température et de la pression ambiante. L'interface électronique fournit une tension proportionnelle au courant à travers la membrane (courant oxygène) et à la température de la membrane, ce qui permet de déduire la concentration en oxygène à partir d'une équation non-linéaire.

La conversion de la donnée de voltage (mesurée en Volt ou en Hz) à la valeur de l'oxygène dissous (en $\mu\text{mol/l}$) se fait en appliquant les coefficients de calibration du constructeur. Mais trois grands groupes d'erreurs sont déjà inhérents à l'usage des capteurs électrochimiques d'oxygène de type SBE43 :

- *les erreurs dynamiques* liées au temps de réponse du capteur, temps que met le capteur à s'équilibrer avec son environnement pendant la diffusion des molécules d'oxygène à travers la membrane. Seabird suggère d'appliquer un temps de réponse du type :

$$\mathcal{T} = \mathcal{T}_{20} * e^{[d1*P + d2*(T-20)]}$$

\mathcal{T}_{20} étant le temps de réponse du capteur à 20°C et à la pression atmosphérique. \mathcal{T}_{20} , d1 et d2 sont spécifiés par Seabird après la calibration en laboratoire du capteur (voir [annexe 4](#)).

- *les erreurs statiques*, correspondantes aux effets de la pression, de la température et de la salinité sur la perméabilité de la membrane. Seabird suggère d'appliquer une correction sous la forme d'un coefficient liés à des paramètres - A,B,C,E,Soc - également spécifiés dans la fiche constructeur (voir [annexe 4](#)):

$$C(P,T,S) = \text{Soc} * \text{O}_{\text{sat}}(T,S) * [1.0 + A*T + B*T^2 + C*T^3] * \exp^{[E*P/(T+273.15)]}$$

- *enfin, les erreurs liées à l'hystérésis du capteur* entre la montée et la descente, en particulier quand il atteint les plus grandes profondeurs (supérieures à 1000 dbar typiquement). Ce problème entraîne des valeurs de voltages du capteur à la descente parfois beaucoup plus grandes que celles à la même pression à la remontée.

Les données CTD-O₂ apportent donc généralement des mesures fiables des paramètres physico-chimiques de la colonne d'eau, mais de par la nature du processus chimique de mesure, les coefficients de calibration donnés par le constructeur doivent être ajustés.

Le principe de la méthode de calibration utilisée ici repose sur le fait qu'aucun biais ne doit exister entre la mesure CTD et la mesure chimique, cette dernière étant considérée comme la référence absolue. Les mesures chimiques collectées sur le profil *upcast* servent à ajuster les coefficients de calibration des données CTD-O₂ obtenues sur le profil *downcast*.

L'étape de l'ajustement à proprement parlé consiste donc à optimiser tous ces coefficients de calibration en minimisant les écarts (ctd-btl) au cours d'un processus entièrement itératif. La comparaison des données hydrologiques et chimiques se fait sur une remise à niveaux de densité identiques entre la montée et la descente.

La méthode utilisée s'appuie sur le procédé de calibration décrit dans la publication de [Uchida et al., 2010](https://www.go-ship.org/HydroMan.html) (<https://www.go-ship.org/HydroMan.html>). Il répond aux standards de la procédure WOCE/GO-SHIP et des protocoles du PMEL. L'ensemble de la procédure est schématisée en [annexe 5](#), et peut se résumer en quatre étapes successives:

● **Étape 1 : le pré-filtrage des données chimiques Winkler**

Sur chaque phase de montée, la sonde SBE enregistre les valeurs de (P,T,S) au moment du clapping des bouteilles lors des prélèvements d'eau de mer. Pour chaque profil *upcast*, on fait donc correspondre verticalement les données physiques du capteur aux données chimiques de ces prélèvements, afin de pouvoir y associer une valeur de densité.

● **Étape 2 : l'ajustement en densité**

Pour compenser les déplacements des isopycnes dus aux ondes internes entre le profil de descente et celui montée, on procède ensuite à un ajustement en densité afin de replacer les mesures-bouteille *upcast* aux niveaux de densité des mesures hydrologiques *downcast* à calibrer. Cet ajustement en densité est nécessaire pour comparer les écarts (ctd-btl) sur des niveaux sigma identiques. A partir des données chimiques *upcast* compilées lors de l'étape 1 et des données hydrologiques *downcast* à calibrer, toutes les données sont ainsi assignées à des niveaux sigma identiques.

● **Étape 3 : l'optimisation des coefficients SBE**

L'étape suivante consiste à procéder, de manière itérative à la minimisation des écarts (ctd-btl) sur les niveaux sigma précédemment calculés. Elle intègre le calcul de la concentration en oxygène dissous mesurée par la sonde CTD et calculée à partir de la mesure de voltage mesurée. L'équation de calibration fournie par Seabird en ABC est utilisée :

$$O_2 (ml/l) = (1+a*istat)*S_{oc}*[V+V_{offset}]*[1+A*T+B*T^2+C*T^3]*O_{sat}*\exp[E*P/(T+273.15)]$$

avec

istat :	numéro de station
a :	dépendance linéaire au numéro de station
d1, d2 :	valeurs nominales données par SeaBird
V :	tension d'oxygène mesurée par le capteur, signal de sortie
dVdt :	dérivée temporelle de V
P :	pression
T :	température
O _s :	saturation en oxygène selon la formule de <i>Garcia et Gordon, 1992</i>
S _{oc} :	pente du signal d'oxygène
V _{offset} :	biais du signal d'oxygène
τ ₂₀ :	temps de réponse
T _{cor} , P _{cor} :	valeurs nominales données par SeaBird

Equation 1 : équation d'optimisation des coefficients SBE

Issues de la fiche de pré-calibration du capteur [\[annexe 4\]](#), les valeurs initiales des coefficients utilisées sont résumées table 2. Les coefficients d_1 , d_2 et P_{cor} restent fixes pendant l'ajustement. Seuls les coefficients S_{oc} , V_{offset} , τ_{20} , T_{cor} et E sont ajustés par la méthode en minimisant les écarts aux données bouteille.

Circuit 1 - s/n 0511								
	S_{oc}	V_{offset}	τ_{20}	E	d_1	d_2	T_{cor}	P_{cor}
	0.5051	-0.4830	2.12	0.036	$1.92634e^{-4}$	$-4.64803e^{-2}$	-0.0004	$1.35e^{-4}$
Circuit 2- s/n 1755								
	S_{oc}	V_{offset}	τ_{20}	E	d_1	d_2	T_{cor}	P_{cor}
	0.5337	-0.5109	1.31	0.036	$1.92634e^{-4}$	$-4.64803e^{-2}$	-0.001	$1.35e^{-4}$

Table 2 : Coefficients de pré-calibration du capteur SB43 pour les circuits 1 et 2 (source: Seabird)

L'écart entre les mesures chimiques et les données de la sonde est minimisé sur l'ensemble des stations, en utilisant un algorithme d'optimisation non contrainte non linéaire.

Après minimisation, les résidus [ctd-btl] sont calculés et ceux excédant 2.8 écart-types sont éliminés (Millard, 1993). La minimisation est ensuite à nouveau effectuée. La procédure est itérée jusqu'à élimination de toutes les données bouteilles excédant 2.8 écart-types.

- **Étape 4 : filtrage des données finales**

Les coefficients de l'équation non-linéaire de calibration obtenus lors l'étape précédente sont enfin appliqués au profil hydrologique *downcast*. Une vérification visuelle est effectuée pour chaque profil, en regard du profil de montée et des profils alentour. Les profils d'oxygène sont nettoyés, des flags qualité sont attribués.

D'éventuels pics visibles, liés à un problème électronique notamment, sont enlevés et le profil interpolé. Les données interpolées sur plus de 1dbar sont flaggées à 3 (questionnable), le code qualité 2 est attribué aux mesures d'oxygène correctement calibrées.

A la sortie du processus de calibration, les fichiers générés sont au format matlab, avec les données CTD-O₂ calibrées et flaggées.

Des graphiques sont générés pour présenter par station, les profils calibrés de température, salinité et oxygène en fonction de la pression.

III. RÉSULTATS

A. Statistiques sur les données bouteille

Les statistiques obtenues sur les données bouteille sont détaillées en [annexe 3](#).

Au total, 647 prélèvements d'eau de mer ont été faits sur 57 stations pour lesquelles il y a eu des échantillons d'eau de mer recueillis. Les 24 bouteilles n'ont pas toutes été remplies à chaque station, mais les prélèvements étaient en général régulièrement espacés sur la colonne d'eau entre la surface et le fond.

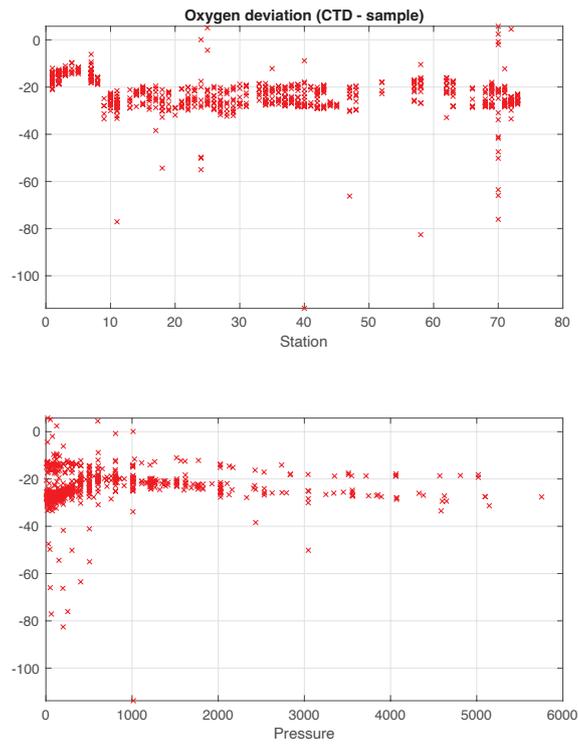


Figure 2 : Répartition des écarts d'oxygène (en $\mu\text{mol/kg}$) obtenus sur les profils de remontée entre mesures chimiques et mesures hydrologiques, en fonction du numéro de station (en haut) et de la profondeur (en bas)

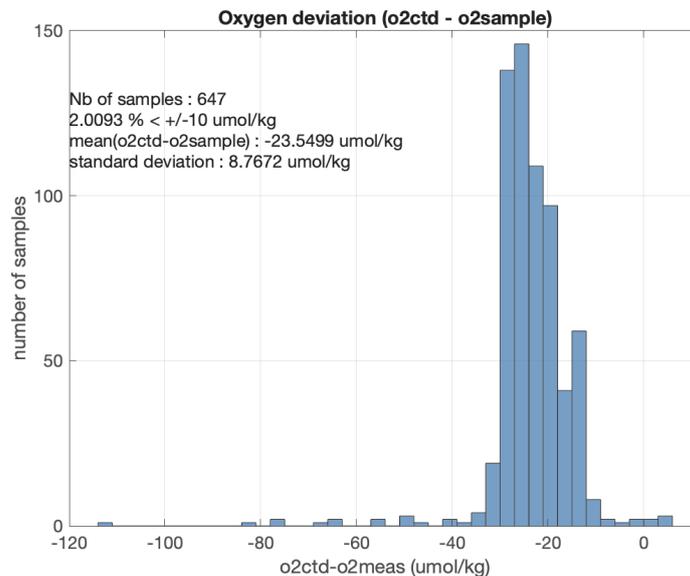


Figure 3 : Histogramme de répartition des écarts d'oxygène (en $\mu\text{mol/kg}$) obtenus à partir des 647 prélèvements chimiques

Si on compare [\(Figure 2\)](#) les valeurs d'oxygène obtenues à la remontée de la CTD entre les profils hydrologiques et les prélèvements chimiques, on constate un offset important (autour de $-14 \mu\text{mol/kg}$) présent dès le démarrage de la campagne à la station 1. Il s'accroît nettement à partir de la station 9, dont la grande profondeur (plus de 5900 mètres) a dû impacter la sonde CTD. L'offset reste stable de la station 9 jusqu'à la fin de la campagne, autour de $-25 \mu\text{mol/kg}$. On peut par ailleurs noter que cet offset ne varie pas en fonction de la profondeur.

A l'issue de la calibration et au regard des comparaisons ctd/bouteille, 74 prélèvements s'avèreront présenter un oxygène douteux et seront flaggés à 3 à la fin de la procédure de calibration.

B. Ajustement en densité

La [figure 4](#) présente les écarts en pression de l'isopycne de déclenchement des bouteilles entre la descente et la montée, pour chaque station et en fonction de la profondeur, avec la correction en oxygène associée.

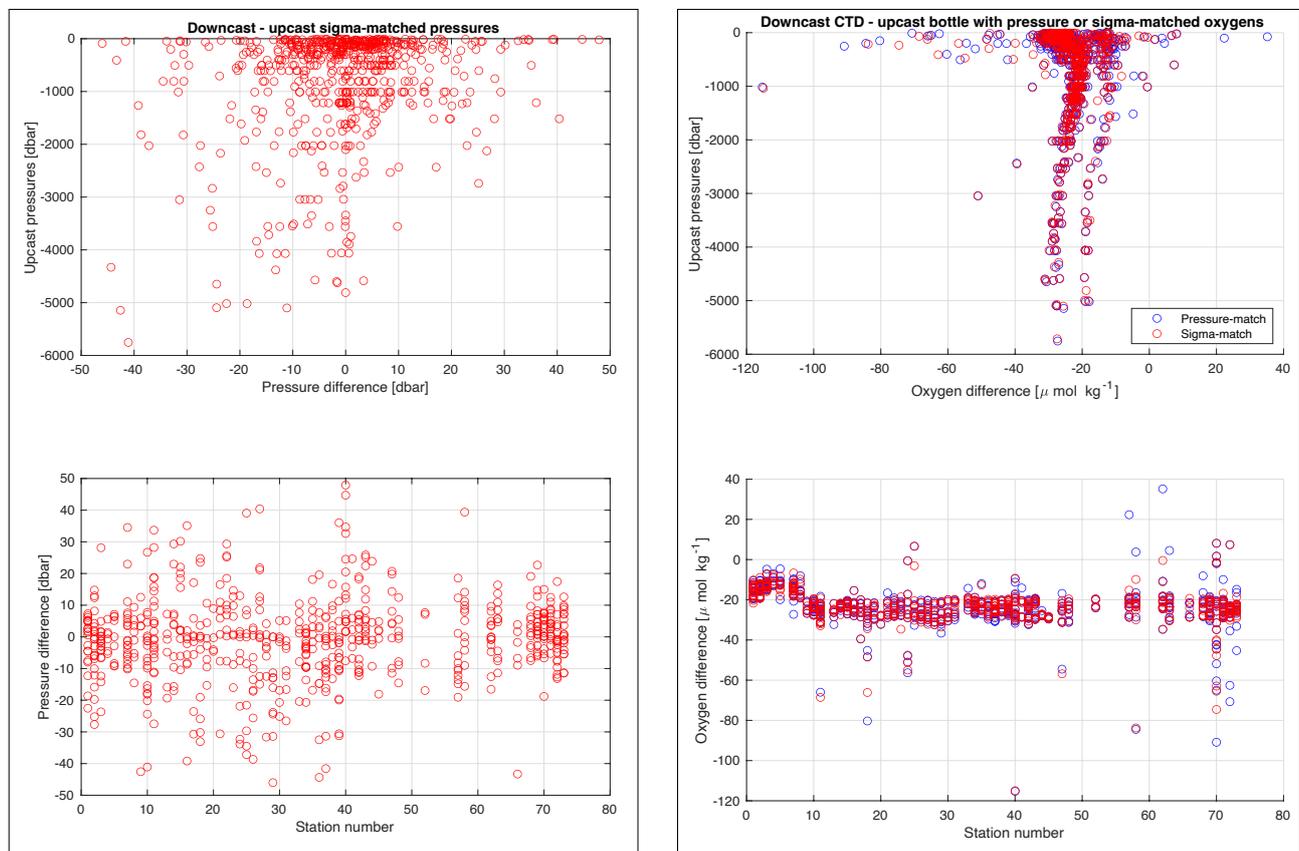


Figure 3 : (à gauche) - écarts en pression (dbar) de l'isopycne de déclenchement des bouteilles entre la descente et la montée, en fonction de la profondeur et du numéro de station ; (à droite) : corrections en oxygène associées (en $\mu\text{mol/kg}$)

Sur l'ensemble des stations, les écarts en pression de l'isopycne de déclenchement des bouteilles entre les profils descente et montée valent en moyenne -0.7 dbar avec un écart-type de 13 dbar et des valeurs qui restent comprises dans l'intervalle $[-50 \text{ } +50] \text{ dbar}$.

Cet écart implique une correction moyenne en oxygène de $-23.5 \pm 10 \mu\text{mol/kg}$.

C. Minimisation des écarts

Pour cette étape, les écarts [ctd-btl] sont minimisés au cours d'un processus itératif. Plusieurs expériences ont été faites pour aboutir à une optimisation optimale, dont les paramètres sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

Plusieurs expériences ont été menées pour aboutir à une optimisation optimale. La première expérience globale montre une dépendance linéaire aux stations, et confirme la dynamique d'un offset présent sur les stations 1 à 8, et accentué à partir de la station 9.

La seconde expérience menée avec l'option de dépendance linéaire aux stations confirme cette hypothèse. Il n'y a pas par ailleurs d'ajustement vertical à la profondeur.

Au final, les expériences conservées pour la suite des diagnostics sont les expériences 5 et 6, permettant de faire une calibration sur les stations [1-8] puis [9-73] séparément.

Les résultats obtenus sur les données du circuit 2 étant similaires à celles du circuit 1, nous ne présentons que les résultats de la calibration du circuit 1 dans les discussions suivantes. Les données calibrées pour les 2 circuits ont été remis comme livrables.

Expérience	Stations calibrées	Paramètres ajustement	moyenne des résidus	écart-type des résidus
#EXP1	[1 73]	is=0 ws=0 gdeprange=[0 500 1500 2500 3510]	0.005	3.52
#EXP2	[1 73]	is=1 (linear fit) ws=0 gdeprange=[0 500 1500 2500 3510]	0.0038	3.375
#EXP3	[1 73]	is=0 ws=1 (weigth with depth) gdeprange=[0 500 1500 2500 3510]	0.99	8.83
#EXP4	[1 73]	is=1 ws=1 gdeprange=[0 500 1500 2500 3510]	1.817	6.27
#EXP5	[1 8]	is=0 ws=0 gdeprange=[0 500 1500 2500 3510]	-0.00068	1.94
#EXP6	[9 73]	is=0 ws=0 gdeprange=[0 500 1500 2500 3510]	-0.0056	1.56

Table 3 : Expériences menées pour la minimisation des écarts avec paramètres d'ajustement et statistiques des résidus [ctd-btl]

Les figures 4 et 5 représentent la répartition des résidus en fonction des numéros de stations, profondeurs et numéros de bouteilles pour l'expérience 1 globale. On constate qu'il n'y a pas de dépendance linéaire au numéro de station, ni de dépendance verticale à la profondeur.

La figure 6 donne la répartition des résidus [ctd-bouteille] par gammes de profondeur. On observe que les quelques valeurs chimiques flaggées à douteuses (Qc=3) le sont dans les 500 premiers mètres de la colonne d'eau.

La figure 7 donne l'allure des diagrammes 9-S et 9-O2 pour trois gammes de profondeur différentes. Mis à part la station 101 présentant une dynamique légèrement moins salée et moins oxygénée en profondeur, on observe une structuration homogène avec des caractéristiques physiques T/S assez stables de la station 2 à la station 73.

Enfin, le tableau 4 résume les valeurs finales des coefficients d'ajustement, avec le pourcentage des données Winkler utilisées pour la calibration.

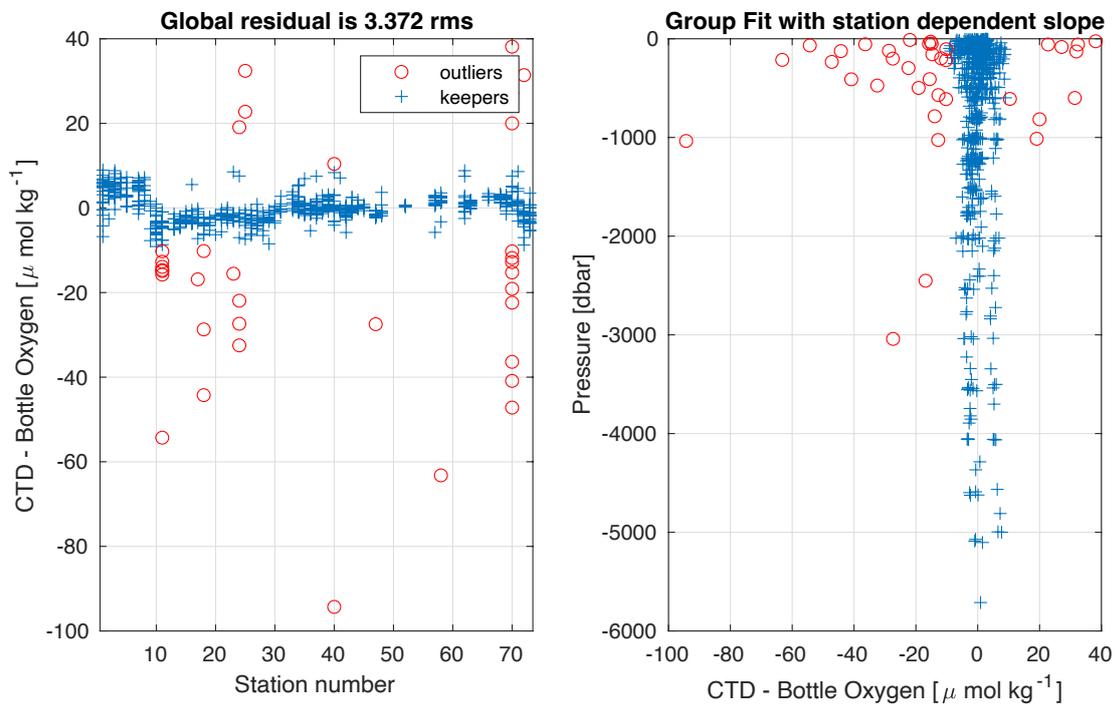


Figure 4 : Circuit 1, EXP2 - Résidus d'oxygène (en $\mu\text{mol/kg}$) après calibration en fonction des numéros de stations et de la profondeur

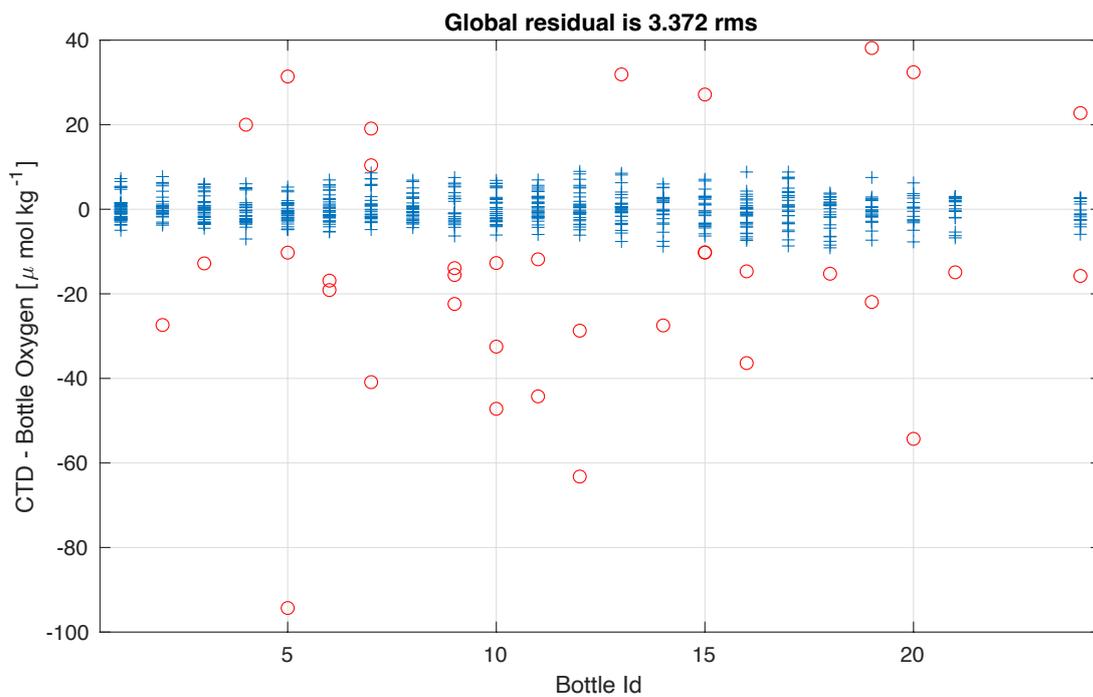


Figure 5 : Circuit 1, EXP2 - Résidus d'oxygène (en $\mu\text{mol/kg}$) obtenus après calibration en fonction des numéros de bouteilles

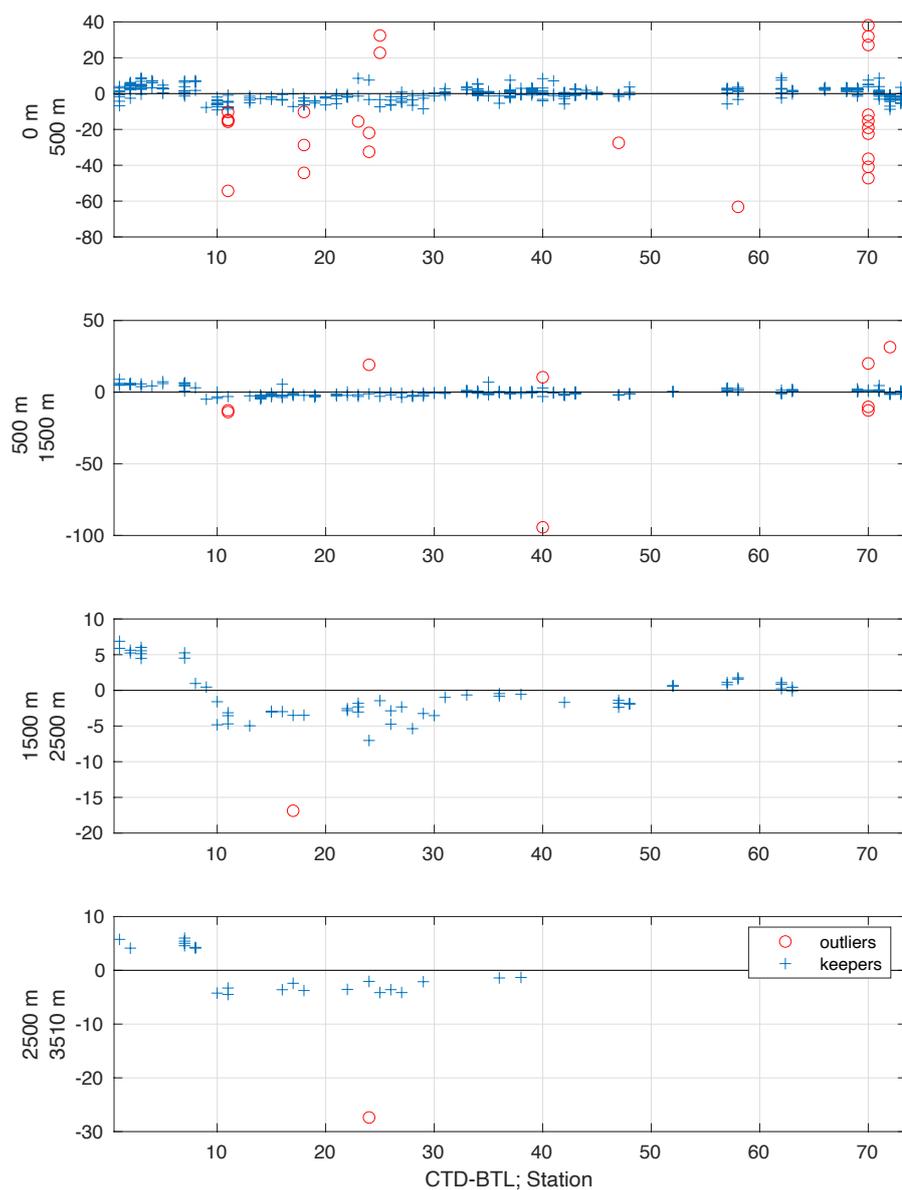


Figure 6 : Circuit 1, EXP2 - Résidus d'oxygène (en $\mu\text{mol/kg}$) après calibration par station et par gammes de profondeur.

Expérience	Soc	Voffset	τ_{20}	E	% data BTL used
EXP#2	0.545	-0.436	7.32	0.0355	94
EXP#5	0.517	-0.441	7.01	0.0365	98
EXP#6	0.534	-0.425	5.07	0.0358	87.5

Table 4 : Valeurs finales des coefficients de calibration obtenues à l'issue du processus de calibration pour les expériences 5 et 6

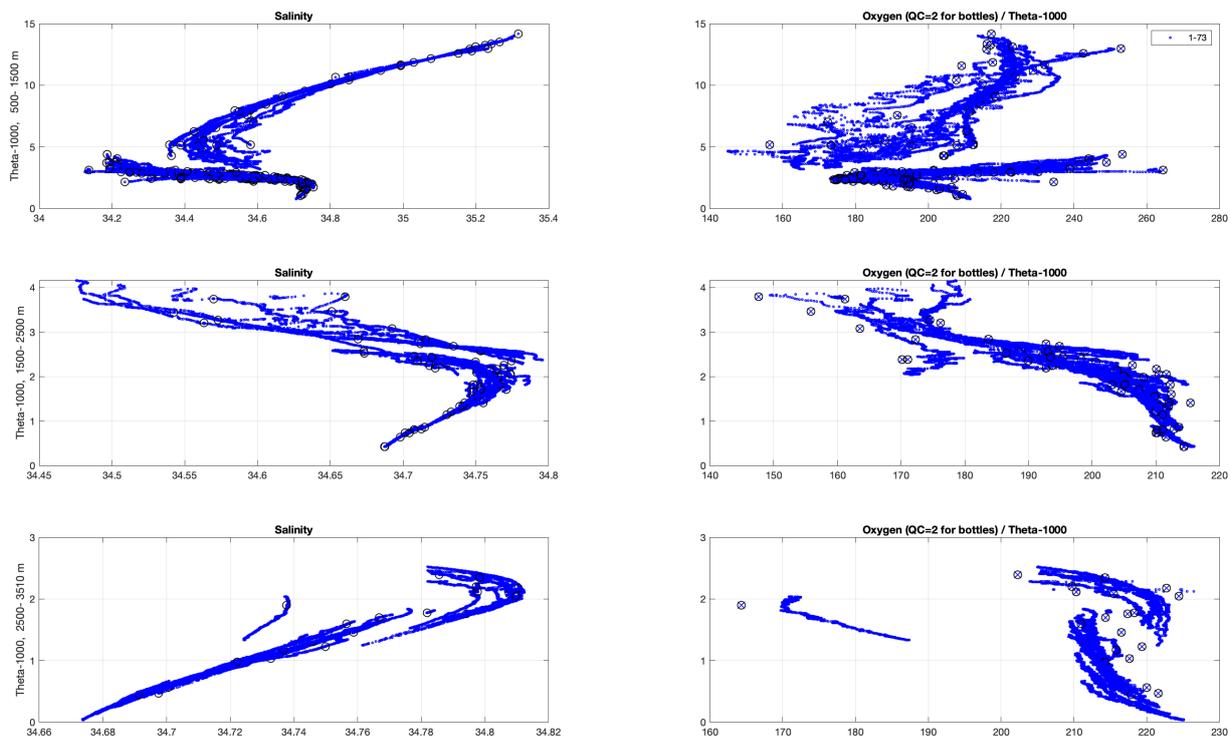


Figure 7 : Circuit 1, EXP1- Diagrammes ϑ -S (à gauche) et ϑ -O2 (à droite) obtenus pour les tranches de profondeur [500-1500] mètres (en haut), [1500-2500] mètres (au milieu) et [2500-3510] mètres (en bas).

D. Données calibrées

Les coefficients ajustés sont finalement appliqués au profil hydrologique *downcast*. Une vérification visuelle est effectuée pour chaque profil, en regard du profil de montée et des profils alentour.

Globalement, on observe :

- station 09_025 : un pic en oxygène autour de 5900 dbar
- station 025_067 : un pic en salinité autour de 1150 dbar
- station 033_088 : un pic en salinité et en oxygène en surface
- stations 45_121 et 45_123 : des profils douteux, sans ajustement possible entre les données hydrologiques et chimiques
- station 069_173 : un pic en salinité et en oxygène en surface
- station 70_174 : des mesures chimiques quasiment toutes flaggées après ajustement
- station 072_177 : un pic en salinité et en oxygène en surface

IV. Fournitures

A l'issue des travaux, les livrables suivants ont été remis :

- 1 - les données CTD calibrées et flaggées pour les 99 stations hydrologiques de la campagne SWINGS, au format texte ou matlab
- 2 - les graphiques des profils calibrés, superposés aux données Winkler utilisées pour l'ajustement
- 3 - le présent rapport de calibration

V. Bibliographie

- Garcia and Gordon (1992) "Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations", Limnology & Oceanography, vol 37(6), p1307-1312
- Millard, R. 1993. WHP operations and methods, October 1993 - <http://whpo.ucsd.edu/manuals.htm>
- Owens, W. et R. Millard : « A new algorithm for CTD oxygen calibration », J. Phys. Oceanogr., 15, 6210631, 1985
- Uchida, H., G. C. Johnson and K. E. McTaggart : « CTD oxygen sensor calibration procedures », The GOOSHIP Repeat Hydrography Manual: A Collection of Expert Reports and Guidelines, IOCCP Report No. 14, ICPO Publication Series No. 134, Version 1, 2010.
- Sea-Bird Electronics (2012). Application Note 64-2 : SBE43 Dissolved Oxygen Sensor Calibration and Data Corrections

Annexe 1 : Liste des stations hydrologiques de la campagne SWINGS-21. (en bleu) : stations avec prélèvements chimiques

Station	Cast	Longitude	Latitude	Date UTC	Time UTC	Depth (m)
S01	1	51.0000	-24.9998	14/01/2021	12:52:30	5020
S01	4	51.0000	-24.9997	15/01/2021	05:22:13	65
S02	5	39.9873	-28.6375	17/01/2021	08:12:56	2021
S02	6	39.9873	-28.6375	17/01/2021	10:48:06	4810
S03	8	32.8000	-30.3000	18/01/2021	22:34:53	2173
S03	10	32.8000	-30.3000	19/01/2021	07:48:20	1518
S03	12	32.8000	-30.3000	19/01/2021	11:49:31	2170
S04	15	31.6958	-29.8098	20/01/2021	10:28:03	623
S05	17	31.7995	-30.0700	20/01/2021	21:11:38	1029
S05	19	31.7843	-30.1200	21/01/2021	00:24:22	351
S06	20	32.1505	-30.6538	21/01/2021	04:18:08	3031
S07	21	33.4022	-32.5993	21/01/2021	17:50:04	3511
S08	24	34.4710	-35.2177	22/01/2021	17:35:37	3717
S09	25	36.0295	-37.0697	23/01/2021	07:28:12	5941
S10	28	35.9920	-38.0127	24/01/2021	04:18:08	5755
S11	29	36.3527	-39.8007	24/01/2021	19:26:03	5499
S11	32	36.3887	-39.8120	25/01/2021	13:16:59	151
S11	33	36.3927	-39.8137	25/01/2021	14:10:44	1518
S11	36	36.3503	-39.8003	26/01/2021	06:10:33	5103
S13	39	36.1028	-44.8583	27/01/2021	20:35:06	1603
S14	40	36.1743	-44.8617	28/01/2021	16:21:46	1373
S14	42	36.1743	-44.8617	28/01/2021	20:03:58	1390
S15	44	36.2307	-44.8530	29/01/2021	16:00:23	1757
S16	46	36.6005	-46.4998	30/01/2021	09:32:33	2628
S17	48	37.6010	-47.1695	30/01/2021	22:42:13	3343
S18	50	38.1503	-47.0595	31/01/2021	07:04:23	3007
S19	52	38.0597	-46.9698	31/01/2021	12:54:40	1237
S20	54	37.9495	-46.8900	31/01/2021	17:12:16	121
S21	55	37.7797	-46.5998	31/01/2021	19:26:11	1308
S21	57	37.7798	-46.6008	01/02/2021	04:12:54	1295
S21	59	37.7800	-46.6005	01/02/2021	07:22:36	510
S22	60	39.3007	-47.5000	01/02/2021	17:25:17	3854
S23	62	39.6000	-46.6703	02/02/2021	06:41:24	2031
S24	63	42.3892	-46.8248	02/02/2021	18:44:09	3453
S25	65	43.1032	-47.2997	03/02/2021	04:19:42	3745
S25	67	43.1002	-47.3017	03/02/2021	16:19:19	1347
S25	69	43.1067	-47.3063	03/02/2021	21:25:30	3746
S25	71	43.1093	-47.3093	04/02/2021	08:29:39	122
S26	73	44.1018	-48.1992	04/02/2021	16:58:52	3838
S27	75	45.5253	-49.7147	05/02/2021	09:17:55	3894
S28	76	49.3703	-51.7497	06/02/2021	05:27:25	4602
S29	78	49.3792	-52.3975	06/02/2021	15:12:33	4652
S30	79	49.3827	-52.9010	06/02/2021	21:06:55	4625
S31	80	51.5388	-48.9993	08/02/2021	02:15:04	1774
S31	83	51.5337	-49.0005	08/02/2021	10:42:39	205
S33	88	51.8890	-46.1198	09/02/2021	14:24:42	1519
S33	90	51.8875	-46.1202	09/02/2021	23:19:18	2205
S34	91	52.0005	-45.0023	10/02/2021	07:03:15	1219
S35	94	52.4000	-46.4195	10/02/2021	21:07:50	1186
S36	95	56.4997	-47.0000	11/02/2021	12:50:43	4339
S36	97	56.4430	-47.0413	12/02/2021	00:43:08	4334
S36	99	56.4133	-47.0882	12/02/2021	07:18:22	354
S36	100	56.4178	-47.0843	12/02/2021	08:15:33	1318

Station	Cast	Longitude	Latitude	Date UTC	Time UTC	Depth (m)
S37	101	58.0005	-47.7003	12/02/2021	16:10:44	1217
S38	103	59.7975	-47.2572	13/02/2021	03:48:23	4382
S38	105	59.7947	-47.2662	13/02/2021	12:47:10	1216
S39	107	60.0023	-47.9990	13/02/2021	22:34:18	4491
S40	108	65.0010	-48.5000	14/02/2021	16:02:26	2063
S41	110	66.8753	-49.6252	15/02/2021	06:17:30	857
S42	111	68.5018	-50.7017	15/02/2021	15:12:45	1686
S42	114	68.5015	-50.7010	16/02/2021	01:22:53	1683
S43	115	69.4900	-51.4990	16/02/2021	08:29:18	1216
S44	120	74.7180	-52.7077	17/02/2021	07:35:34	267
S45	121	73.7342	-53.0248	18/02/2021	03:20:05	76
S45	123	73.7335	-53.0240	18/02/2021	04:34:59	78
S46	124	73.4105	-52.9777	18/02/2021	07:05:58	109
S46	126	73.4095	-52.9745	18/02/2021	08:23:50	104
S47	128	73.6685	-54.1687	18/02/2021	18:38:06	2146
S47	131	73.6550	-54.1712	19/02/2021	05:00:09	2162
S48	133	76.3052	-55.2002	19/02/2021	23:48:04	1688
S49	135	76.6370	-55.4000	20/02/2021	04:30:03	1729
S50	136	76.9763	-55.5985	20/02/2021	07:08:06	1927
S51	137	77.1527	-55.6992	20/02/2021	09:29:52	2198
S52	138	77.3175	-55.7995	20/02/2021	11:51:25	2424
S53	139	77.4700	-55.9003	20/02/2021	15:00:22	2749
S54	140	77.6657	-56.0000	20/02/2021	18:11:36	2824
S55	141	77.8500	-56.1002	20/02/2021	21:08:33	2190
S56	142	78.0205	-56.1998	20/02/2021	23:42:44	2268
S57	143	78.3810	-56.3997	21/02/2021	02:50:46	1927
S58	146	81.9242	-57.6902	22/02/2021	02:47:22	2103
S58	148	81.9205	-57.6898	22/02/2021	09:22:11	1522
S59	151	82.3840	-57.3483	22/02/2021	21:29:49	4563
S60	152	82.1837	-57.4977	23/02/2021	01:40:10	3269
S61	153	81.9122	-57.6837	23/02/2021	05:06:54	2101
S62	154	81.4815	-57.9917	23/02/2021	08:55:46	1763
S63	155	77.3202	-55.7997	24/02/2021	14:34:29	2413
S65	158	72.6272	-53.0165	26/02/2021	00:09:08	121
S65	160	72.6272	-53.0165	26/02/2021	01:20:25	121
S66	162	74.7168	-51.7497	26/02/2021	15:17:14	409
S66	164	74.7167	-51.7497	26/02/2021	17:08:47	104
S66	165	74.7167	-51.7498	26/02/2021	17:47:10	406
S68	168	72.3007	-50.8003	27/02/2021	05:48:26	459
S68	170	72.3000	-50.8002	27/02/2021	07:26:48	466
S68	172	72.3000	-50.8002	27/02/2021	13:18:56	100
S69	173	72.2998	-48.7998	28/02/2021	22:27:05	1280
S70	174	72.0012	-47.0000	01/03/2021	07:40:32	1213
S71	175	67.8007	-45.0000	02/03/2021	00:19:30	1214
S72	177	63.9997	-38.0000	03/03/2021	12:01:07	1218
S73	178	62.0003	-34.9992	04/03/2021	03:50:35	1214

Annexe 2 : Liste des stations avec prélèvements chimiques, et nombre d'échantillons prélevés.

Station	Cast	N_Winkler_O2
1	1	20
2	6	22
3	12	19
4	15	6
5	17	4
5	19	5
7	21	20
8	24	8
9	25	5
10	28	20
11	36	22
13	39	6
14	42	10
15	44	11
16	46	9
17	48	8
18	50	11
19	52	7
20	54	4
21	57	7
22	60	10
23	62	8
24	63	9
25	69	10
26	73	10
27	75	11
28	76	8
29	78	10

Station	Cast	N_Winkler_O2
30	79	7
31	80	8
33	88	7
34	91	18
35	94	9
36	97	10
37	101	17
38	103	9
39	107	18
40	108	18
41	110	6
42	111	16
43	115	14
44	120	5
45	123	5
47	131	9
48	133	8
52	138	4
57	143	11
58	146	12
62	154	13
63	155	11
66	162	6
68	170	12
69	173	19
70	174	19
71	175	18
72	177	19
73	178	19

TOTAL N_WINKLER_O2	647
---------------------------	------------

Annexe 3 : Statistiques sur les données chimiques, répartition par station et numéros de bouteilles. (en orange) : pas de prélèvement - (en jaune) : données flaggées (Qc 4) à la fin du processus de calibration - (en bleu) : doublet sur la bouteille - (en vert) : fuite au moment du prélèvement - (en gris) : pas de valeur en pression associée.

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	#	
Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Station
Cast	1	6	12	15	17	19	21	24	25	28	36	39	42	44	46	48	50	52	54	57	57	Cast
Bottle ID	4928	4725	2143	617	1017	348	3458	3657	5803	5635	5003	1583	1373	1731	2588	3287	2961	1224	120	1279	Bottle ID	
1	4928	4725	2143	617	1017	348	3458	3657	5803	5635	5003	1583	1373	1731	2588	3287	2961	1224	120	1279	1	
2	4929	4492	2103	618	1018	298	3458	3300	5805	4999	4000	1582	1374	1733	2589	3289	2751	1198	120	1280	2	
3	3999	3994	2103	601	1019	297	3001	2801	5045	4000	3000	1582	1352	1690	2503	2800	2499	1198	120	1279	3	
4	3998	3494	1751	500	800	249	2499	2250	5047	3000	2500	1252	1350	1686	1999	2800	1998	1000	120	1001	4	
5	2708	2796	1501	396	800	199	2000	2000	4504	2100	1999	1252	1332	1499	1751	2401	1748	801	121	1002	5	
6	2701	2398	1101	396	801	151	1550	1600	4504	1749	1749	1251	1333	1501	1750	2400	1248	801	61	748	6	
7	2001	1598	1101	348	800	150	1250	1251	3999	1308	1499	1002	1253	1368	1252	1800	1001	500	60	749	7	
8	2001	1197	604	245	600	120	1000	1000	3499	1000	999	1002	1253	1366	1248	1801	499	501	40	501	8	
9	1000	998	603	246	601	90	799	802	3501	600	750	1000	1200	1349	1001	1201	299	376	40	500	9	
10	1001	798	502	246	601	60	649	600	3051	500	550	800	1201	1260	702	1202	200	375	15	293	10	
11	602	600	402	130	399	51	500	500	3050	398	400	800	1150	1259	501	1001	149	301	15	251	11	
12	601	500	302	89	400	30	300	401	2300	350	350	798	1150	1221	301	1001	120	200	15	250	12	
13	301	401	250	90	400	20	200	349	1750	299	301	501	1100	1206	200	701	119	201	15	159	13	
14	302	351	200	89	400	16	157	300	1749	252	250	500	1099	1202	150	700	102	157	15	119	14	
15	126	302	180	60	249	17	123	251	1251	200	201	500	1001	1156	129	501	101	120	15	119	15	
16	126	251	160	36	250	16	100	200	1252	160	160	302	1001	1161	75	500	60	101	15	80	16	
17	53	202	140	36	91	16	80	159	1001	117	120	300	899	700	74	250	59	100	15	49	17	
18	53	152	121	17	91	17	71	118	679	100	101	301	700	301	42	250	40	61	15	50	18	
19	28	127	110	11	50	17	45	87	678	74	76	151	199	201	14	122	40	40	15	41	19	
20	28	77	80	10	50	16	13	77	183	75	62	151	200	120	15	76	14	41	15	15	20	
21	5	53	29	8	13	16	10	41	182	39	40	148	49	69	15	30	14	15	15	16	21	
22		52	25	8	14	17	9	42	181	14	15	51	49	67	16	31	15	16	15	14	22	
23		45	20	7	13	16	10	41	180	14	14	51	50	69	15	30	14	15	15	15	23	
24	4	17	4	6	14	17	10	16	36	13	16	50	50	52	15	30	13	15	15	15	24	
nb O2 samples	20	22	19	6	4	5	20	8	5	20	22	6	10	11	9	8	11	7	4	7	224	

#	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	#	
Station	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	Station	
Cast	60	62	63	69	73	75	76	78	79	80	88	91	94	97	101	103	107	108	110	111	Cast	
Bottle ID	3787	2003	3396	3682	3771	3825	4513	4558	4533	4752	1499	1204	1172	4252	1203	4299	1199	2039	846	1600	Bottle ID	
1	3787	2003	3396	3682	3771	3825	4513	4558	4533	4752	1499	1204	1172	4252	1203	4299	1199	2039	846	1600	1	
2	3500	2004	2999	3499	3770	3824	3999	4298	4534	1501	1499	997	1171	4252	1000	3996	998	1702	846	1399	2	
3	3000	1750	2399	3501	3198	3500	3498	4000	4001	1001	999	998	1100	3696	799	3697	800	1499	699	1196	3	
4	2700	1499	2000	2999	2497	2998	2999	3502	4002	800	999	796	999	3498	600	3498	601	1202	650	996	4	
5	2399	1249	1501	2497	1999	2500	2500	3003	3497	800	751	596	999	3499	496	2997	500	1005	603	799	5	
6	1800	1000	1249	2499	1796	1999	2000	2501	3497	600	750	498	800	2994	399	2498	308	800	546	597	6	
7	1500	698	1001	2500	1246	1751	1499	2001	3000	499	599	397	598	2499	300	1998	302	601	499	500	7	
8	1251	500	700	2001	1001	1499	1250	2000	2998	499	501	295	499	2002	248	1500	248	499	449	400	8	
9	1001	399	602	1499	800	1249	999	1498	2499	400	501	249	497	1748	199	1000	200	402	400	352	9	
10	699	298	501	1248	695	819	803	999	2497	300	401	202	401	1748	149	801	151	299	303	299	10	
11	500	251	401	999	602	599	499	702	1743	249	302	149	300	1500	122	399	125	249	249	249	11	
12	398	201	299	800	500	379	398	699	1744	249	251	126	249	996	99	298	98	198	201	201	12	
13	300	150	249	500	399	353	298	599	1252	202	200	117	198	799	73	200	77	150	151	181	13	
14	251	120	201	400	249	302	249	399	1253	178	179	99	149	600	49	150	51	125	124	159	14	
15	200	101	138	300	201	260	197	398	751	159	159	74	120	400	40	99	40	99	100	139	15	
16	149	81	120	202	140	223	138	299	752	140	140	50	119	299	32	82	31	72	74	118	16	
17	101	61	99	160	121	202	119	251	551	119	120	39	75	200	21	60	19	48	50	99	17	
18	80	31	80	123	103	154	118	201	953	101	100	28	50	149	10	30	8	40	39	81	18	
19	50	15	45	108	84	104	79	149	179	79	80	29	79	10	31			31	9	60	19	
20	41	4	29	50	51	68	79	89	179	164	60	21	30	64	10	16			20	41	20	
21	25	4	14	43	50	44	14	50	54	39	41	10	15	41	10	16			13	9	21	
22	23	3	14	19	51	44	14	50	53	38	30	10	9	39	10	16			13	10	11	22
23	24	4	14	19	51	41	14	50	53	33	23	11	9	37	10	17			13	9	11	23
24	15	4	14	19	14	19	13	16	54	15	17	11	11	17	11	16			13	10	11	24
nb O2 samples	10	8	9	10	10	11	8	10	7	8	5	17	9	10	17	9	18	18	6	16	219	

#	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	#
Station	43	44	45	47	48	52	57	58	62	63	66	68	69	70	71	72	73	Station
Cast	115	120	123	131	133	138	143	146	154	155	162	170	173	174	175	177	178	Cast
Bottle ID	1201	262	78	2130	1666	2387	1900	2072	1739	2374	405	461	1239	1198	1200	1205	1199	Bottle ID
1	1201	262	78	2130	1666	2387	1900	2072	1739	2374	405	461	1239	1198	1200	1205	1199	1
2	1101	264	76	2131	1667	2386	1798	1799	1738	2201	404	399	1251	1199	1201	1206	1199	2
3	1000	263	77	2129	1665	2387	1599	1600	1737	1998	404	320	999	1000	1000	997	1003	3
4	900	242	77	1997	1599	2387	1399	1400	1600	1998	372	249	799	800	800	798	801	4
5	801	240	76	1800	1500	2346	1200	1200	1599	1752	350	200	599	601	597	597	600	5
6	701	221	60	1499	1501	2345	998	1000	1400	1401	298	176	499	600	499	599	600	6
7	599	220	60	999	1298	2299	802	800	1399	1202	249	150	402	500	402	496	500	7
8	500	202	60	1000	999	2247	700	598	1200	999	199	125	351	400	301	393	401	8
9	398	178	62	797	1000	2247	599	500	999	801	179							

Annexe 4 : Fiche de pré-calibration du capteur primaire s/n 0511



Sea-Bird Scientific
 13431 NE 20th Street
 Bellevue, WA 98005
 USA

+1 425-643-9866
 seabird@seabird.com
 www.seabird.com

SENSOR SERIAL NUMBER: 0511
 CALIBRATION DATE: 16-Jul-20

SBE 43 OXYGEN CALIBRATION DATA

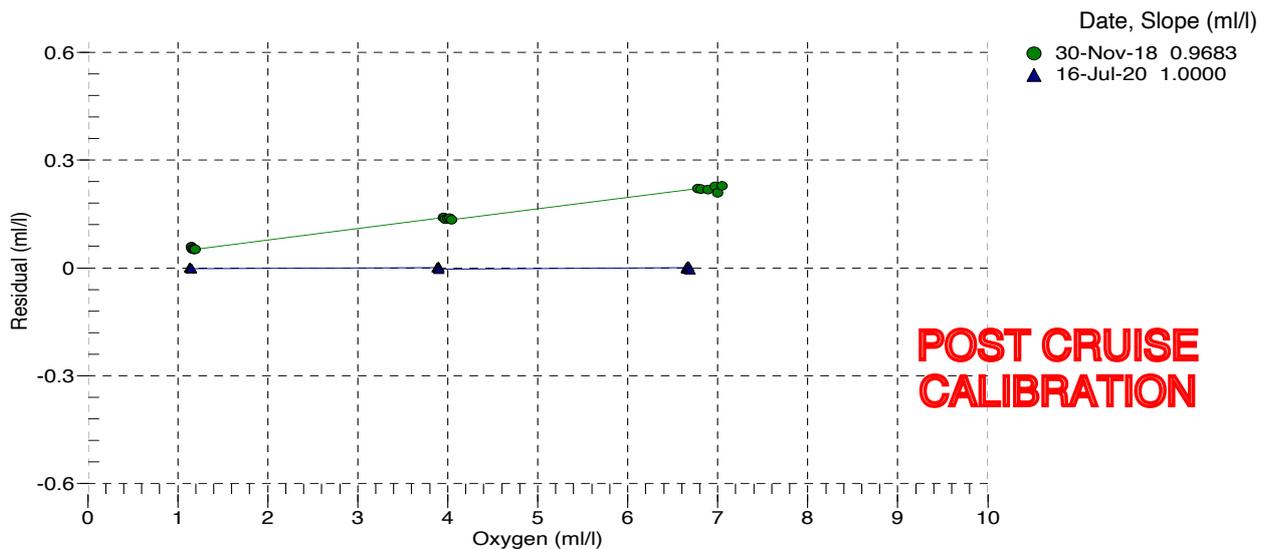
COEFFICIENTS:
 Soc = 0.5125
 Voffset = -0.4837
 Tau20 = 2.12

A = -4.5088e-003
 B = 2.3144e-004
 C = -3.6533e-006
 E nominal = 0.036

NOMINAL DYNAMIC COEFFICIENTS
 D1 = 1.92634e-4
 D2 = -4.64803e-2
 H1 = -3.30000e-2
 H2 = 5.00000e+3
 H3 = 1.45000e+3

BATH OXYGEN (ml/l)	BATH TEMPERATURE (° C)	BATH SALINITY (PSU)	INSTRUMENT OUTPUT (volts)	INSTRUMENT OXYGEN (ml/l)	RESIDUAL (ml/l)
1.13	2.00	0.00	0.713	1.13	0.00
1.13	6.00	0.00	0.743	1.13	0.00
1.14	12.00	0.00	0.786	1.14	-0.00
1.15	20.00	0.00	0.845	1.15	-0.00
1.15	26.00	0.00	0.889	1.15	-0.00
1.16	30.00	0.00	0.920	1.15	-0.00
3.88	2.00	0.00	1.273	3.88	0.00
3.89	6.00	0.00	1.373	3.89	0.00
3.90	12.00	0.00	1.521	3.90	0.00
3.90	20.00	0.00	1.713	3.90	0.00
3.90	26.00	0.00	1.859	3.90	-0.00
3.90	30.00	0.00	1.961	3.90	-0.00
6.65	2.00	0.00	1.835	6.65	0.00
6.65	6.00	0.00	2.004	6.65	-0.00
6.67	30.00	0.00	3.011	6.67	0.01
6.67	12.00	0.00	2.257	6.67	-0.00
6.68	20.00	0.00	2.589	6.68	0.00
6.69	26.00	0.00	2.841	6.69	-0.01

V = instrument output (volts); T = temperature (°C); S = salinity (PSU); K = temperature (°K)
 Oxsol(T,S) = oxygen saturation (ml/l); P = pressure (dbar)
 Oxygen (ml/l) = Soc * (V + Voffset) * (1.0 + A * T + B * T² + C * T³) * Oxsol(T,S) * exp(E * P / K)
 Residual (ml/l) = instrument oxygen - bath oxygen



Annexe 5 : Fiche de pré-calibration du capteur secondaire s/n 1755



Sea-Bird Scientific
13431 NE 20th Street
Bellevue, WA 98005
USA

+1 425-643-9866
seabird@seabird.com
www.seabird.com

SENSOR SERIAL NUMBER: 1755
CALIBRATION DATE: 21-Aug-20

SBE 43 OXYGEN CALIBRATION DATA

COEFFICIENTS:
Soc = 0.5407
Voffset = -0.5115
Tau20 = 1.31

A = -4.6851e-003
B = 2.0450e-004
C = -3.1743e-006
E nominal = 0.036

NOMINAL DYNAMIC COEFFICIENTS
D1 = 1.92634e-4 H1 = -3.300000e-2
D2 = -4.64803e-2 H2 = 5.00000e+3
H3 = 1.45000e+3

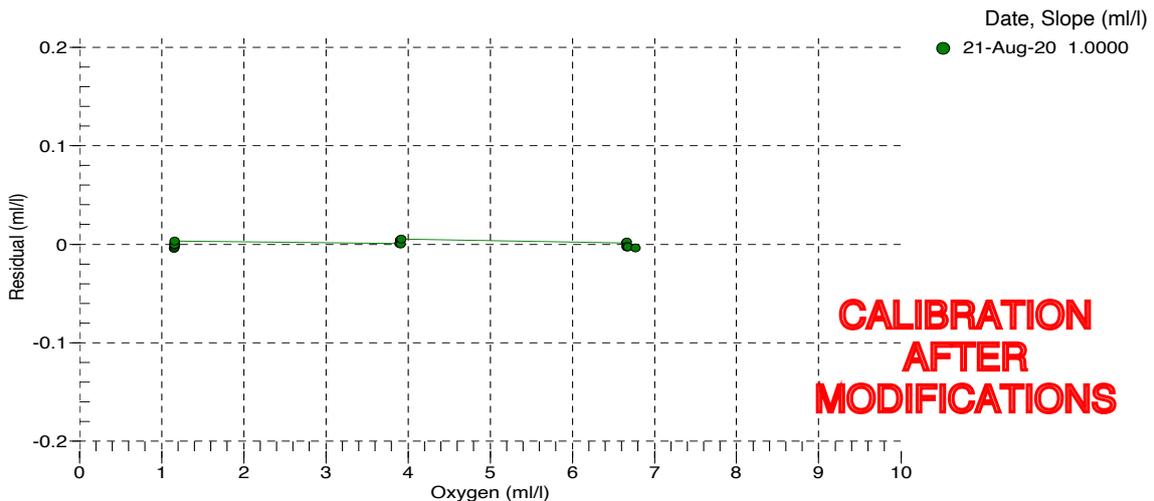
BATH OXYGEN (ml/l)	BATH TEMPERATURE (° C)	BATH SALINITY (PSU)	INSTRUMENT OUTPUT (volts)	INSTRUMENT OXYGEN (ml/l)	RESIDUAL (ml/l)
1.15	2.00	0.00	0.733	1.15	-0.00
1.16	26.00	0.00	0.904	1.16	0.00
1.16	6.00	0.00	0.762	1.15	-0.00
1.16	12.00	0.00	0.804	1.16	-0.00
1.16	20.00	0.00	0.861	1.16	-0.00
1.16	30.00	0.00	0.936	1.16	0.00
3.90	2.00	0.00	1.263	3.90	0.00
3.90	6.00	0.00	1.358	3.90	0.00
3.90	30.00	0.00	1.938	3.91	0.00
3.91	26.00	0.00	1.838	3.91	0.00
3.91	12.00	0.00	1.503	3.91	0.00
3.92	20.00	0.00	1.696	3.92	0.01
6.65	2.00	0.00	1.794	6.66	0.00
6.66	12.00	0.00	2.200	6.66	0.00
6.66	26.00	0.00	2.770	6.66	-0.00
6.66	6.00	0.00	1.957	6.66	-0.00
6.68	30.00	0.00	2.949	6.68	-0.00
6.77	20.00	0.00	2.555	6.77	-0.00

V = instrument output (volts); T = temperature (°C); S = salinity (PSU); K = temperature (°K)

Oxsol(T,S) = oxygen saturation (ml/l); P = pressure (dbar)

Oxygen (ml/l) = Soc * (V + Voffset) * (1.0 + A * T + B * T² + C * T³) * Oxsol(T,S) * exp(E * P / K)

Residual (ml/l) = instrument oxygen - bath oxygen



Annexe 6 : Schématisation du processus de calibration des données CTD-O2 : données input (bleu), intermédiaires de calcul (gris) et output (noir)

