

# **Capteurs et instrumentation utilisés en océanographie physique**

Jean-Pierre GIRARDOT

2002

## Table des matières

<b><u>I - CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS.....</u></b>	<b><u>4</u></b>
I - 1 - SENSIBILITE.....	4
I - 2 - LINEARITE.....	4
I - 3 - DOMAINE D'UTILISATION.....	4
I - 4 - ÉTENDUE DE MESURE, PLEINE ECHELLE.....	4
I - 5 - FINESSE.....	4
<b><u>II - LES ERREURS DE MESURE.....</u></b>	<b><u>5</u></b>
II - 1 - ERREUR ALEATOIRE.....	5
II - 2 - ERREUR SYSTEMATIQUE.....	7
II - 4 - FIDELITE.....	7
II - 5 - JUSTESSE.....	7
II - 6 - PRECISION.....	7
<b><u>III - REPONSE DES CAPTEURS.....</u></b>	<b><u>9</u></b>
III - 1 - REPONSE A UN ECHELON DES SYSTEMES DU PREMIER ORDRE.....	9
III - 2 - REPONSE A UNE RAMPE DES SYSTEMES DU PREMIER ORDRE.....	9
III - 3 - REPONSE A UN ECHELON DES SYSTEMES DU SECOND ORDRE.....	11
<b><u>IV - MESURE DE LA PRESSION.....</u></b>	<b><u>13</u></b>
IV - 1 - PRINCIPE.....	13
IV - 2 - CAPTEUR DE PRESSION POTENTIOMETRIQUE.....	13
IV - 3 - CAPTEUR DE PRESSION A JAUGES DE CONTRAINTE.....	14
IV - 4 - CAPTEUR DE PRESSION PIEZOELECTRIQUE.....	15
IV - 5 - AUTRES CAPTEURS DE PRESSION.....	17
<b><u>V - MESURE DE LA TEMPERATURE.....</u></b>	<b><u>18</u></b>
V - 1 - THERMOMETRES A RENVERSEMENT .....	18
V - 2 - CAPTEUR DE TEMPERATURE A THERMISTANCE.....	20
V - 3 - LINEARISATION D'UN CAPTEUR A THERMISTANCE.....	21
V - 4 - BATHYTHERMOGRAPHE PERDABLE.....	23
V - 3 - CAPTEUR DE TEMPERATURE A FIL METALLIQUE.....	24
<b><u>VI - MESURE DE LA CONDUCTIVITE.....</u></b>	<b><u>26</u></b>
VI - 1 - CAPTEUR DE CONDUCTIVITE A ELECTRODES.....	26
VI - 2 - CAPTEUR DE CONDUCTIVITE A INDUCTION MAGNETIQUE.....	30
<b><u>VII - MESURE DE LA SALINITE.....</u></b>	<b><u>30</u></b>
VII - 1 - DEFINITION.....	31
VII - 2 - HISTORIQUE.....	31

<b>VIII - CALCUL DE LA SALINITE.....</b>	<b>32</b>
VIII - 1 - DEFINITION DE LA SALINITE.....	32
VIII - 2 - HISTORIQUE.....	32
VIII - 3 - DEFINITION DE L'ECHELLE DE SALINITE PRATIQUE.....	32
VIII - 4 - L'ALGORITHME POUR LE CALCUL DE LA SALINITE.....	33
VIII - 5 - AMELIORATION DE LA MESURE DE LA SALINITE.....	37
VIII - 5 - 1 - Erreurs dues aux réponses différentes des capteurs.....	37
VIII - 5 - 2 - Exemple d'algorithme de correction.....	38
VIII - 5 - 3 - Circuit de correction électronique.....	39
VIII - 5 - 4 - Exemple de correction mécanique.....	40
<b>IX - CALCUL DE LA DENSITE DE L'EAU DE MER.....</b>	<b>41</b>
<b>et <math>\Delta p</math> erreur sur la pression en bars.....</b>	<b>43</b>
<b>X - MESURE DE L'OXYGENE DISSOUS DANS L'EAU.....</b>	<b>44</b>
X - 1 - HYDROLOGIE CLASSIQUE.....	44
X - 2 - CAPTEUR D'OXYGENE ELECTROCHIMIQUE.....	44
X - 3 - CAPTEUR D'OXYGENE A OPTODE.....	45
<b>XI - MESURE DE LA CELERITE DU SON DANS L'EAU DE MER.....</b>	<b>47</b>
<b>XII - CALCUL DE LA CELERITE DU SON DANS L'EAU DE MER.....</b>	<b>48</b>
<b>XIII - CALCUL DE L'IMMERSION.....</b>	<b>50</b>
<b>XIV - BATHYSONDE.....</b>	<b>51</b>
<b>XV - MESURE EULERIENNE DES COURANTS MARINS.....</b>	<b>54</b>
XV - 1 - MESURE DE LA DIRECTION DES COURANTS MARINS.....	54
XV - 1.1 - Compas magnétique à équipage mobile.....	55
XV - 1.3 - Compas magnétorésistifs.....	59
XV - 1.4 - Compas magnétométriques.....	60
XV - 2 - MESURE DE LA VITESSE DES COURANTS MARINS.....	61
XV - 2.1 - Capteurs tournants.....	61
XV - 2.2 - Courantomètre à capteur tournant.....	65
XV - 2.3 - Différentes méthodes de mesure des courants à l'aide de capteurs tournants.....	66
XV - 2.4 - Capteurs statiques.....	67
<b>XVI - MESURES LAGRANGIENNES DES COURANTS MARINS.....</b>	<b>74</b>
XVI - 1 - BOUEES DERIVANTES.....	74
XVI - 2 - FLOTTEURS DERIVANTS DE SUBSURFACE.....	76
XVI - 2.1 - SOFAR.....	76
XVI - 2.2 - RAFOS.....	78
XVI - 2.2 - Marvor.....	79
<b>XVII - HISTOIRE DES SALINOMETRES ET DES SONDES CTD.....</b>	<b>82</b>
XVII - 1 - LES PREMIERS SALINOMETRES.....	82
XVII - 2 - MESURES IN SITU.....	83
XVII - 3 - REALISATION DES BATHYSONDES STD.....	84
XVII - 4 - L'ARRIVEE DES CTD.....	85
XVII - 5 - DEVELOPPEMENTS FUTURS.....	86

## INTRODUCTION

Dans le domaine de l'océanographie physique, comme ailleurs, toute quantité physique ou chimique à mesurer est généralement convertie en un signal électrique qui peut être amplifié ou mis sous une forme favorable à la mesure ou à l'enregistrement. En instrumentation, le terme "capteur" ou "transducteur" désigne le composant utilisé pour faire cette conversion. Celui-ci est choisi en fonction de la mesure particulière qu'il doit assurer en tenant compte de son prix, de ses caractéristiques électriques et physiques, de sa précision et de son temps de réponse. D'autres paramètres tels que sa résolution, sa dérive dans le temps, etc... peuvent aussi être pris en considération.

Nous allons présenter les principaux capteurs et appareils utilisés dans le domaine de l'océanographie physique. Nous évoquerons parfois l'historique des appareils et certaines méthodes de mesure chimique.

Pour mieux appréhender la suite, nous commençons par donner quelques définitions sur les capteurs en général.

## I - CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS

### I - 1 - SENSIBILITE

Un capteur est un dispositif qui permet la mesure d'un paramètre physique ou chimique. Il fournit une grandeur électrique qui en est la représentation aussi exacte que possible. En général cette grandeur électrique varie proportionnellement avec le paramètre mesuré. Ainsi, pour une variation  $\Delta M$  de la grandeur à mesurer, la grandeur de sortie varie de  $\Delta S$  de telle sorte que :

$$\Delta S = S \Delta M$$

où  $S$  est la sensibilité du capteur. Elle doit dépendre le moins possible de son vieillissement et de son environnement, (c. a. d. de la variation des autres grandeurs).

### I - 2 - LINEARITE

Comme nous venons de le dire, il est recherché une sensibilité relativement constante sur toute l'étendue de mesure. Les différences entre la grandeur électrique de sortie et la droite idéale  $s = S.M$  sont appelés « écarts de linéarité ».

La sortie du capteur se présente :

- soit comme un générateur fournissant un courant ou une tension, le capteur est alors actif,
- soit comme une impédance, le capteur est alors passif.

### I - 3 - DOMAINE D'UTILISATION

Le domaine d'utilisation d'un capteur est limité par les bornes supérieures et parfois inférieures des valeurs de la grandeur qu'il peut subir sans modification de ses caractéristiques.

### I - 4 - ÉTENDUE DE MESURE, PLEINE ECHELLE

L'étendue de mesure est la différence entre la limite supérieure et la limite inférieure de la grandeur mesurable par un capteur. Lorsque le capteur fournit une valeur de la grandeur entre 0 et le maximum, ce maximum est appelé « Pleine Echelle », sous-entendu « de mesure ». Cette étendue de mesure est notée PE. Elle est toujours à l'intérieur du domaine de non-détérioration qui est lui-même inférieur au seuil destruction.

### I - 5 - FINESSE

La finesse permet d'estimer l'influence que peut avoir le capteur et de son support ou de ses liaisons sur la grandeur à mesurer. Par exemple, dans le cas d'un capteur de température, une capacité calorifique importante réduit sa finesse.

## II - LES ERREURS DE MESURE

### II - 1 - ERREUR ALEATOIRE

Elle inclut les causes d'erreur dues aux :

- seuil de mesure (plus petite valeur mesurable),
- résolution (plus petite variation mesurable),
- hystérésis,
- parasites,
- influences du milieu sur le capteur : Par exemple celles provoquées par les variations de température sur un capteur de pression.

Lors de mesures répétées nous obtenons généralement une dispersion des résultats ; si les erreurs de mesure sont aléatoires un traitement statistique permet de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée et de fixer les limites de l'incertitude.

Lorsque la mesure d'une même valeur a été répétée  $n$  fois en donnant les résultats :  $M_1, M_2, \dots, M_n$ , la valeur moyenne  $\bar{M}$  est par définition :

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{n}$$

L'erreur aléatoire  $E_a$  est la différence entre le résultat d'un mesurage  $M_i$  et cette moyenne  $\bar{M}$  lorsque  $n$  tend vers l'infini et que les mesures sont obtenues dans des conditions de répétabilité :

$$E_a = M_i - \bar{M}$$

Lorsque les erreurs accidentelles sur les différentes mesures sont indépendantes, la probabilité d'apparition de différents résultats satisfait habituellement la loi de Gauss.

Lorsque cette loi est satisfaite, la probabilité  $P(M_a, M_b)$  d'obtenir comme résultat d'une mesure une valeur comprise entre deux valeurs  $M_a$  et  $M_b$  peut s'écrire :

$$P(M_a, M_b) = \int_{M_a}^{M_b} P(M) dM$$

où  $P(M)$  est la densité de probabilité d'obtenir la valeur  $M$ .

Dans le cas de la loi de Gauss cela donne :

$$P(M) = \frac{\exp\left(-\frac{(M - \bar{M})^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

Une indication de la dispersion de ces résultats est donnée par l'écart type  $\sigma$  :

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (M - \bar{M})^2 P(M) dM$$

- la valeur de M la plus probable est  $\bar{M}$ ,
- la probabilité d'apparition d'un résultat de la mesure dans les limites indiquées est :

$$P(\bar{M} \pm \sigma) = 68.28\%$$

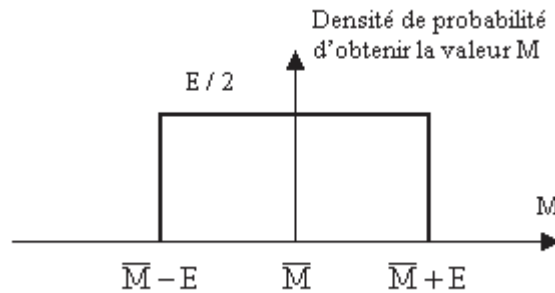
$$P(\bar{M} \pm 2\sigma) = 95.45\%$$

$$P(\bar{M} \pm 3\sigma) = 99.73\%$$

Lorsque nous disposons d'un nombre « n » important de mesure,  $\sigma$  peut être estimé :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n-1}}$$

Il est fréquent que le fabricant d'un capteur donne sa précision sans donner la loi de distribution des erreurs. Par exemple il indique que son capteur fournit la valeur à mesurer (le mesurande M) à  $\pm E$ . Dans ce cas, il faut se placer dans le cas le plus défavorable et considérer que la densité de probabilité est uniforme dans l'intervalle  $[-E; +E]$  comme représenté ci-dessous.



Dans ce cas nous avons :

Probabilité  $\{-E \leq M \leq +E\} = 1 = \text{aire du rectangle}$ . Donc :

$$\sigma^2 = \int_{-E}^{+E} \frac{1}{2E} M dM$$

Soit, après intégration :

$$\sigma^2 = \frac{E^2}{3} \quad \text{d'où} \quad \sigma = \frac{E}{\sqrt{3}}$$

## II - 2 - ERREUR SYSTEMATIQUE

L'erreur systématique se superpose aux erreurs aléatoires. Elle est provoquée par un mauvais réglage ou un mauvais étalonnage. Elle peut être également induite par la présence du capteur qui modifie la valeur du mesurande. Elle devient importante dans le cas où les instruments sont mal utilisés.

L'erreur systématique  $E_s$  est la différence entre la moyenne  $\overline{M}$  lorsque  $n$  tend vers l'infini et que les mesures sont obtenues dans des conditions de répétabilité et une valeur **vraie** du mesurande  $M_0$ :

$$E_s = \overline{M} - M_0$$

Cette définition utilise sciemment l'expression « une valeur **vraie** du mesurande » et non « une **vraie** valeur du mesurande » puisque la valeur vraie du mesurande n'est pas connue (sauf si l'on considère que le mesurande est un étalon primaire du système SI).

## II - 4 - FIDELITE

La fidélité d'un capteur est sa propriété à redonner des valeurs très proches lorsque, après avoir varié, la grandeur reprend sa valeur initiale. Ce qui se traduit par des résultats groupés autour de leur valeur moyenne. L'écart type dont l'importance reflète la dispersion des résultats est souvent considéré comme l'erreur de fidélité : Il permet ainsi une appréciation quantitative de la fidélité. La valeur la plus probable, telle qu'elle résulte d'un ensemble de mesures, peut être connue avec une faible marge d'incertitude tout en étant assez éloignée de la valeur vraie.

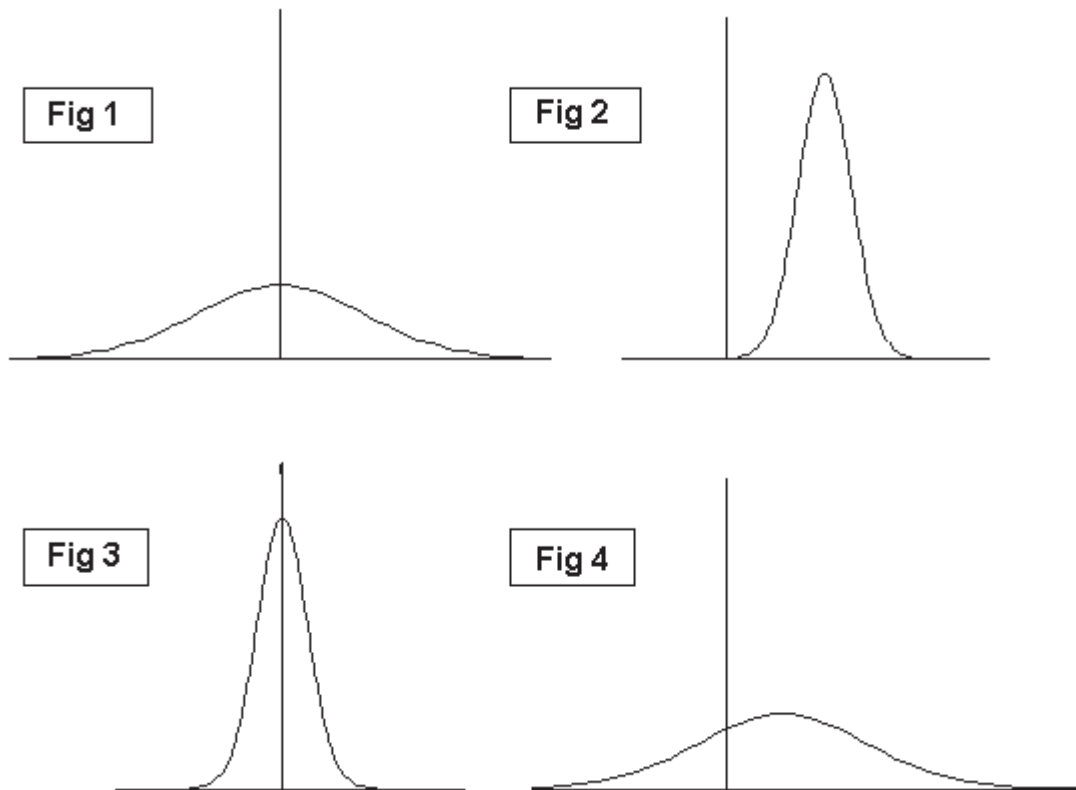
## II - 5 - JUSTESSE

La justesse est la qualité d'un appareillage de mesure à donner une valeur (moyenne) très proche de la valeur vraie.

## II - 6 - PRECISION

La précision qualifie l'aptitude du capteur à fournir des données qui, prises individuellement, sont proches de la valeur vraie. Un capteur précis est donc à la fois fidèle et juste.





#### Différents types de répartition des résultats de mesure :

**Fig.1** - Capteur juste mais non fidèle : Les erreurs systématiques sont réduites mais les erreurs aléatoires sont importantes.

**Fig.2** - Capteur fidèle mais non juste : Les erreurs systématiques sont importantes mais les erreurs aléatoires sont faibles.

**Fig.3** - Capteur juste et fidèle donc précis : Les erreurs systématiques et aléatoires sont faibles.

**Fig.4** - Capteur ni juste, ni fidèle : Les erreurs systématiques et aléatoires sont importantes.

### III - REPONSE DES CAPTEURS

La réponse des capteurs n'est pas instantanée. Lorsque la grandeur à mesurer varie la valeur mesurée suit avec un certain retard.

#### III - 1 - REPONSE A UN ECHELON DES SYSTEMES DU PREMIER ORDRE

Nous appelons la grandeur à mesurer le mesurande. Admettons, pour simplifier, que ce mesurande passe instantanément de la valeur 0 à la valeur  $m_0$  au temps  $t = 0$  :

$$\begin{aligned} m &= 0 && \text{pour} && t < 0 \\ m &= m_0 && \text{pour} && t \geq 0 \end{aligned}$$

L'équation différentielle d'un système du premier ordre est :

$$A \frac{ds}{dt} + Bs = m_0$$

Supposons qu'au temps  $t = 0$   $s = 0$ . La solution de l'équation différentielle est :

$$s = s_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \right] \quad \text{avec} \quad \theta = \frac{A}{B}$$

Nous appellerons  $\theta$  la constante de temps.

Prenons le cas concret d'un capteur de température. Ce capteur a une capacité calorifique  $C$ , une masse  $m$ , un coefficient d'échange surfacique par conduction  $h$  et une surface  $S$  en contact avec le milieu à mesurer. Soit  $T$  la température de ce milieu qui varie en fonction du temps et  $T_c$  la température du capteur à l'instant  $t$  ; l'équation classique de transfert de chaleur est :

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{hS}{mC} (T - T_c)$$

Nous posons :

$$\theta = \frac{mC}{hS}$$

$\theta$  est appelé constante de temps. Et :

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{\theta} (T - T_c)$$

soit, après intégration :

$$T_c = T \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \right)$$

#### III - 2 - REPONSE A UNE RAMPE DES SYSTEMES DU PREMIER ORDRE

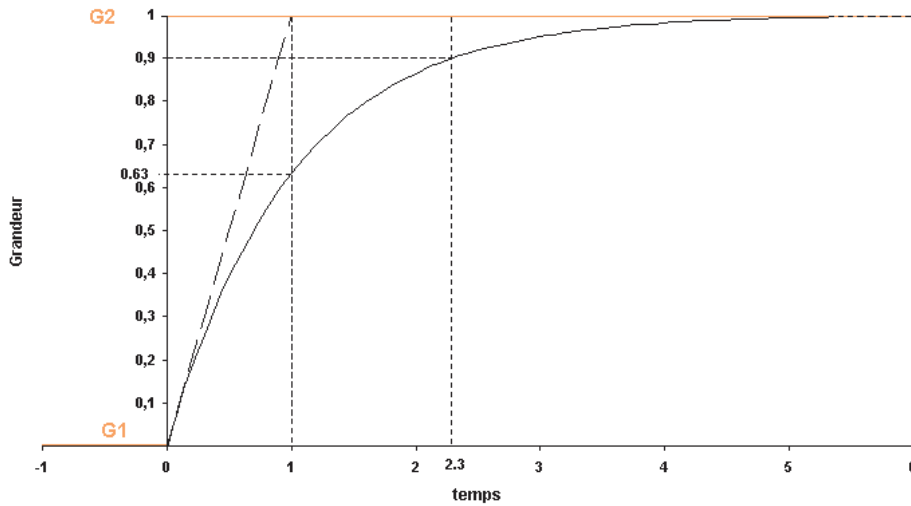
Replaçons-nous dans le cas précédent du capteur de température. A l'instant  $t = 0$ ,  $T = T_0$ , et ensuite le mesurande varie linéairement en fonction du temps :  $T = \mu t + T_0$  la température mesurée est alors de :

$$T_c = \mu t + T_0 - \mu\theta \left[ 1 + e^{-\frac{t}{\theta}} \right]$$

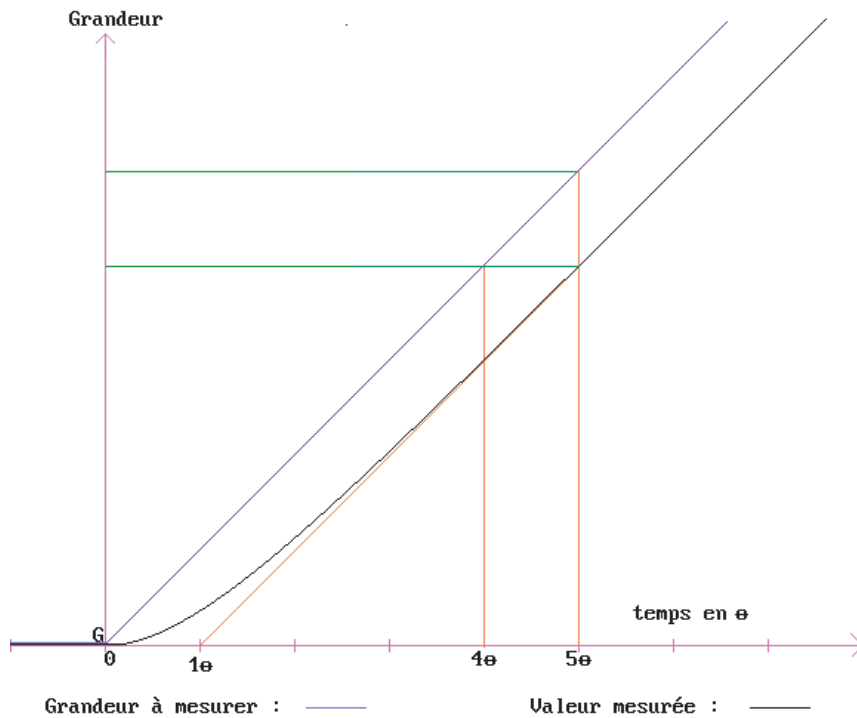
La température mesurée tend vers une asymptote d'équation :

$$Y = \mu t + T_0$$

Elles se confondent vers  $t = 5 \theta$ . L'erreur entre la température réelle et celle mesurée est alors de  $\mu \theta$ .



REPONSE A UN ECHELON D'UN SYSTEME DU PREMIER ORDRE



REPONSE A UNE RAMPE D'UN SYSTEME DU PREMIER ORDRE

### III - 3 - REPONSE A UN ECHELON DES SYSTEMES DU SECOND ORDRE

Le mesurande passe instantanément de la valeur 0 à la valeur  $m_0$  au temps  $t = 0$  :

$$\begin{aligned} m &= 0 & \text{pour} & \quad t < 0 \\ m &= m_0 & \text{pour} & \quad t \geq 0 \end{aligned}$$

Cet échelon est appliqué à un système du second ordre qui a pour équation :

$$A \frac{d^2s}{dt^2} + B \frac{ds}{dt} + Cs = m_0$$

Pour simplifier, considérons que les conditions initiales à  $t = 0$  sont :

$$s = 0 \quad \text{et} \quad \frac{ds}{dt} = 0$$

En régime permanent nous avons :

$$s = \frac{m_0}{C}$$

Posons :

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{C}{A}}$$

qui est la pulsation propre et

$$\zeta = \frac{B}{\sqrt{CA}}$$

qui est le coefficient d'amortissement. Suivant la valeur de  $\zeta$  nous obtenons 3 solutions :

1)  $\zeta < 1$  Faible amortissement. Le régime transitoire est une oscillation amortie de la forme :

$$s(t) = s_0 \left[ 1 - \frac{\exp(-\zeta\omega_0 t)}{R} \sin(R\omega_0 t + \psi) \right]$$

où

$$R = \sqrt{|1 - \zeta^2|} \quad \text{et} \quad \psi = \arcsin(R)$$

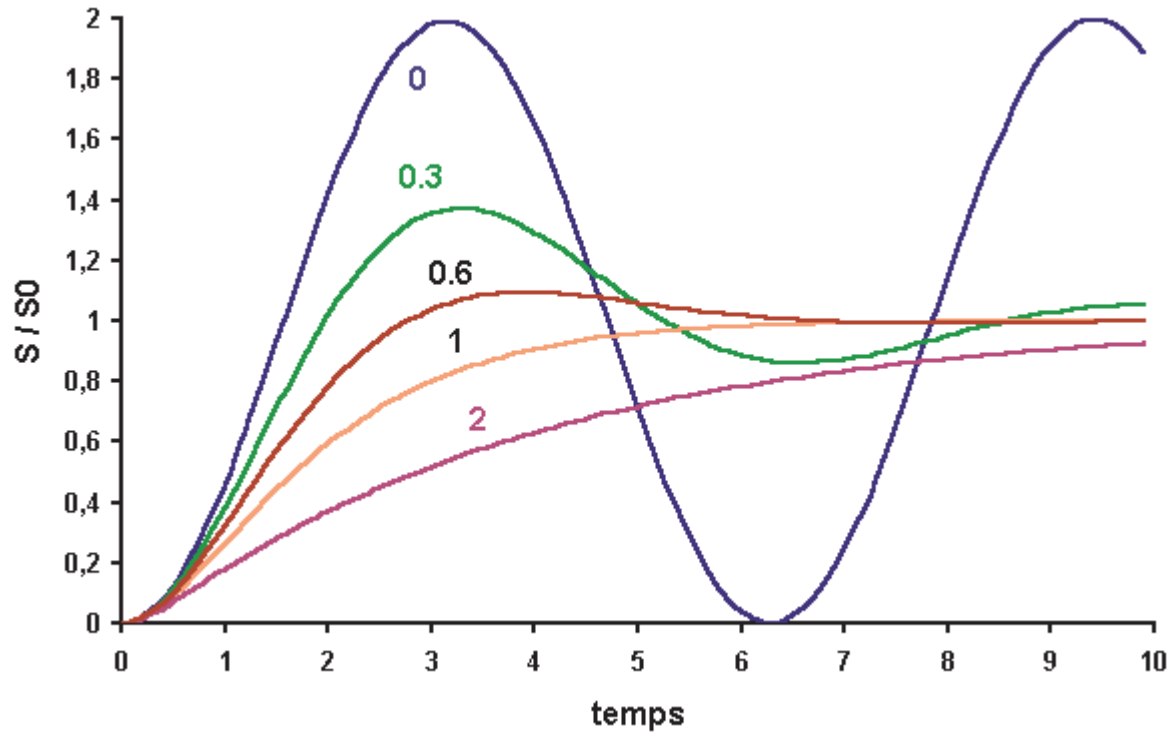
2)  $\zeta = 1$  Amortissement critique. La réponse du système a pour équation :

$$s(t) = s_0 [1 - (1 + \omega_0 t) \exp(-\omega_0 t)]$$

3)  $\zeta > 1$  Amortissement important. La réponse du système devient :

$$s(t) = s_0 \left[ \frac{R - \zeta}{2R} \langle \exp\{(R - \zeta)\omega_0 t\} - \exp\{-(R + \zeta)\omega_0 t\} \rangle + 1 \right]$$

Le coefficient d'amortissement pour obtenir un temps de réponse optimale est compris entre 0.6 et 0.7.



## IV - MESURE DE LA PRESSION

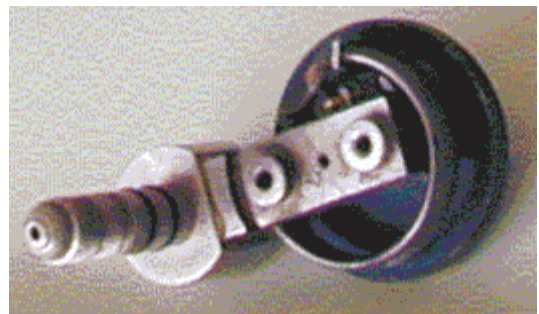
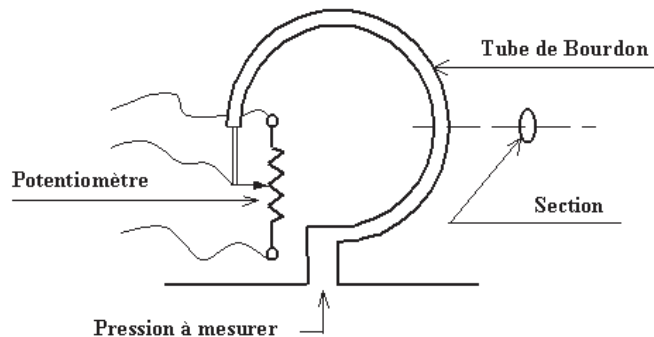
### IV - 1 - PRINCIPE

Dans les capteurs utilisés, l'effet de pression provoque la déformation d'une pièce mécanique généralement métallique. Cette déformation doit rester dans le domaine d'élasticité mécanique de la pièce. Le matériau qui la constitue doit présenter un minimum de rémanence et rester, le moins possible, sensible aux variations de température. Cette déformation mécanique est mesurée par un transducteur qui la traduit en variation d'une valeur électrique.

### IV - 2 - CAPTEUR DE PRESSION POTENTIOMETRIQUE

Quand l'intérieur d'un tube de bourdon est soumis à une pression supérieure à la pression ambiante, le tube se déforme ; Sa section s'arrondit ce qui tend à dérouler le tube (comme lorsque vous soufflez dans un mirliton !). Cette déformation est utilisée pour déplacer le curseur d'un potentiomètre linéaire aux bornes duquel une tension constante est appliquée. La tension recueillie entre le curseur et le point commun du montage varie proportionnellement avec la différence de pression qui existe entre le tube de bourdon et le milieu ambiant. Le transducteur ainsi constitué a l'inconvénient d'avoir précision limitée mais l'avantage d'avoir une réponse linéaire, d'être économique et de fournir un signal de sortie de niveau élevé sous faible impédance.

**Exemple :** Capteur de pression des courantmètres Aanderaa, précision  $\pm 1\%$  PE (de la pleine échelle, c. a. d. de l'étendue de mesure).



### REMARQUE :

L'unité de pression la plus utilisée par les fabricants de capteurs de pression est le PSI (Pound by Square Inch).  $1 \text{ PSI} = 6.8948 \cdot 10^3 \text{ Pascal}$ . Les océanographes utilisent surtout le decibar.

Autres unités de pression :

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ pascal} \approx 1 \text{ kg/cm}^2 \approx 1 \text{ atmosphère} \approx 10 \text{ m d'eau} \approx 75 \text{ mm de mercure}$ .

Lorsqu'un capteur de pression est monté sur un appareil immergé, il est possible de calculer la profondeur ou il se situe à partir des mesures de pression, température et salinité (voir en annexe).

### IV - 3 - CAPTEUR DE PRESSION A JAUGES DE CONTRAINTE

C'est la méthode la plus utilisée pour mesurer la pression. Bien que ces capteurs aient une faible sensibilité, ils sont robustes, relativement simples, possèdent d'excellentes caractéristiques de linéarité et d'hystérésis dans une grande gamme de température. Ils mesurent la différence entre la pression à mesurer appliquée au capteur et la pression interne du capteur. Comme généralement le vide est fait à l'intérieur du capteur celui-ci mesure la pression absolue qui lui est appliquée. La construction de ces capteurs dépend de la pression maximum qui leur est appliquée :

Pour une pression inférieure à 100 Kg/cm<sup>2</sup> deux jauges de contrainte mesurent la déformation (élastique bien sûr) d'un soufflet qui s'allonge ou d'un diaphragme qui se bombe en fonction de la pression appliquée entre l'extérieur et l'intérieur du capteur.

Dans le cas de pressions supérieures les deux jauges de contrainte mesurent la déformation de la paroi d'un tube dont l'intérieur est soumis à la pression à mesurer.

La résistance des deux jauges de contrainte varie en fonction de leur déformation et donc de la pression.

Deux autres jauges sont ajoutées dans le capteur de telle sorte qu'elles soient à la même température que les deux premières mais sans être soumises aux déformations dues à l'effet de pression. La résistance des 4 jauges varie également en fonction de la température. Un montage en pont permet d'obtenir la sommes des variations dues à la pression et d'annuler celles dues à l'effet de température. Il subsiste néanmoins une légère influence de la température qui peut être réduite, soit par un circuit électronique de compensation, soit en mesurant la température du capteur et en utilisant un algorithme de calcul de correction.

**Exemple :** transducteur utilisé sur les sondes BISSETT BERMAN.

PE (pleine échelle) : 100 Kg / cm<sup>2</sup> (soit à peu près 1000 m d'immersion).

Spécification : valeur du pont de résistance à pression atmosphérique 350 Ω.

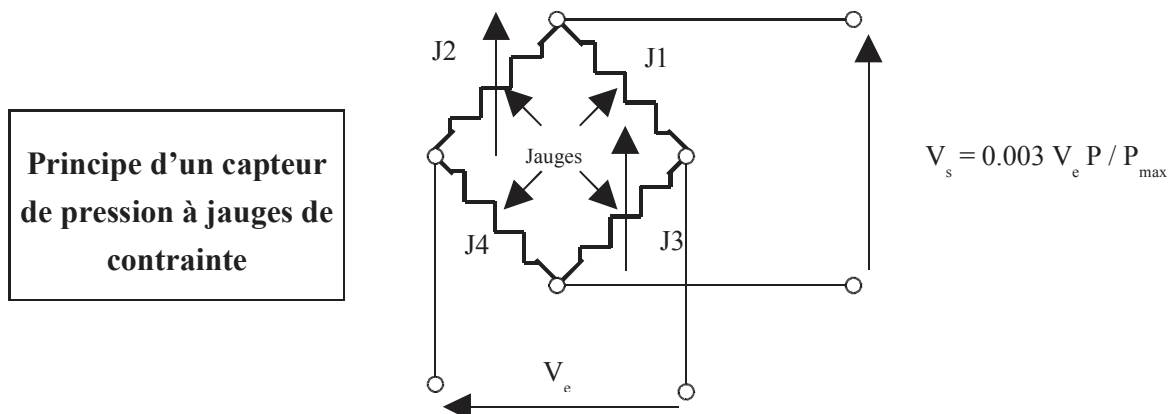
Sensibilité : 3 mV / V d'excitation ( $V_s = 0.003 P / PE$ ).

Erreur d'hystérésis et de non-linéarité : 0,03 % de la PE.

Effet de température pour P = 0 : 0,03 % de la PE par degré C.

Effet de température sur la sensibilité : 0,03 % de la PE par degré C.

Ces erreurs dues à l'effet de température peuvent être réduites par des circuits de compensation électronique. Il est ainsi possible d'obtenir des capteurs ayant une précision totale de 0,1 % PE.



#### IV - 4 - CAPTEUR DE PRESSION PIEZOELECTRIQUE

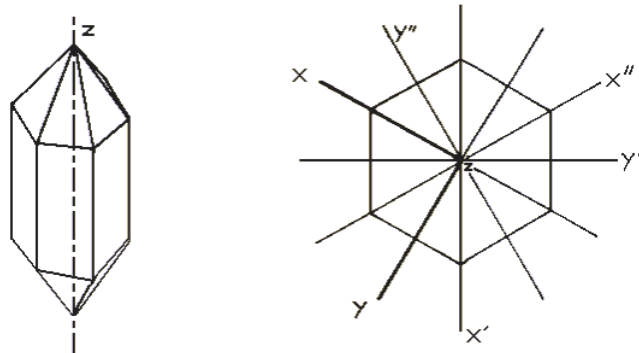
Un cristal de quartz est constitué de silice (Si O<sub>2</sub>). Il a une section hexagonale avec des extrémités prismatiques. Il présente une anisotropie suivant 3 axes (voir schéma ci-dessus) :

Les axes « x », « x' » et « x'' » qui sont les axes électriques,

les axes « y », « y' » et « y'' » qui sont les axes mécaniques,

l'axe « z » qui passe par les sommets de ses extrémités et qui est l'axe optique.

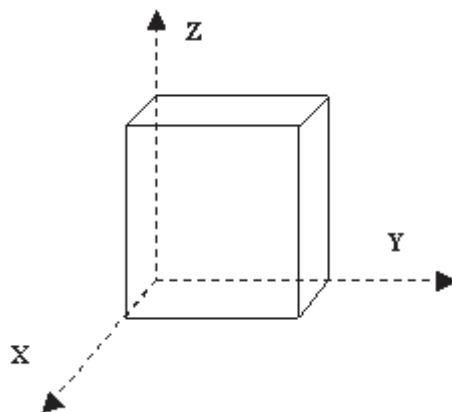
La lame de cristal est taillée suivant les axes qui privilégient la grandeur à mesurer (température, pression) ou, lorsqu'il sert d'horloge, suivant ceux dont il est le plus indépendant. Ses faces sont placées entre deux plaques conductrices.



CRISTAL DE QUARTZ

Par exemple si les faces de la lame sont perpendiculaires à l'axe X la coupe est dite coupe de Curie. Elle possède deux fréquences de résonance :

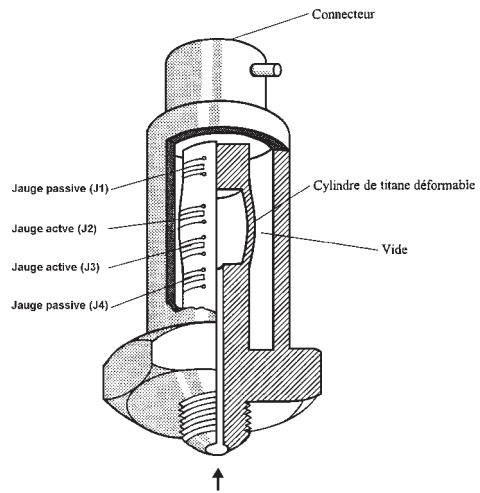
$F_1 = 2.86 \cdot 10^6 / e$       et       $F_2 = 2.86 \cdot 10^6 / \ell$       ou e est son épaisseur et  $\ell$  sa largeur en mètres.



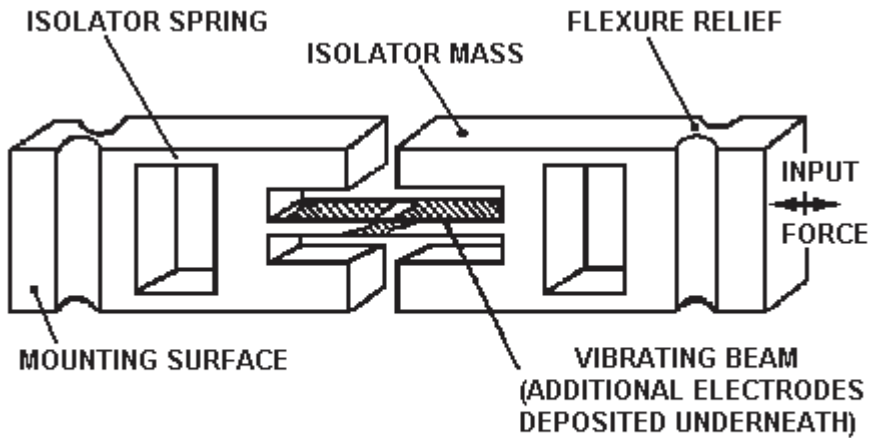
COUPE DE CURIE

Ce sont les plus précis. La pression à mesurer est appliquée à au résonateur en quartz d'un circuit oscillant. Les variations de la pression font varier la fréquence de résonance du circuit oscillant.

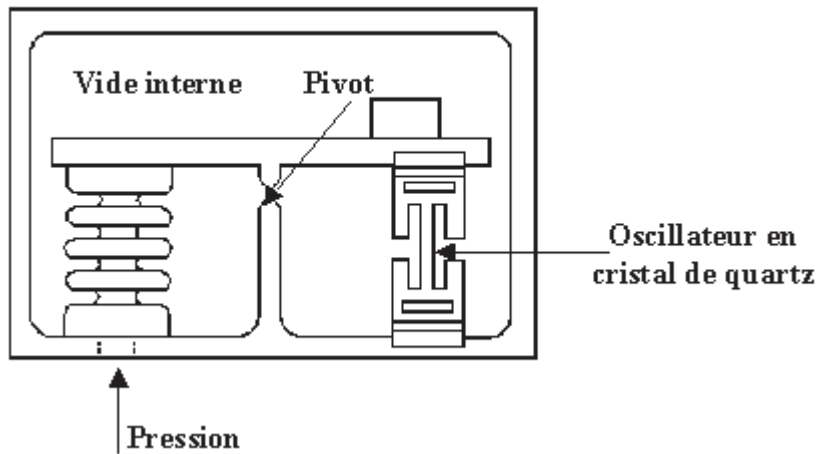




**Capteur de pression à jauges de contraintes**



**DETAIL D'UN CAPTEUR PIEZO ELECTRIQUE**



**CAPTEUR DE PRESSION PIEZOELECTRIQUE A SOUFFLET**

#### **IV - 5 - AUTRES CAPTEURS DE PRESSION**

D'autres capteurs de pression ont été ou peuvent être utilisés en océanographie physique :

Les capteurs de pression à corde vibrante (ou cylindre vibrant) ont une fréquence de résonance qui varie avec la pression. Ils ont l'avantage d'avoir un signal de sortie mesurable avec précision. Celle-ci ainsi que la linéarité sont cependant limitées. Leurs propriétés mécaniques et électriques varient avec la température. Ils ne sont plus (ou peu ?) utilisés. Mais ils ont été montés dans des marégraphes de grands fonds.

Les capteurs de pression à capacité variable : Ces capteurs ont l'avantage d'avoir une linéarité et une résolution excellentes ainsi qu'une très faible dérive dans le temps. Leurs principaux défauts sont d'être sensibles à la température et de nécessiter une électronique compliquée. A notre connaissance, ils ne sont pas utilisés actuellement en océanographie.

D'autres capteurs de pression pourraient être utilisés en milieu marin comme ceux dans lesquels la pièce métallique en se déformant sous l'effet de la pression fait varier l'induction entre deux bobines.

## V - MESURE DE LA TEMPERATURE

### V - 1 - THERMOMETRES A RENVERSEMENT

Les océanographes mesurent la température in situ à l'aide de thermomètres à renversement. Il en existe de deux types, les thermomètres protégés de l'effet de pression, à gauche sur la figure ci-après, et les thermomètres non protégés, à droite sur la figure.

Ils sont descendus avec les graduations à l'envers. Sur la figure nous remarquons qu'à l'intérieur des tubes de protection en forme d'éprouvette il y a deux thermomètres ; le plus petit est appelé le thermomètre auxiliaire, le plus grand thermomètre principal. A la base de ce dernier se situe son grand réservoir et dans sa partie supérieure son petit réservoir.

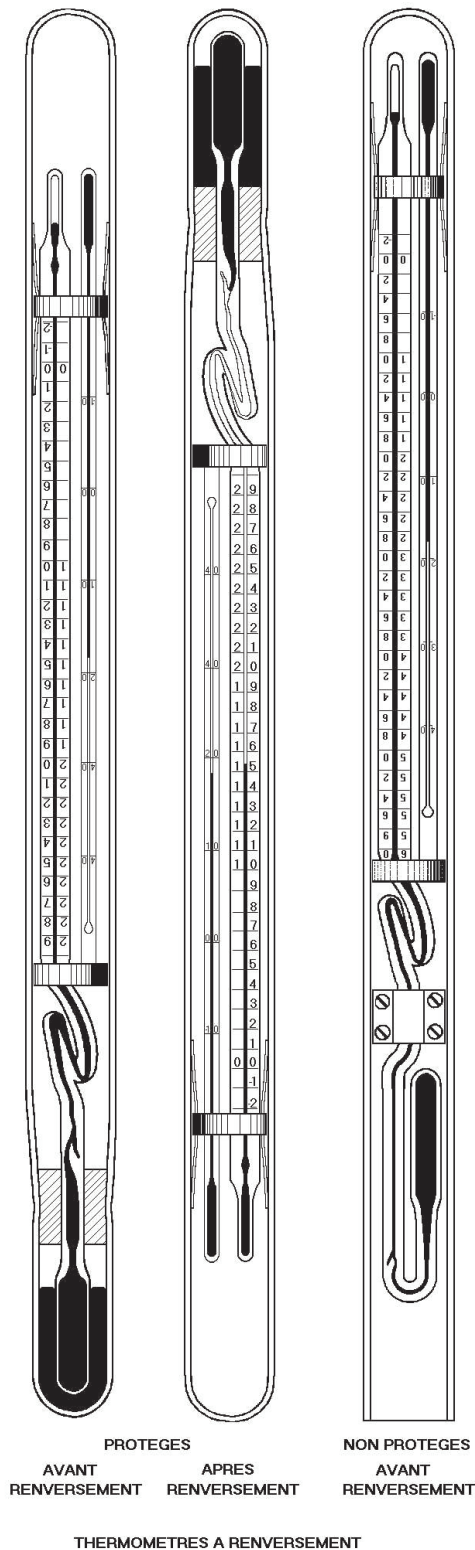
Le thermomètre protégé : Il est placé dans une épaisse enveloppe de verre étanche pour que la pression n'ait pas d'effet sur le thermomètre principal. Son grand réservoir trempe dans du mercure afin de faciliter ses échanges thermiques avec le milieu extérieur. En fonction de la température le mercure contenu dans le grand réservoir se dilate ou se contracte et il monte ou il descend dans le tube capillaire en fonction de la température. Il peut même commencer à remplir le petit réservoir situé en haut de ce tube. Lorsque le thermomètre a atteint depuis 10 minutes l'immersion où la température doit être mesurée, un système mécanique retourne le thermomètre. Nous remarquons, peu après la sortie du grand réservoir, que le capillaire devient très étroit et qu'il rencontre un appendice de section supérieure. Au moment du retournement le mercure contenu dans l'appendice se vide plus vite que celui qui tente de s'écouler du petit réservoir. Ceci provoque une rupture de la colonne de mercure. Le mercure venant d'être isolé s'écoule par gravité dans le réservoir secondaire et une partie reste dans le tube capillaire. Le niveau supérieur du mercure tombe en face d'une échelle graduée généralement en dixièmes de degrés Celsius.

Cette température est, aux corrections près, la température in situ.

Lors de la remontée, la température augmente et une certaine quantité de mercure sort du réservoir principal. Elle se trouve piégée dans une spirale et elle ne peut pas rejoindre le volume de mercure situé plus bas.

Une fois à bord il faut attendre que le thermomètre ait atteint la température ambiante pour faire sa lecture. Cette lecture s'effectue à l'aide d'une loupe (Le tube capillaire est suffisamment fin pour qu'il n'y ait pas de ménisque à la surface du mercure). Il est ainsi possible d'estimer le centième de degré. La température est corrigée en fonction de l'étalonnage du thermomètre (au moins annuel). La lecture s'effectue à la température indiquée par le thermomètre auxiliaire qui est lu au dixième de degré (voir au centre de la figure sur le thermomètre de gauche qui indique environ 18,0° C). Comme cette température est différente de celle qui règne in situ, le volume du mercure isolé dans la partie inférieure du thermomètre principal a varié. Cette variation sera corrigée en tenant compte du volume de mercure et des coefficients de dilatation du mercure et du verre. Afin d'éviter les erreurs de lecture, plusieurs personnes lisent les valeurs de chaque thermomètre principal et auxiliaire. Elles sont consignées dans un cahier par une tierce personne. Ensuite les thermomètres sont retournés. Le mercure descend et le thermomètre peut être à nouveau descendu. Les thermomètres sont installés sur des bouteilles de prélèvement. Il peut y avoir deux thermomètres protégés et un non protégé sur une même bouteille.

Le thermomètre non protégé : Le thermomètre non protégé est descendu avec son ouverture vers le bas (à droite sur la figure). La pression qui s'exerce sur son réservoir principal fait monter la quantité de mercure dans le capillaire et dans le réservoir auxiliaire. Au moment de son renversement il indique une température trop élevée d'environ 0.01°C par mètre d'immersion. Après lecture correction et comparaison avec la température fournie par le thermomètre protégé il est possible d'obtenir la pression à laquelle est effectuée la mesure.



Actuellement les thermomètres à renversement ont tendance à être remplacés par des appareils électroniques à affichage numérique de même taille. Il en existe deux types, les thermomètres proprement dit et les pressiomètres (voir photo ci-dessus).

De gauche à droite sur la figure ci-dessus nous voyons :

Un thermomètre à renversement protégé,  
 Un thermomètre à renversement électronique,  
 Un aimant qui permet la programmation et la lecture des appareils électroniques,  
 Un pressiomètre électronique.

## V - 2 - CAPTEUR DE TEMPERATURE A THERMISTANCE

Les thermistances sont souvent utilisées en océanographie pour mesurer la température.

Principe des thermistances :

Elles sont obtenues par frittage à haute température de poudre d'oxyde métallique ( Fe, Ni, Mn, V, Ti). Leur résistance varie à l'inverse de la température suivant la loi théorique :

$$R_T = R_0 \exp \left\{ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}$$

$R_T$  : Résistance à la température absolue T.

B : « Constante » comprise entre 2000 à 9000 °K, suivant les thermistances.  
(B varie généralement un peu avec la température)

$R_0$  : Résistance à la température absolue  $T_0$  (en degrés K).

$T_0$  : Température absolue à laquelle  $R_0$  a été mesuré, généralement  $T_0 = 273.16^\circ\text{K}$ .

Le courant passant dans la thermistance doit être le plus faible possible afin de ne pas augmenter sa température par effet joule. La puissance dissipée est de l'ordre du micro Watt, voir inférieure. Parfois ce courant ne passe dans la thermistance qu'au moment de la mesure.

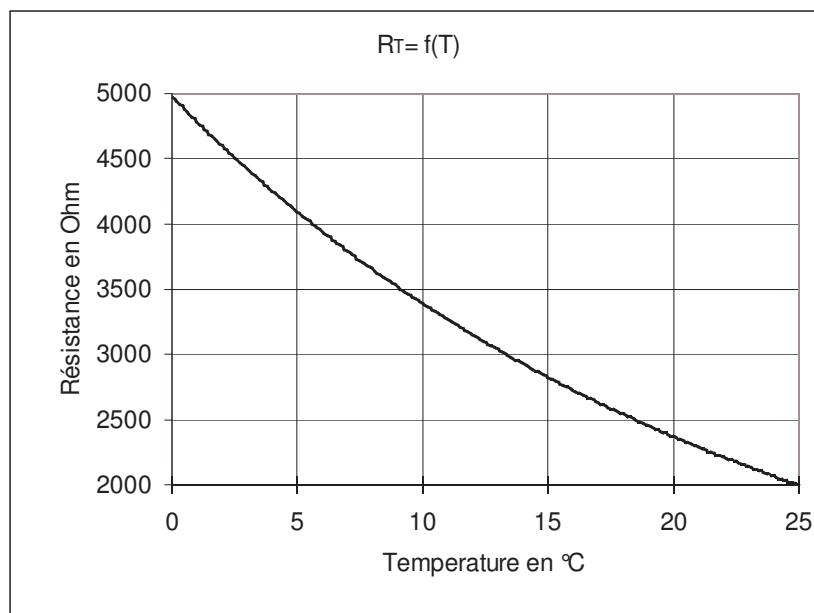
Il est difficile d'obtenir des thermistances ayant les mêmes caractéristiques. Lorsqu'une thermistance est soumise à une pression sa résistance diminue. Il faut donc les isoler mécaniquement de la pression. Par faibles profondeurs (inférieures à 100 m) elles sont noyées dans une perle de verre ; pour des profondeurs plus importantes, elles seront protégées par un cylindre d'inox. Ces protections ont l'inconvénient d'augmenter leurs temps de réponse.

Exemple de thermistance : chaîne de thermistances AANDERRAA.

Ecart par rapport à la loi moyenne  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ .

Résolution possible après étalonnage de chaque thermistance  $\pm 0,03^\circ\text{C}$ .

Constante de temps 12 s ; Coefficient B  $\cong 2966.1^\circ\text{K}$



**Variation de la valeur d'une thermistance en fonction de la température**

### V - 3 - LINEARISATION D'UN CAPTEUR A THERMISTANCE

Afin d'obtenir une tension de sortie S qui varie quasi linéairement avec la température, il faut réaliser un montage diviseur en plaçant une résistance R1 en série avec la thermistance (voir schéma ci-dessous). La tension de sortie aux bornes de R1 s'exprime :

$$S = V \frac{R_1}{R_1 + R_T} \quad (1) \quad \text{avec} \quad R_T = R_0 \exp[B(1/T - 1/T_0)] \quad (2)$$

(2) peut encore s'écrire :

$$R_T = R_e \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad \text{avec} \quad R_e = R_0 \exp\left(-\frac{B}{T_0}\right)$$

$$f = \frac{S}{V} = \frac{R_1}{R_1 + R_T}$$

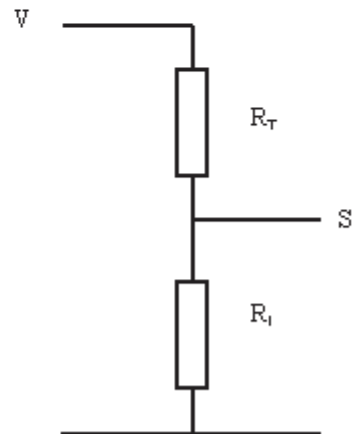
$$f' = -\frac{R_1}{(R_1 + R_T)^2} \frac{dR_T}{dT}$$

$$f'' = \frac{2R_1}{(R_1 + R_T)^3} \left(\frac{dR_T}{dT}\right)^2 - \frac{R_1}{(R_1 + R_T)^2} \frac{d^2R_T}{dT^2}$$

$$\frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2} R_e \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$

$$\frac{d^2R_T}{dT^2} = \frac{2B}{T^3} R_e \exp\left(\frac{B}{T}\right) + \frac{B^2}{T^4} R_e \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$

$$\frac{d^2R_T}{dT^2} = \frac{B}{T^4} (B + 2T) R_e \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$



Nous voulons obtenir une tension de sortie qui varie presque linéairement avec la température de part et d'autre d'une température moyenne  $T_m$ . Pour cette température  $T_m$  la valeur de la thermistance est :

$$R_m = R_e \exp\left(\frac{B}{T_m}\right) \quad \text{D'où :} \quad \frac{dR_T}{dT} = \frac{B}{T_m^2} R_m$$

$$\frac{d^2R_T}{dT^2} = \frac{B}{T_m^4} R_m (B + 2T_m)$$

$$f'' = \frac{2R_1}{(R_1 + R_m)^3} \frac{B^2}{T_m^4} R_m^2 - \frac{R_1}{(R_1 + R_m)^2} \frac{B}{T_m^4} R_m (B + 2T_m)$$

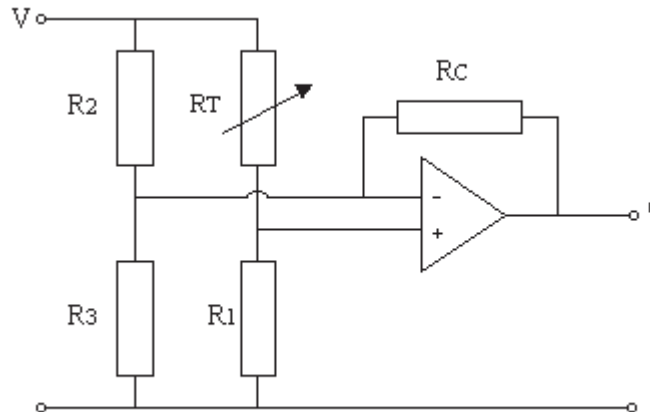
Cette dérivée seconde s'annule (point d'inflexion) et la tension de sortie est alors quasi proportionnelle à la température pour :

$$2R_1 B^2 R_m^2 - R_1 B R_m (B + 2T_m)(R_1 + R_m) = 0$$

La valeur optimale de la résistance R qu'il faut placer en série avec la thermistance a pour valeur :

$$R_1 = R_m \frac{B - 2T_m}{B + 2T_m} \quad (3)$$

Nous rappelons que :  $T_m$  est la température au milieu de la plage de mesure,  
 $R_m$  la valeur de la thermistance à la température  $T_m$ .



Exemple de linéarisation :

Sur la courbe précédente qui donne la variation de la résistance d'une thermistance nous voyons qu'à :  $0^\circ\text{C}$ ,  $R_0 = 5000 \Omega$  et à  $25^\circ\text{C}$ ,  $R_{25} = 2000 \Omega$

D'où nous déduisons :

$$B = \frac{\ln \frac{R_{25}}{R_0}}{\frac{1}{T_{25}} - \frac{1}{T_0}} = 2981.8 \text{ }^\circ\text{K}$$

Admettons que notre capteur doit mesurer des températures entre  $-5^\circ\text{C}$  et  $15^\circ\text{C}$ . Nous en déduisons que la température moyenne doit être :  $T_m = (-5 + 15) / 2 = 5^\circ\text{C}$ , soit en degrés K :

$$T_m = 5 + 273.16 = 278.15 \text{ }^\circ\text{K}$$

Puis à l'aide de (2) nous trouvons :  $R_m = 4108.3 \Omega$  d'où en utilisant (3) :  $R_1 = 2818 \Omega$

Pour avoir une tension nulle à la sortie de l'amplificateur lorsque la température est de  $0^\circ\text{C}$ , il faut que :

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{R_0}{R_1}$$

Une fois les valeurs de  $R_2$  et de  $R_3$  choisies il reste à calculer la valeur de contre-réaction  $R_c$  afin d'obtenir, en ajustant le gain de l'amplificateur A, la tension de sortie "e" souhaitée

$$A = \frac{R_c (R_2 + R_3)}{R_2 R_3}$$



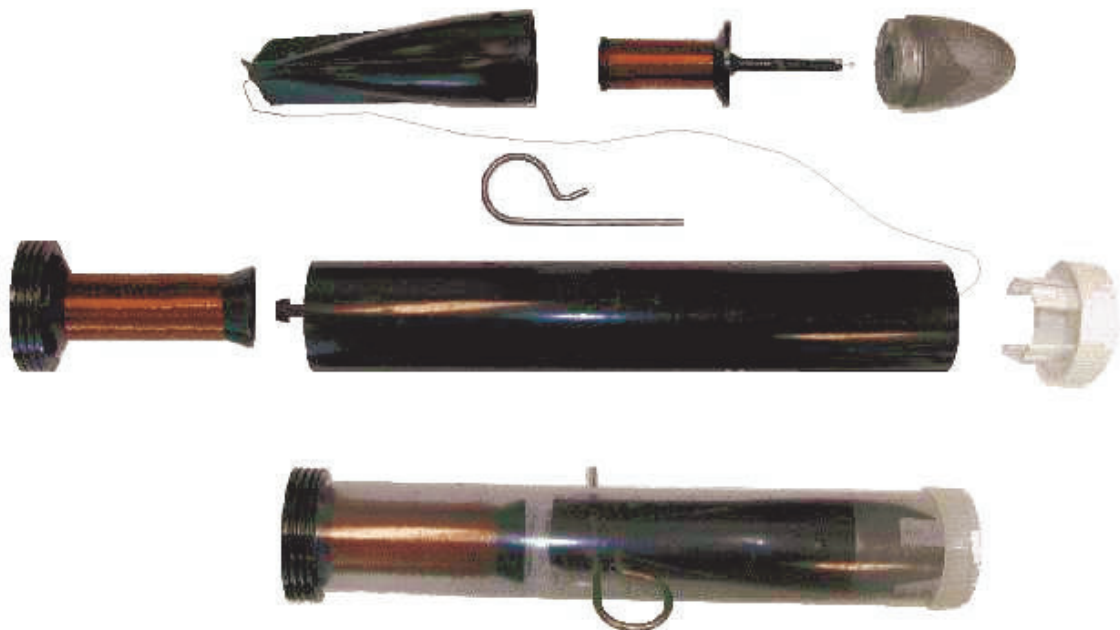
#### V – 4 - BATHYTHERMOGRAPHE PERDABLE



Le bathythermographe perdable fabriqué par Sippican Ocean Systems est un exemple classique d'utilisation d'une thermistance comme capteur de température. Il est couramment appelé XBT pour eXpandable BatyThermographe.

Un XBT se présente sous la forme d'une douille en matière plastique plus ou moins longue suivant les modèles (35 cm pour le modèle T7). Elle contient une bobine et une sonde profilée perdable. La douille est placée dans un lanceur qui a la forme d'un pistolet. Il est relié à un PC par un câble électrique.

En armant ce lanceur à l'aide de son levier, 3 pointes viennent en contact avec 3 plots de la douille, ce qui assure sa liaison électrique avec un PC. Ces plots sont reliés par un fil bi-conducteur à une thermistance située à l'avant de la sonde, au centre d'un lest. Pour lancer la sonde il faut placer le lanceur au-dessus de l'eau, à l'arrière du navire qui fait route, du côté sous le vent, enlever le bouchon qui obture la douille et retirer la goupille. La sonde tombe puis descend dans l'eau en dévidant le fil bi-conducteur de la bobine située à l'intérieur de son carénage. Simultanément le navire qui s'éloigne du point de largage dévide le fil enroulé sur la bobine de la douille. Il n'y a donc pas de tension dans le fil conducteur. L'enregistrement commence à l'instant où la sonde touche la surface. Comme la vitesse de descente de la sonde est à peu près constante, le temps écoulé depuis le largage fournit la profondeur et la thermistance donne la température. Lorsqu'il n'y a plus de fil sur l'une des deux bobines il casse et la sonde est perdue. La précision pour un XBT T7 est de 0.2°C en température avec une résolution de 0.01°C et de 2% sur l'immersion maximale avec une résolution de 0.65 m. L'immersion maximum est de 900 m si la vitesse du navire est inférieure à 12.5 nœuds.



**Sondes XBT : En haut éclaté d'une douille avec sa sonde, en bas ensemble monté.**



### V - 3 - CAPTEUR DE TEMPERATURE A FIL METALLIQUE

Le platine est un métal noble qui reste plus ou moins indifférent à son environnement. Il se travaille facilement, et s'obtient avec une grande pureté. Il permet la réalisation de transducteurs très stables et facilement reproductibles se présentant sous la forme d'une résistance parfois bobinée en fil de platine. Cette résistance est de l'ordre de la centaine d'Ohms. Les fils sont recuit afin d'obtenir des coefficients de température identiques et stables dans le temps. L'effet de pression sur le fil de platine diminue sa résistance, aussi doit-il être protégé de cet effet. Il est en placé dans un tube métallique, souvent en acier inoxydable. La conduction thermique et l'isolement électrique entre le tube et la résistance sont assurés par de la graisse au silicone. Une petite bulle dans cette graisse évite que les variations de forme du tube aient un effet sur la résistance. L'isolement électrique est amélioré en intercalant une mince enveloppe de verre entre le tube inoxydable et la graisse. Le tube inoxydable sera aussi fin que possible, le volume du verre, de la graisse au silicone et du fil de platine seront les plus faibles possibles afin de réduire la masse calorifique du capteur et donc sa constante de temps.

#### Exemple 1 :

Capteur de température Pt 100 (symbole non standard).

Résistance en platine, 100Ω à 0°C selon Normes françaises NF C-42-330 :

Plage d'utilisation : -200 à +850°C

Classe de précision : Classe A  $\pm[(0.15^\circ\text{C} + 0.002 T (^\circ\text{C}^\circ))]$ , Classe B  $[\pm 0.30^\circ\text{C} + 0.005 T (^\circ\text{C}^\circ)]$

Polynôme d'interpolation :

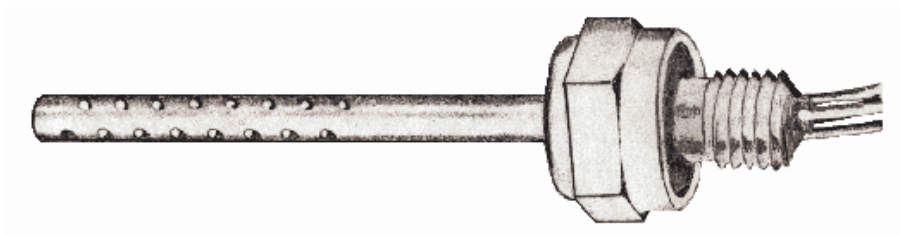
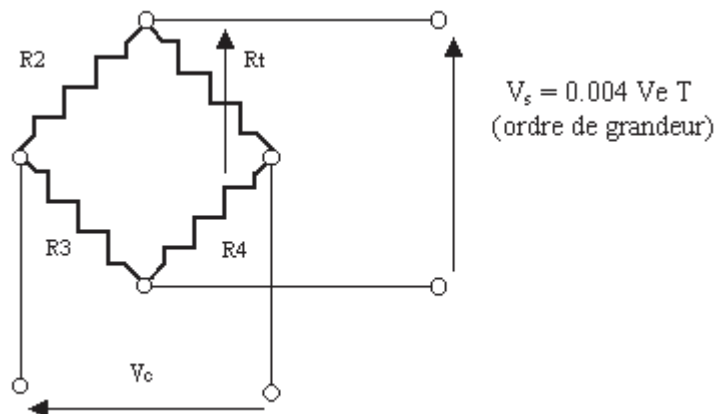
$$R_T = R_{0^\circ\text{C}}[1 + A.T + B.T^2 + C(T - 100)T^3]$$

$$A = 0.00385 \quad B = 3.90802 \cdot 10^{-3} \quad C = 0$$

#### Exemple 2 :

Thermomètre Rosemount utilisé sur les sondes Plessey ; Constante de temps : 310 ms.

Immersion maximum : 2000 m ;  $R_t \cong R_4 \cong 100 \Omega$



**Capteur de température ROSEMONT model 171 BJ**200  $\Omega$  à 20°C, 185.3  $\Omega$  à 0°C, temps de réponse 250 ms

Il est également possible d'utiliser des résistances bobinées en fil de cuivre. Elles permettent de réaliser des montages ayant une réponse linéaire dans le domaine des températures qui intéresse l'océanographie ( $\pm 0,01^\circ\text{C}$  de  $-2^\circ\text{C}$  à  $30^\circ\text{C}$ ).

**Exemple 3 :**

Capteur de température des sondes GUILDINE (CANADA)

Constante de temps = 0,2 s  
 Précision = 0,01  $^\circ\text{C}$  de  $-2$  à  $20^\circ\text{C}$   
 Dérive par un an inférieur à 0,01 $^\circ\text{C}$   
 R à  $0^\circ\text{C} + 46,6 \Omega$

**REMARQUES :**

- Il est possible d'associer, à l'aide d'un montage électronique, les qualités des capteurs de température ayant un très faible temps de réponse, comme les thermocouples<sup>(1)</sup> ou les thermistances<sup>(2)</sup>, avec des capteurs très précis à fil métallique (voir en VI - 5.3).
- Les coefficients B du Ni et du Pt étant de signe contraire il est possible de réaliser un capteur de température (Pt 92 %, Ni 8 %) ayant un coefficient B nul.

$$R = R_0 (1 + CT)$$

Lorsqu'un capteur de température constitué d'un fil d'un tel alliage est parcouru par un courant constant, la tension à ses extrémités est presque directement proportionnelle à la température.

---

<sup>(1)</sup> sonde série 8700 GUILDINE (constante de temps = 50 ms ou 5ms)

<sup>(2)</sup> sonde NEIL BROWN (constante de temps = 25 ms)

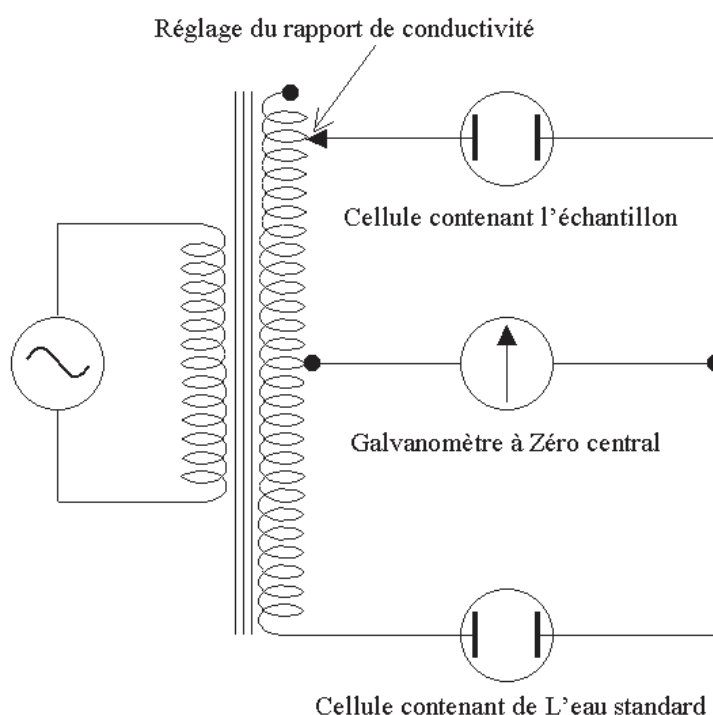
## VI - MESURE DE LA CONDUCTIVITE

La mesure de la conductivité, de la température et de la pression permet de calculer la salinité et de la masse volumique de l'eau de mer ainsi que la célérité du son in situ.

### VI - 1 - CAPTEUR DE CONDUCTIVITE A ELECTRODES

Il existe des capteurs à 2, 3, 4 et même 6 électrodes.

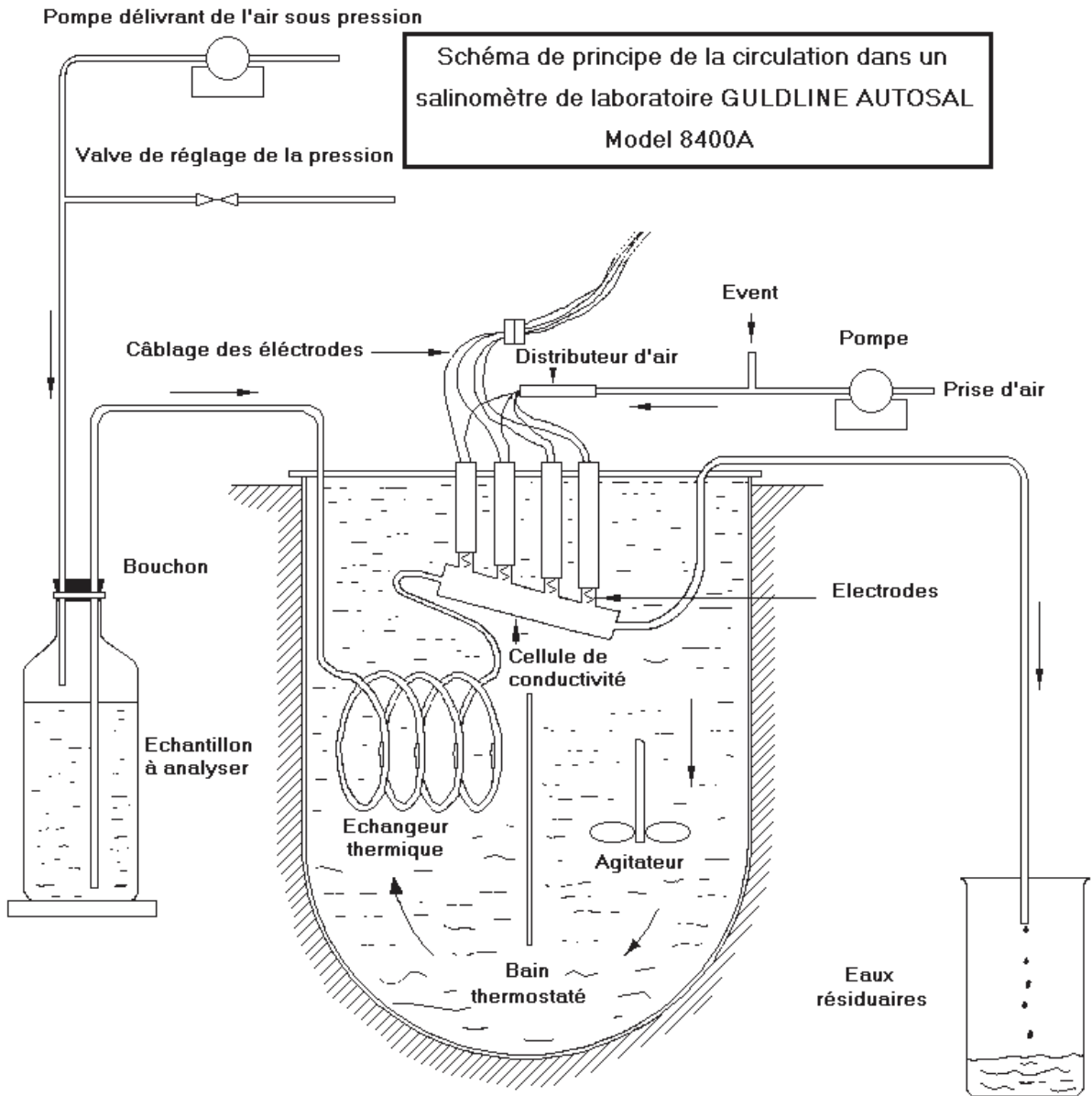
Dans les salinomètres de laboratoire, ces capteurs permettent de mesurer le rapport de conductivité entre de l'eau de mer standard et l'échantillon à analyser à une température connue. Afin d'éviter la polarisation des électrodes, la mesure se fait en courant alternatif.



#### Exemple 1 : Principe d'un des premiers salinomètres à électrodes.

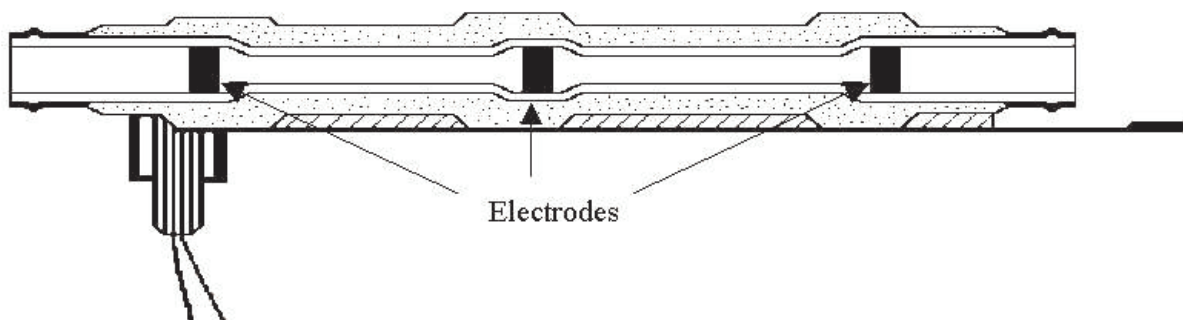
Les premiers salinomètres de laboratoire ont utilisé des capteurs de conductivité à électrodes. Le principe d'un appareil fabriqué à partir de 1958 est représenté sur le schéma ci-dessus. Il se présente sous la forme d'un pont alimenté en courant alternatif. Deux de ses branches sont constituées par les enroulements d'un transformateur, les deux autres par des cellules qui baignent dans un bain thermostaté à 15 (ou 20) degrés Celsius. Une paire d'électrodes est immergée dans chaque cellule. Un agitateur maintient l'homogénéité de chaque échantillon. Une des cellules est remplie avec de l'eau standard, l'autre avec l'eau à analyser. L'équilibre du pont est recherché en faisant varier la tension aux bornes d'une des branches du transformateur. Le système qui permet ce réglage indique directement le rapport de conductivité.

Par la suite dans les salinomètres plus récents, la conductance de la cellule contenant de l'eau standard est remplacée par un réseau de composants ayant une même conductance.



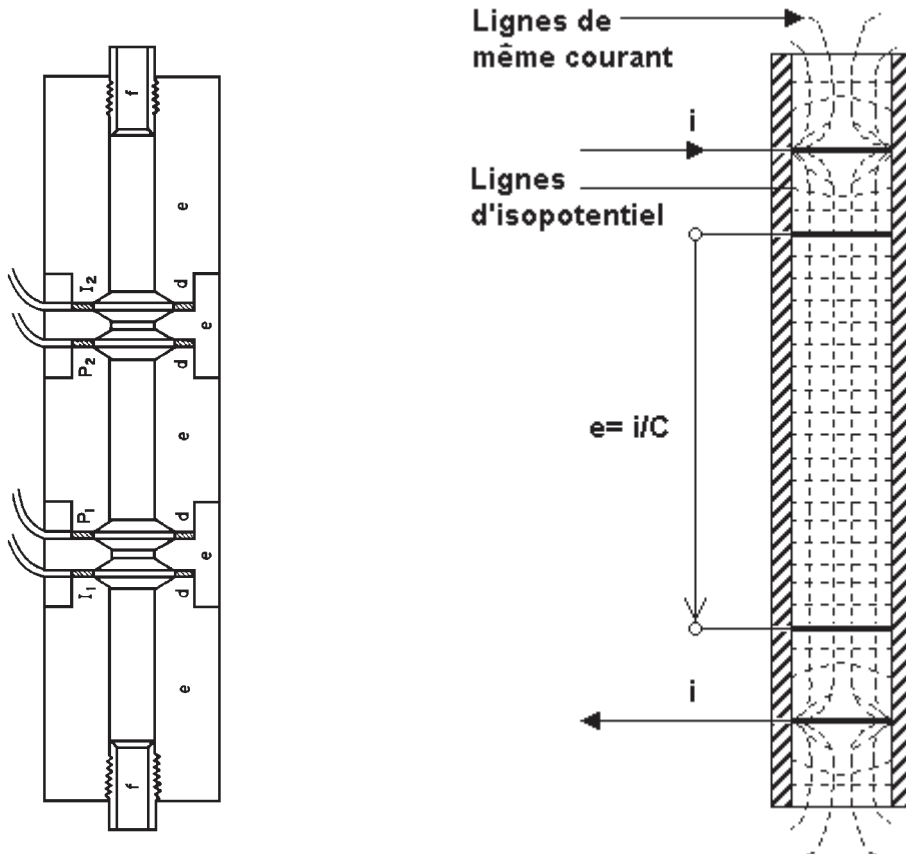
**Exemple 2 :** Capteur de conductivité à électrodes du salinomètre GUILDLINE 8400A.

Dans le salinomètre de laboratoire GUILDLINE AUTOSAL model 8400A la cellule de mesure a 4 électrodes de platine. Les 2 électrodes les plus à l'extérieur induisent un courant alternatif dans la cellule, les deux autres permettent la mesure de la conductivité. La précision de cet appareil est supérieure à 0,003 PSU et la stabilité égale à 0,001 PSU/24h.



### Exemple 3 : Capteur de conductivité à électrodes SEABIRD.

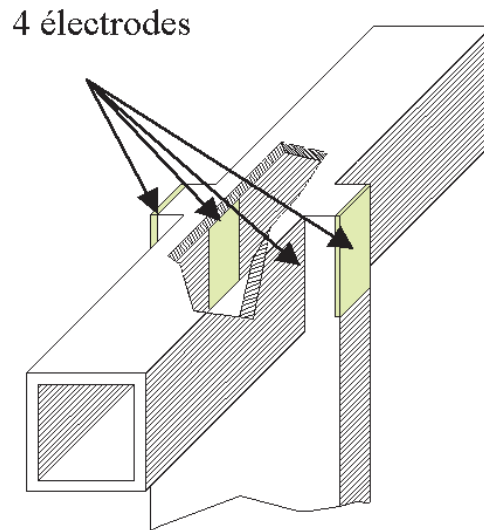
La cellule est constituée d'un tube de quartz dans lequel sont placées 3 électrodes annulaires en platine passivé. Les électrodes proches des extrémités du tube sont connectées l'une à l'autre. La conductance entre l'électrode centrale et les 2 autres est montée dans un circuit oscillant dont la fréquence varie en fonction de cette conductance et donc de la conductivité de l'eau de mer. Comme les deux électrodes extrêmes sont au même potentiel, aucun courant électrique ne circule à l'extérieur de la cellule. Par conséquent ce qui se passe à l'extérieur n'a pas d'influence sur la mesure.



### Exemple 4 : Capteur de conductivité à électrodes GUILDLINE.

La cellule de conductivité Guildline est constituée d'un tube de pyrex long de 20 cm et d'un diamètre de 1 cm. Quatre électrodes annulaires en platine passivé sont placées à l'intérieur du tube. Elles sont, placées dans des gorges circulaires en V. Comme dans le salinomètre GUILDLINE les 2 électrodes les plus à l'extérieur induisent un courant alternatif. Les plans d'iso potentiel se trouvent perpendiculaires à l'axe du tube au niveau des 2 autres électrodes qui mesurent la conductivité.

La résistance de la cellule est réglée à  $100 \Omega$  pour  $t = 0^\circ\text{C}$  ;  $p = 0$  ;  $S = 35 \text{ cm}^2$  en agissant sur les 2 bagues filetées vissées aux extrémités de la cellule.



### Exemple 5 : Capteur de conductivité à électrodes NEIL BROWN

Le capteur de conductivité présenté ici a été conçu par Neil Brown, un ingénieur américain, qui a réalisé de nombreux appareils de mesure utilisés en océanographie. Un des documents qu'il a publiés sur la mesure de la salinité est joint en annexe. Une sonde, mise au point par NEIL BROWN donne, à partir d'une cellule de conductivité ci-contre, la salinité à  $\pm 0,003$  PSU, avec une probabilité de 96%.

Elle est réalisée en céramique. Ses dimensions sont réduites afin d'obtenir un bon échantillonnage. La longueur du tube est de 30 mm et sa section interne est un carré de 4 mm de côté. Deux électrodes sont placées à l'intérieur du tube et deux autres à l'extérieur.

Un courant alternatif circule entre une électrode interne et une électrode externe. Comme dans le cas précédent, la conductance est déduite de la tension entre les deux autres électrodes. Au niveau de ces électrodes, le courant est faible et il n'y a pratiquement pas de gradient de tension.

#### REMARQUES :

Calcul de la masse volumique de l'eau de mer :

Il n'existe pas de capteur permettant d'obtenir la masse volumique (ou la densité) de l'eau de mer avec une précision suffisante. Elle est donc calculée à partir de la salinité, de la température et de la pression (voir méthode de calcul en annexe) :

$$\rho = f(S, t, p)$$

Afin de simplifier l'écriture des valeurs de la masse volumique de l'eau de mer, les océanographes utilisent un terme appelé « anomalie de masse volumique » et qui est défini comme étant :

$$\sigma = \rho - 1000$$

## VI - 2 - CAPTEUR DE CONDUCTIVITE A INDUCTION MAGNETIQUE

Ils sont constitués de deux transformateurs toroïdaux superposés, couplés entre eux par une simple spire conductrice formée par l'eau de mer. La tension alternative appliquée à la bobine d'un des transformateurs induit, dans la spire d'eau de mer, un courant proportionnel à sa conductivité. Ce courant crée une force magnétomotrice dans le second transformateur qui induit aux bornes de son enroulement une tension proportionnelle à la conductivité.

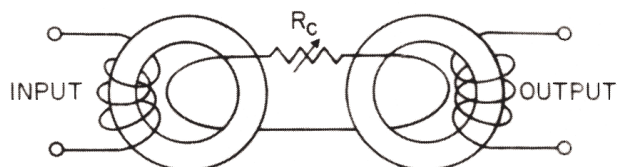
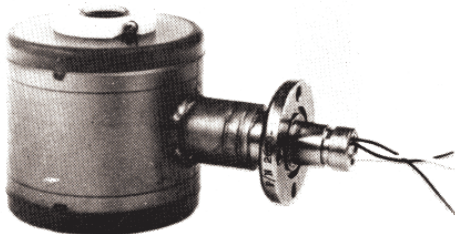
Ce type de capteur fonctionne dans la gamme des audio fréquences qui permettent d'obtenir un fonctionnement optimal.

**Exemple :** Salinomètre de laboratoire à induction BISSET BERMAN.

Dans ce modèle les transformateurs coaxiaux, moulés dans du plastique, sont placés à l'intérieur d'un récipient en plexiglas. Celui-ci peut se remplir à l'aide d'une pompe et se vider par gravité. Un agitateur monté à sa partie supérieure doit fonctionner pendant les mesures. La conductance de l'échantillon à mesurer se trouve dans une branche d'un pont déphaseur. Deux autres branches de ce pont sont constituées par des résistances étalons que l'on peut faire varier à l'aide de 2 groupes de commutateurs à plots. Un premier groupe permet d'afficher le rapport de conductivité, alors que le second groupe est utilisé pour "tarer" l'appareil à l'aide d'une eau de conductivité connue. Un galvanomètre à 0 central permet de rechercher l'équilibre du pont. En appuyant sur un bouton, ce même galvanomètre affiche la température de l'échantillon au moment de la mesure. Pour des températures différentes de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  entre l'eau standard et l'eau de l'échantillon, la compensation de l'effet de température sur le rapport de conductivité est corrigée automatiquement. Mais il est nécessaire de repérer la température, car les formules ou les tables utilisées, pour calculer la salinité, sont établies pour des rapports de conductivité mesurés soit à  $15^{\circ}\text{C}$ , soit à  $20^{\circ}\text{C}$ .

Les capteurs de conductivité mesurent une conductance, elle-même fonction de la forme géométrique des éléments. Ces capteurs sont sensibles aux bulles d'air, aux salissures et aux matériaux en suspension. Lorsqu'ils sont montés sur une sonde in situ, les 2 transformateurs toroïdaux sont protégés de leur environnement par un boîtier d'acier inoxydable recouvert de polyuréthane. Les vides sont comblés par de l'huile permettant de maintenir le capteur en équipression à l'aide d'un système adéquat. Un tube de pyrex est placé au centre du capteur. Il maintient la stabilité de la géométrie du capteur.

**Exemple :** Capteur de conductivité PLESSEY - Model 60/5 - Précision :  $\pm 0,03 \text{ mS/cm}$ .





## VII - MESURE DE LA SALINITE

### VII - 1 - DEFINITION

*La salinité est le poids en grammes de résidu solide contenu dans un kilogramme d'eau de mer quand tous les carbonates ont été transformés en oxydes, le brome et l'iode remplacés par le chlore, et que toute la matière organique a été complètement oxydée.*

Cette détermination étant difficile à réaliser, une méthode plus simple a été recherchée.

### VII - 2 - HISTORIQUE

Dittmar a analysé 77 échantillons d'eau de mer prélevés par le Challenger pendant son tour du monde (1873-1876). Il en a déduit en 1884 une loi, dite loi de Dittmar :

*Dans l'eau de mer, quelle que soit la salinité, à condition qu'elle ne soit pas trop faible, les proportions relatives des principaux constituants sont pratiquement constantes et le dosage de l'un d'eux donne la teneur des autres et aussi la salinité.*

En 1903 Knudsen a mis au point une méthode chimique pour mesurer la salinité et la densité. La salinité (S) est, d'après la loi de Dittmar, proportionnelle à la chlorinité (Cl). Nous considérons actuellement que :

$$S = 1.806655 Cl$$

La chlorinité est déterminée en précipitant les halogènes par du nitrate d'argent. Le dosage se fait en valeur relative par rapport à une eau de référence. Cette eau, dite « eau standard », est préparée par le Laboratoire Hydrographique de Copenhague. Sa chlorinité est proche de 19,381 g/kg qui correspond à une salinité de 35 g/kg.

Après avoir remarqué qu'à pression atmosphérique la conductivité de l'eau de mer variait avec la salinité et la température, en 1930 Frank Wenner conçoit les premiers salinomètres de laboratoire. Ils mesurent le rapport entre la conductivité de l'eau standard et de l'eau à analyser à une même température connue (15°C). Depuis, la mesure de la salinité S se fait toujours en calculant d'abord ce rapport de conductivité  $R_{15}$ . Dans le cas de mesures obtenues avec des capteurs de conductivité, une correction doit être apportée en fonction de la température t et, éventuellement, de la pression p. La salinité S est donc une fonction du rapport de conductivité  $R^{(1)}$ , de la température t et de la pression p :

$$S = f(R, t, p)$$

La conductivité est l'inverse de la résistivité. La conductivité de l'eau de mer est :

$$C = 42.914 R \quad (C \text{ est en milli-Siemens par cm})$$

La conductance a pour unité le Siemens (S) qui remplace le Mho, la conductivité le Siemens par mètre (S/m) ou le Mho par mètre. En océanographie nous utilisons surtout le milli-Siemens par centimètre (mS/cm) ou le milli-Mho par centimètre. La conductivité augmente avec la salinité, la température et la pression. Il en est de même pour le rapport de conductivité.

Une salinité de 35.5 g/kg d'eau de mer peut s'écrire 35.5 ppm (**partie par mille**), 35.5 ppt (**part per thousand**), 35.5 ‰, 35.5 PSU (**Practical Salinity Unit**) ou simplement 35.5.

<sup>(1)</sup> **REMARQUE** : Attention, ici R est un rapport de conductivité et non une résistance !



## VIII - CALCUL DE LA SALINITE

### VIII - 1 - DEFINITION DE LA SALINITE

*La salinité est le poids en grammes de résidu solide contenu dans un kilogramme d'eau de mer quand tous les carbonates ont été transformés en oxydes, le brome et l'iode remplacés par le chlore, et que toute la matière organique a été complètement oxydée.*

Cette détermination étant difficile à réaliser, on a cherché une méthode plus facile.

### VIII - 2 - HISTORIQUE

Dittmar a analysé 77 échantillons d'eau de mer prélevés par le Challenger pendant son tour du monde. Il en a déduit en 1884 la loi suivante, dite loi de Dittmar :

*Dans l'eau de mer, quelle que soit la salinité, à condition qu'elle ne soit pas trop faible, les proportions relatives des principaux constituants sont pratiquement constantes et le dosage de l'un d'eux donne la teneur des autres et aussi la salinité.*

Les 77 échantillons ont été mélangés et ont fourni une eau de référence appelée « eau standard ». Une fois cette eau épuisée, elle a été remplacée par une eau équivalente.

Knudsen a mis au point une méthode chimique pour mesurer la salinité et la densité (1903). Puis en 1930 Frank Wenner conçoit les premiers salinomètres. Ils mesurent le rapport entre la conductivité de l'eau standard et de l'eau à analyser à une même température connue. Depuis, la mesure de la salinité se fait toujours en calculant d'abord le rapport de conductivité. Dans le cas de mesures in situ avec des capteurs de conductivité, une correction doit être apportée en fonction de la pression.

Calcul du rapport de conductivité :

La mesure de la conductivité in situ  $C(S, t, p)$  pour une salinité  $S\text{‰}$ , une température  $t$  en  $^{\circ}\text{C}$  et une pression  $p$  en dbars est d'abord convertie en rapport de conductivité :

$$R = C(S,t,p) / C(35\text{‰},t,p) \quad (0)$$

Où, par exemple :

$$C(35\text{‰}, 15^{\circ}\text{C}, 0) = 42.914 \text{ mS.cm}^{-1} \text{ ou mmho/cm.}$$

### VIII - 3 - DEFINITION DE L'ECHELLE DE SALINITE PRATIQUE

(D'après les documents techniques de l'Unesco sur les sciences de la mer N°36 de 1984.)

1. La salinité absolue, représentée par le symbole  $S_A$  est définie comme étant le rapport de masse de matière dissoute dans l'eau de mer sur la masse d'eau de mer. En pratique, cette quantité ne peut pas être mesurée directement et une salinité pratique est définie pour rendre compte des observations océanographiques.
2. La salinité pratique, symbole  $S$ , d'un échantillon d'eau de mer, est définie à l'aide du rapport  $K_{15}$  de la conductivité électrique de cet échantillon d'eau de mer à la température de  $15^{\circ}\text{C}$  et sous une pression d'une atmosphère normale, à celle d'une

solution de chlorure de potassium (K Cl), dont la masse de K Cl par kilogramme de solution est  $32,4356 \cdot 10^{-3}$ , aux mêmes températures et pression. La valeur de  $K_{15}$  exactement égale à 1 correspond, par définition, à une salinité pratique exactement égale à 35. La salinité pratique est définie en fonction du rapport  $K_{15}$  par l'équation suivante :

$$S = a_0 + a_1 K_{15}^{1/2} + a_2 K_{15} + a_3 K_{15}^{3/2} + a_4 K_{15}^2 + a_5 K_{15}^{5/2} \quad (1)$$

où :

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.0080 \\ a_1 &= -0.1692 \\ a_2 &= 25.3851 \\ a_3 &= 14.0941 \\ a_4 &= -7.0261 \\ a_5 &= 2.7081 \\ \Sigma a_i &= 35.0000 \\ 2 \leq S \leq 42 \end{aligned}$$

Note supplémentaire :

D'après cette définition n'importe quelle eau de mer ayant un rapport de conductivité connu de façon précise proche de l'unité à 15°C avec la solution de K Cl est un étalon secondaire pour les calibrages de routine des instruments océanographiques. Toutes les eaux de mer ayant le même rapport de conductivité ont la même salinité pratique. La chlorinité devra être considérée comme une variable distincte, indépendante, utilisable dans la description des propriétés de l'eau de mer.

Il convient de souligner que les valeurs de salinité pratique sont mille fois plus grandes que les valeurs de la salinité des mêmes échantillons d'eau de mer obtenues par les anciennes échelles. Par exemple, un échantillon d'eau de mer ayant une salinité de 0,03512 (ou 35,12‰) aura une salinité pratique de 35,12.

#### VIII - 4 - L'ALGORITHME POUR LE CALCUL DE LA SALINITE

Si  $R_t$  est le rapport de conductivité de l'eau de mer, à la température  $t$ , à la conductivité de l'eau de mer ayant une salinité pratique de 35 à la même température (toutes deux sous une pression d'une atmosphère normale), alors  $R_{15}$  aura la même valeur que  $K_{15}$  et peut, par conséquent, être utilisé pour calculer la salinité pratique dans l'équation 1. Etant donné que toutes les mesures de salinité pratique sont effectuées par rapport à la conductivité de l'eau de mer standard (rapportée à  $S = 35$ ), c'est la quantité  $R_t$  qui permettra de calculer la salinité. Normalement,  $R_t$  est obtenu directement par les salinomètres de laboratoire, mais les mesures in situ donnent habituellement la quantité  $R$ , rapport de conductivité in situ sur la conductivité normale à  $S = 35$ ,  $t = 15^\circ\text{C}$ ,  $p = 0$  (où  $p$  est la pression in situ, c'est-à-dire la pression mesurée moins une atmosphère normale).  $R$  comporte trois facteurs :

$$R = R_p r_t R_t \quad (2)$$

$R_p$  est le rapport de conductivité in situ sur la conductivité du même échantillon à la même température mais à  $p = 0$  ;  $r_t$  est le rapport de conductivité de l'eau de mer standard, ayant une

salinité pratique de 35, à la température  $t$ , sur sa conductivité à 15°C. La connaissance de  $R_p$  et  $r_t$  permet de calculer  $R_t$  à partir des résultats in situ, soit

$$R_t = \frac{R}{R_p r_t} \quad (3)$$

On s'est aperçu que  $R_p$ ,  $r_t$  et  $R_t$  pouvait s'exprimer en fonction de valeurs numériques des paramètres in situ,  $R$ ,  $t$  et  $p$  ; lorsque  $t$  est exprimé en °C et  $p$  en bars ( $10^5$  Pa), de la façon suivante :

$$R_p = 1 + \frac{p(e_1 + e_2 p + e_3 p^2)}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + (d_3 + d_4 t)R} \quad (4)$$

où :

$$\begin{aligned} e_1 &= 2.070 \cdot 10^{-4} & d_1 &= 3.426 \cdot 10^{-2} \\ e_2 &= -6.370 \cdot 10^{-8} & d_2 &= 4.464 \cdot 10^{-4} \\ e_3 &= 3.989 \cdot 10^{-12} & d_3 &= 4.215 \cdot 10^{-1} \\ & & d_4 &= -3.107 \end{aligned}$$

$$R_p = 1 + \frac{p(e_1 + e_2 p + e_3 p^2)}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + (d_3 + d_4 t)R}$$

$$\begin{aligned} e_1 &= 2.070 \cdot 10^{-4} & d_1 &= 3.426 \cdot 10^{-2} \\ e_2 &= -6.370 \cdot 10^{-8} & d_2 &= 4.464 \cdot 10^{-4} \\ e_3 &= 3.989 \cdot 10^{-12} & d_3 &= 4.215 \cdot 10^{-1} \\ & & d_4 &= -3.107 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

et

$$r_t = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4$$

$$c_0 = 0.6766097$$

$$c_1 = 2.00564 \cdot 10^{-2}$$

$$c_2 = 1.104259 \cdot 10^{-4}$$

$$c_3 = -6.9698 \cdot 10^{-7}$$

$$c_4 = 1.0031 \cdot 10^{-9}$$

On peut tenir compte de l'influence des différences relativement faibles entre  $R_t$  et  $R_{15}$  à une salinité donnée en ajoutant une correction,  $\Delta S$ , à la salinité pratique calculée en substituant  $R_t$  à  $R_{15}$  dans l'équation 1. La salinité pratique peut donc être calculée par l'équation :

$$S = a_0 + a_1 R_t^{1/2} + a_2 R_t + a_3 R_t^{3/2} + a_4 R_t^2 + a_5 R_t^{5/2} + \Delta S \quad (6)$$

où :

$$\Delta S = \frac{(t-15)}{1+k(t-15)} (b_0 + b_1 R_t^{1/2} + b_2 R_t + b_3 R_t^{3/2} + b_4 R_t^2 + b_5 R_t^{5/2})$$

avec les constantes  $a_i$  définies dans l'équation 1 et

$$b_0 = 0.0005$$

$$b_1 = -0.0056$$

$$b_2 = -0.0066 \qquad k = 0.0162$$

$$b_3 = -0.0375$$

$$b_4 = 0.0636$$

$$b_5 = -0.0144$$

Les équations 4,5 et 6 peuvent être utilisées dans toute la gamme de températures (-2 à 35°C), de pressions (0 à 1000 bars) et de salinité (2 à 42) de l'océan mondial (Perkin et Lewis, 1980).

Pour les salinomètres de laboratoire, le calcul de la salinité pratique se fait en n'utilisant que l'équation 6. Pour les calculs relatifs aux mesures in situ, on doit calculer  $R_p$  et  $r_t$  à partir des équations 4 et 5 respectivement, et ensuite calculer  $R_t$  à partir de l'équation 3. La salinité pratique peut ensuite être calculée à partir de l'équation 6.

Les valeurs suivantes permettent de vérifier si l'utilisation des équations ci-dessus est correcte.

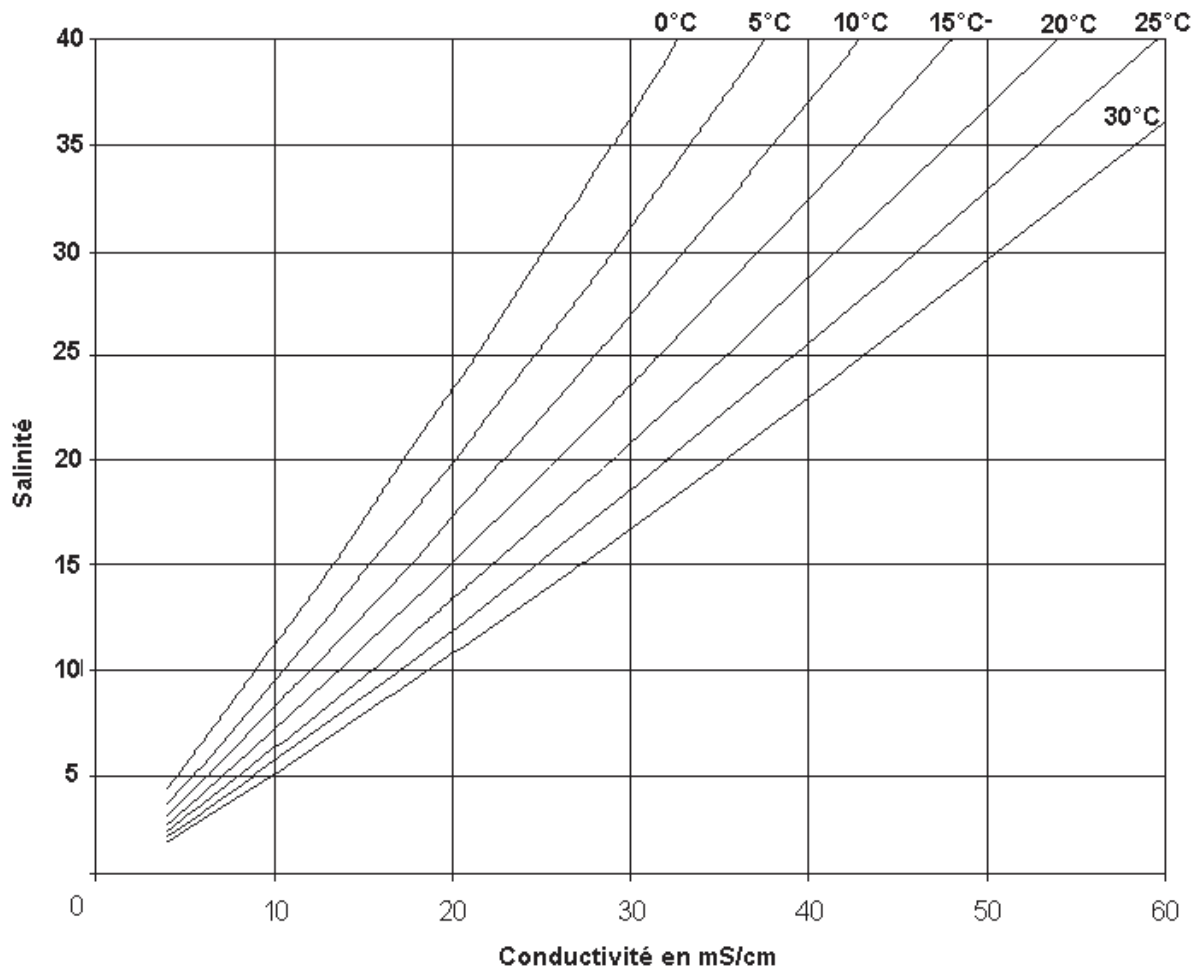
R	t(°C)	P(bars)	$R_p$	$r_t$	$R_t$	S
1	15	0	1	1	1	35
1.2	20	200	1.0169429	1.1164927	1.0568875	37.245628
0.65	5	150	1.0204864	0.77956585	0.81705885	27.995347

La précision avec laquelle la salinité est obtenue dépend des erreurs commises sur les mesures de la température en °C, de la conductivité en mS/cm et la pression en bars. Elle est d'environ :

$$\Delta S \cong \Delta t + \Delta C + 4.10^{-3} \Delta p$$

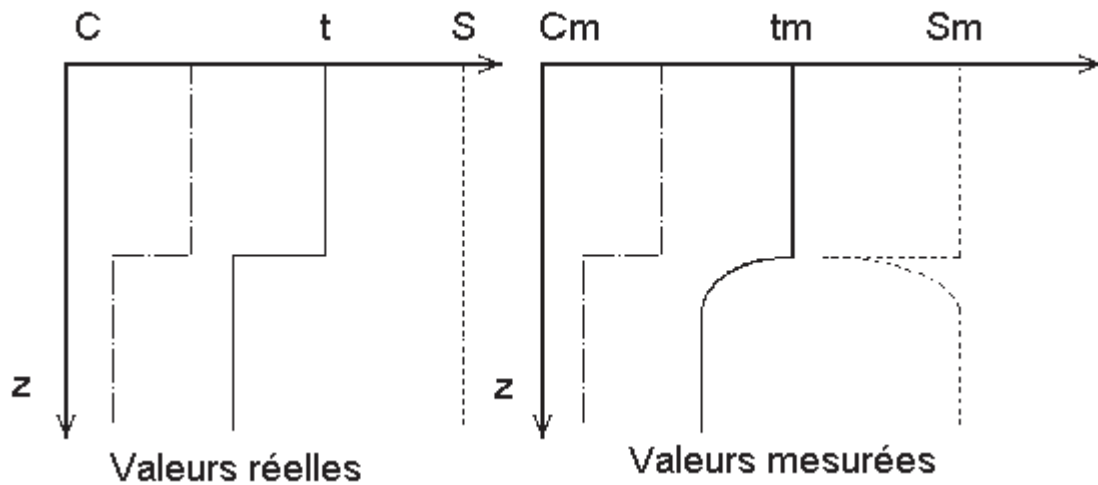
Vue le peu d'effet de l'erreur sur la pression et la précision avec laquelle la pression est mesurée, l'erreur sur la salinité est considérée comme étant :

$$\Delta S \cong \Delta t + \Delta C$$



## VIII - 5 - AMELIORATION DE LA MESURE DE LA SALINITE

### VIII - 5 - 1 - Erreurs dues aux réponses différentes des capteurs



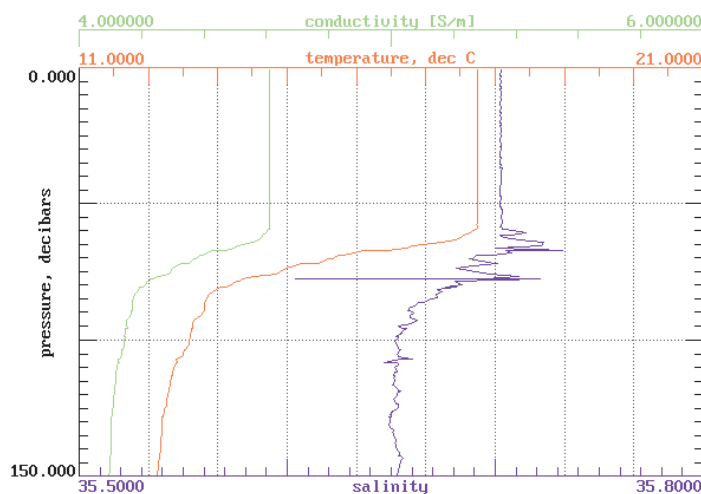
La salinité est calculée à partir de la mesure de la conductivité  $C$  (ou du rapport de conductivité  $R$ ), de la température  $t$  et de la pression  $p$  :

$$S = f(C, t, p)$$

Pour une même salinité lorsque la température diminue  $C$  augmente.

Comme nous le verrons plus loin, des capteurs de conductivité, de température et de pression peuvent être montés sur un appareil appelé bathysonde. Celle-ci se déplace verticalement dans l'eau de mer. Lorsqu'elle traverse un gradient de température important, comme la thermocline saisonnière, il apparaît des anomalies dans le calcul de la salinité. Elles sont dues aux différences entre les temps de réponse des capteurs de conductivité et de température.

Imaginons, par exemple, qu'une bathysonde descende à une vitesse constante. Au cours de cette descente, elle passe instantanément d'une température  $t_1$  à une température inférieure  $t_2$  alors que la salinité ne varie pas. Comme l'axe du capteur de conductivité est monté verticalement sa réponse est rapide car il suit les changements de conductivité de l'eau au niveau du capteur. A ce même niveau, la température mesurée  $t_m$  est momentanément trop élevée à cause de la constante de temps du capteur de température. La salinité calculée à partir de cette température mesurée est donc momentanément trop faible (voir courbes ci-dessus).



En pratique la vitesse de descente d'une bathysonde n'est pas régulière puisque à la vitesse de filage du câble s'ajoute des mouvements alternatifs dus, surtout, au roulis du bateau. Les profils de température sont complexes (voir exemple ci-contre). Pour améliorer la mesure de la salinité dans les forts gradients de température il faut compenser la différence de constante de temps entre les capteurs de conductivité et de température.

Trois méthodes sont utilisées pour réduire cette anomalie : Des algorithmes de correction, des circuits de compensation électroniques et des systèmes de correction mécaniques.

### VIII - 5 - 2 - Exemple d'algorithme de correction

Soit  $\theta$  la constante de temps du capteur de température,  $T_a$  la température du milieu ambiant à l'instant  $t$  et  $T$  sa température au même instant. Si la température varie nous avons :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\theta}(T_a - T) \quad (1)$$

La mesure de la température s'effectue à intervalle de temps régulier, aux temps  $t_1, t_2, t_n, t_{n+1}$  ... Plaçons nous entre deux acquisitions à l'instant  $t$  tel que :

$$t_{n-1} \leq t \leq t_n$$

Dans cet intervalle considérons en première approximation que la température du milieu ambiant  $T_a$  varie linéairement en fonction du temps  $t$  et qu'au temps  $t_{n-1}$  la température ambiante était  $T_{a_{n-1}}$ .

$$T_a = T_{a_{n-1}} + \mu_n(t - t_{n-1}) \quad (2)$$

(1) et (2) donnent :

$$\frac{dT_a}{dt} + \frac{T}{\theta} = \left[ \frac{T_{a_{n-1}}}{\theta} + \frac{\mu_n t_{n-1}}{\theta} \right] + \frac{\mu_n t}{\theta}$$

Soit, après intégration, une température mesurée par le capteur de :

$$T = T_a - \mu_n \theta + (T_{n-1} - T_{a_{n-1}} + \mu_n \theta) e^{-\frac{t - t_{n-1}}{\theta}}$$

A l'instant  $t = t_n$  nous avons :  $T = T_n$  et  $T_a = T_{a_n}$

En posant :

$$\frac{t_n - t_{n-1}}{\theta} = \frac{\Delta t}{\theta} = x$$

( $\Delta t$  est la période d'échantillonnage de la température)

nous obtenons :

$$T_n = T_{a_n} - \mu_n \theta + (T_{n-1} - T_{a_{n-1}} + \mu_n \theta) e^{-x}$$

ou encore :

$$T_n - T_{a_n} = T_{a_n} (\mu_n \theta + T_{n-1}) - (1 - e^{-x})$$

Remplaçons  $T_{a_{n-1}}$  par  $T_{a_n} - \mu \Delta t$  :

$$T_n - T_{n-1} = (T_{a_n} - \mu_n \theta - T_{n-1})(1 - e^{-x}) + \mu_n \Delta t e^{-x}$$

Si  $\Delta t \ll \theta$  nous obtenons :

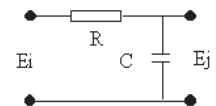
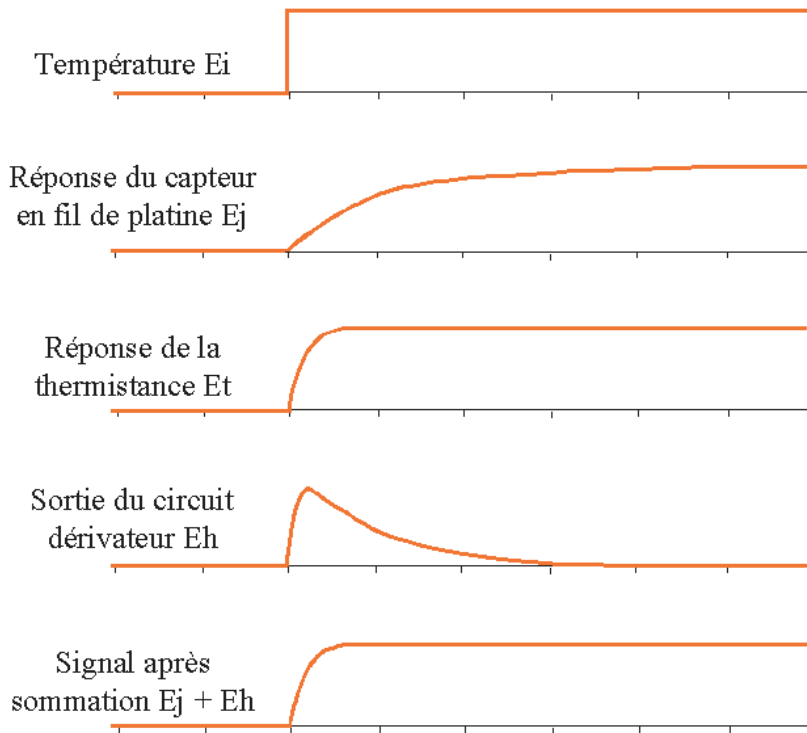
$$T_n = \frac{x \cdot T_n - T_{a_{n-1}}}{x - 1} \quad \text{avec : } x = \frac{\Delta t}{\theta}$$

Il existe d'autres algorithmes de correction s'adaptant à d'autres conditions. Comme la constante de temps du capteur de température varie avec la vitesse de renouvellement de l'eau autour du capteur de température certains de ces algorithmes mesurent cette vitesse à partir de la mesure de la pression et l'utilise dans le calcul afin d'améliorer la correction. Ainsi, Sea-Bird Electronics propose des programmes de calcul comme « ALINGCTD » pour améliorer la mesure de la salinité.

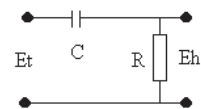
### VIII - 5 - 3 - Circuit de correction électronique

L'idée est d'associer les avantages d'un capteur de température précis mais ayant une constante de temps relativement importante avec un autre capteur qui n'est pas juste <sup>(1)</sup> mais qui a un faible temps de réponse. Pour cela, le signal électrique provenant de ce second capteur est dérivé par un circuit électronique RC adapté puis ajouté au signal du premier capteur de sorte à compenser au mieux sa constante de temps.

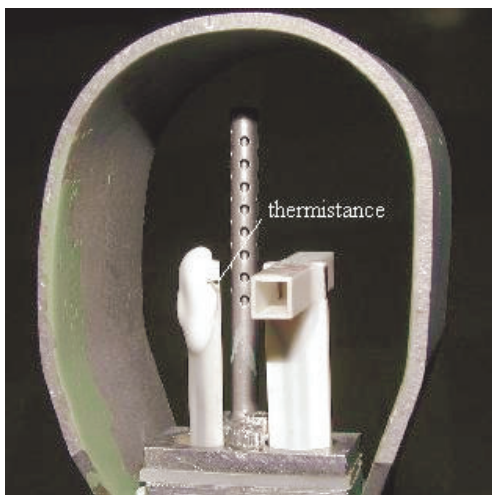
#### Circuit de correction électronique



Circuit électrique équivalent à la sortie du capteur en fil de platine



Circuit dérivateur



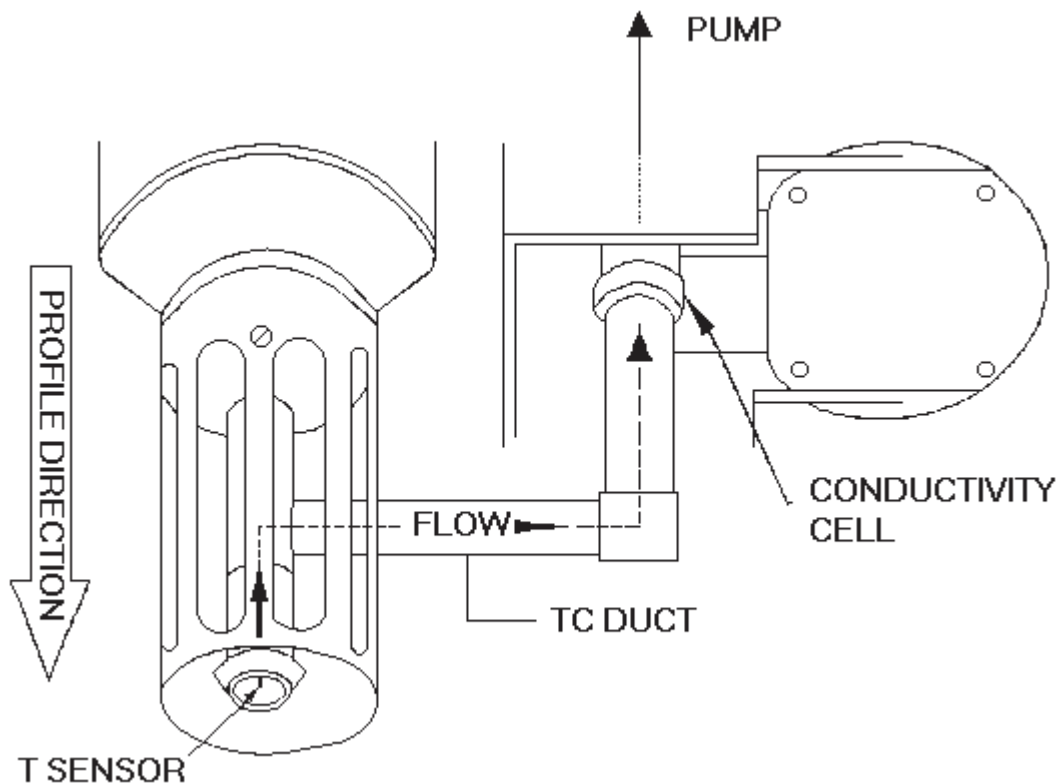
Exemple : Dans la sonde Neil Brown MK3, un capteur de température au platine de type Rosemount (voir en V - 3) ayant un temps de réponse de 250 ms et associé avec un capteur de température à thermistance (Fenwal GC32SM2) dont le temps de réponse n'est que de 25 ms. Nous reproduisons ci-dessus la réponse à un échelon de température de cette sonde.

<sup>(1)</sup> Afin d'avoir une faible constante de temps, le capteur n'est pas bien protégé de l'effet de pression (cause d'erreur accidentelle). Comme la vitesse verticale d'une bathysonde est de l'ordre du mètre par seconde, la variation de la pression dans le temps est faible. Elle induit une faible erreur sur la sortie de ce capteur de température qui est bloquée par le circuit dérivateur. Par contre les brusques variations de température sont transmises. La constante de temps du capteur précis doit être la même que le produit RC du circuit dérivateur.



### VIII - 5 - 4 - Exemple de correction mécanique

Une pompe est montée sur la bathysonde. Elle prélève en continu l'eau dont il faut mesurer les paramètres et la rejette ensuite. Cette eau passe d'abord devant le capteur de température et ensuite dans la cellule du capteur de conductivité. Le débit de la pompe est ajusté afin que le temps mis par un échantillon d'eau pour passer du capteur de température au capteur de conductivité compense le temps de réponse du capteur de température. Cette compensation n'est pas parfaite mais le système présente quelques avantages : Les fluctuations de la vitesse de circulation de l'eau autour du capteur font varier sa constante de temps. Comme ici, la vitesse est constante, le temps de réponse du capteur de température l'est aussi. Des algorithmes de corrections supplémentaires peuvent être utilisés plus efficacement pour améliorer la mesure de la salinité. Il est possible d'ajouter sur le circuit de la pompe un capteur d'oxygène. Sa précision sera meilleure puisque la vitesse de renouvellement de l'eau devant sa membrane sera régulière.



**Schéma d'un circuit de compensation monté sur des sondes SBE**  
(d'après "The Sea-Bird Journal, issue #3, Aug. 1992")

Une autre méthode pour obtenir un flux continu au niveau des capteurs est d'avoir vitesse verticale presque constante. Cela peut être obtenu en utilisant une sonde qui descend de façon autonome, largue un lest à une immersion programmée et remonte à une vitesse quasiment régulière. Faute de pouvoir être autonomes, les bathysondes, reliées au navire par un câble, ont des vitesses verticales plus régulières si, à bord, le câble passe par un système amortisseur dit « anti-roulis ». Il est étudié pour être efficace quelque soit la longueur du câble filé.

*Curieusement, alors que les navires étrangers en sont généralement équipés, ce dispositif a disparu des navires scientifiques français ! Les variations de la vitesse verticale de la bathysonde ne sont plus filtrées ce qui nuit à la qualité des mesures. Par mauvais temps le roulis peut donner du mou dans le câble. Comme ce mou n'est plus repris par un système amortisseur, des coques peuvent se produire dans le câble ce qui risque d'entraîner la perte de la bathysonde. De plus, il apparaît un autre risque de perte lors des opérations de mise à l'eau et de relevage : Dès que la bathysonde arrive dans la poulie il y a rupture du câble ou de la poulie. Il n'y a plus les quelques mètres de sécurité qu'autorisait l'amortisseur.*

## IX - CALCUL DE LA DENSITE DE L'EAU DE MER

Les océanographes appellent densité de l'eau de mer sa masse volumique. Nous donnons l'équation internationale d'état de l'eau de mer de 1980 d'après le document technique N°36 de l'Unesco sur les sciences de la mer.

Une nouvelle équation d'état de l'eau de mer diluée par de l'eau pure ou concentrée par évaporation a été établie pour être utilisée avec l'échelle de salinité pratique (Millero, Chen, Bradshaw et Schleicher, 1980 ; Millero et Poisson, 1981). Cette équation est plus précise que les équations couramment employées (Knudsen, Forch et Sørensen, 1902 ; Ekman, 1908 ; Cox, McCartney et Culkin, 1970) et couvre une gamme plus vaste de températures et de pressions. Les Documents techniques où sont décrits en détail la méthode d'ajustement sont disponibles (Millero, Chen, Bradshaw et Schleicher, 1981 ; Millero et Poisson, 1981, b publiés dans Unesco, 1981, b).

La densité ( $\rho$ , kg m<sup>-3</sup>) de l'eau de mer en fonction de la salinité pratique (S), de la température (t en °C) et de la pression in situ (pression mesurée moins une atmosphère normale = p, bars) est donnée par :

$$\rho(S, t, p) = \rho(S, t, 0) / \{1 - p / K(S, t, p)\} \quad (7)$$

où K(S,t,p) est le module moyen de compression (secant bulk modulus).

Le volume spécifique ( $v = 1/\rho$ , m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>) de l'eau de mer peut être obtenu à partir de :

$$v(S, t, p) = v(S, t, 0) \{1 - p / K(S, t, p)\} \quad (8)$$

La densité de l'eau de mer à la pression normale (p = 0) peut être déterminée par

$$\rho(S, t, 0) = \rho_w + (b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4) S + (c_0 + c_1 t + c_2 t^2) S^{3/2} + d_0 S^2 \quad (9)$$

$$b_0 = 8.244\ 93 * 10^{-1} \quad c_0 = -5.72466 * 10^{-3}$$

$$b_1 = -4.0899 * 10^{-3} \quad c_1 = 1.0227 * 10^{-4}$$

$$b_2 = 7.6438 * 10^{-5} \quad c_2 = -1.6546 * 10^{-6}$$

$$b_3 = -8.2467 * 10^{-7}$$

$$b_4 = 5.3875 * 10^{-9} \quad d_0 = 4.8314 * 10^{-4}$$

La densité de l'eau pure de référence (SMOW) est donnée par (IUPAC, 1976)

$$\rho_w = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (10)$$

où  $a_0 = 999.842594$

$$a_1 = 6.793952 * 10^{-2}$$

$$a_2 = -9.095290 * 10^{-3}$$

$$a_3 = 1.001685 * 10^{-4}$$

$$a_4 = -1.120083 * 10^{-6}$$

$$a_5 = 6.536332 * 10^{-9}$$

Si l'on dispose un jour de données plus fiables pour l'eau pure, il sera facile de modifier l'équation 9. Le module moyen de compression (K) de l'eau de mer est donné par

$$K(S, t, p) = K(S, t, 0) + A p + B p^2 \quad (11)$$

$$\text{où} \quad K(S, t, 0) = K_w + (f_0 + f_1 t + f_2 t^2 + f_3 t^3) S + (g_0 + g_1 t + g_2 t^2) S^{3/2} \quad (12)$$

$$f_0 = 54.6746$$

$$g_0 = 7.944 * 10^{-2}$$

$$f_1 = -0.603459$$

$$g_1 = 1.6483 * 10^{-2}$$

$$f_2 = 1.09987 * 10^{-2}$$

$$g_2 = -5.3009 * 10^{-4}$$

$$f_3 = -6.1670 * 10^{-5}$$

$$A = A_w + (i_0 + i_1 t + i_2 t^2) S + j_0 S^{3/2} \quad (13)$$

$$i_0 = 2.2838 * 10^{-3}$$

$$j_0 = 1.91075 * 10^{-4}$$

$$i_1 = -1.0981 * 10^{-5}$$

$$i_2 = -1.6078 * 10^{-6}$$

$$B = B_w + (m_0 + m_1 t + m_2 t^2) S \quad (14)$$

$$m_0 = -9.9348 * 10^{-7}$$

$$m_1 = 2.0816 * 10^{-8}$$

$$m_2 = 9.1697 * 10^{-10}$$

Les termes du module moyen de compression pour l'eau pure sont donnés par :

$$K_w = e_0 + e_1 t + e_2 t^2 + e_3 t^3 + e_4 t^4 \quad (15)$$

$$e_0 = 19652.21$$

$$e_1 = 148.4206$$

$$e_2 = -2.327105$$

$$e_3 = 1.360477 * 10^{-2}$$

$$e_4 = -5.155288 * 10^{-5}$$

$$A_w = h_0 + h_1 t + h_2 t^2 + h_3 t^3 \quad (16)$$

$$h_0 = 3.239908$$

$$h_1 = 1.43713 * 10^{-3}$$

$$h_2 = 1.16092 * 10^{-4}$$

$$h_3 = -5.77905 * 10^{-7}$$

$$B_w = k_0 + k_1 t + k_2 t^2 \quad (17)$$

$$k_0 = 8.50935 * 10^{-5}$$

$$k_1 = -6.12293 * 10^{-6}$$

$$k_2 = 5.2787 * 10^{-8}$$

L'équation internationale d'état peut être utilisée de  $S = 0$  jusqu'à 42 ;  $t$  de  $-2$  à  $40^\circ\text{C}$  ;  $p$  de zéro jusqu'à 1000 bars.

Les valeurs suivantes permettent de vérifier si l'utilisation de l'équation ci-dessus est correcte.

(Unités :  $\rho$  en  $\text{kg m}^{-3}$  et  $K$  en bars).

S	T(°C)	P(bars)	$\rho(S,t,p)$	$K(S,t,p)$
0	5	0	999.96675	20337.80375
0	5	1000	1044.12802	23643.52599
0	25	0	997.04796	22100.72106
0	25	1000	1037.90204	25405.09717
35	5	0	1027.67547	22185.93358
35	5	1000	1069.48914	25577.49819
35	25	0	1023.34306	23726.34949
35	25	1000	1062.53817	27108.94504

La densité augmente approximativement de 1 lorsque :

La température diminue de  $5^\circ\text{C}$ ,  
ou la salinité augmente de 1 PSU,  
ou la pression augmente de 20 bars.

L'erreur  $\Delta\rho$  sur la densité est donc :

$$\Delta\rho = 5 \Delta t + \Delta s + 20 \Delta p$$

avec :

$\Delta t$  erreur sur la température en  $^\circ\text{C}$ ,

$\Delta s$  erreur sur la salinité en PSU,

et  $\Delta p$  erreur sur la pression en bars.

## X - MESURE DE L'OXYGENE DISSOUS DANS L'EAU

### X - 1 - HYDROLOGIE CLASSIQUE

Nécessite le prélèvement d'échantillons aux immersions standard. La détermination de l'oxygène s'effectue ensuite dans un laboratoire embarqué ou ultérieurement à terre.

Les principales méthodes d'analyse sont les suivantes :

Méthode chimique de WINKLER (1888)

Cette méthode a permis un grand nombre d'observations des teneurs en oxygène dans l'océan mondial. Elle a fait depuis son introduction l'objet de nombreuses études, qui ont apporté des améliorations successives et elle reste encore actuellement la méthode la plus précise. Elle est toujours utilisée pour contrôler et étalonner les capteurs électrochimiques.

Méthodes physico-chimiques :

La principale de ces techniques est la chromatographie en phase gazeuse. Cette méthode permet aussi de quantifier d'autres gaz dissous dans les eaux de mer. ( $N_2$ , Ar, fréons, etc...). La précision est de l'ordre de 1%.

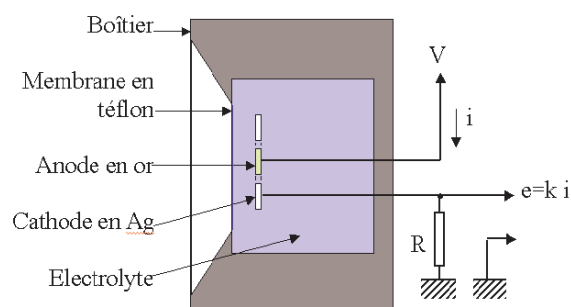
### X - 2 - CAPTEUR D'OXYGENE ELECTROCHIMIQUE

On dispose actuellement de procédés électrochimiques basés sur le principe polarographique permettant des déterminations rapides de l'oxygène d'où leur intérêt par rapport à la méthode de WINKLER. Cependant celle-ci continue à être couramment utilisée pour étalonner les capteurs d'oxygène et pour contrôler leur fonctionnement.



**Capteur d'oxygène.**

**Vue de face.**

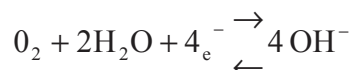


**Principe d'un capteur d'oxygène.**

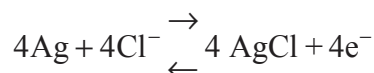
**Vue en coupe.**

Le capteur de type Beckmann présenté sur la figure est une cellule polarographique miniature, constituée d'une cathode en or, d'une anode annulaire en argent, d'un gel électrolytique KCl et d'une fine membrane de Téflon. Une faible tension est appliquée entre les 2 électrodes.

La cellule polarographique est isolée de l'eau de mer au moyen de la membrane, l'oxygène diffusant à travers elle, passe par la fine couche de gel électrolyte. L'oxygène est alors réduit électro-chimiquement au niveau de la cathode selon la réaction :



tandis qu'au niveau de l'anode se produit la réaction suivante :



Un faible courant de sortie est engendré, directement proportionnel à la pression partielle de l'oxygène (PO<sub>2</sub>). Par la suite, ce courant est amplifié et compensé de l'effet de la température sur la perméabilité de la membrane, de l'effet de la température de l'eau sur la solubilité de l'oxygène dans l'eau et de l'effet de la pression sur le capteur.

Le résultat final est la mesure de l'oxygène à une précision de ± 1 % avec un temps de réponse de l'ordre de 15 secondes. Depuis, il est apparu des micro-capteurs, fonctionnant sur le même principe, mais n'ayant plus qu'un temps de réponse de 0.2 seconde (AMT GmbH O<sub>2</sub> Sensor).

### X - 3 - CAPTEUR D'OXYGENE A OPTODE

Il existe des substances appelées photophores qui, après avoir été éclairées, produisent dans l'obscurité une fluorescence momentanée. Cette fluorescence varie en amplitude et en durée en présence de certains corps. Ce principe permet de réaliser des capteurs. Ils sont appelés optode, contraction de « **optical electrode** ».

Le photophore utilisé pour connaître la teneur en oxygène dissous dans l'eau est du ruthénium. Il reçoit le rayon lumineux d'une diode électroluminescente bleue et rayonne dans le rouge. La durée et l'amplitude de ce rayonnement diminuent proportionnellement à la teneur en oxygène.

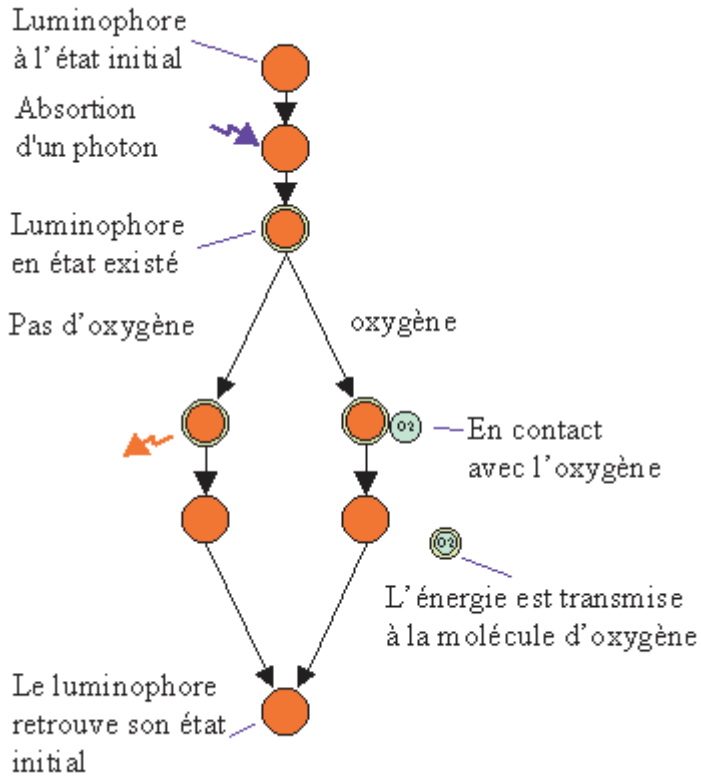
Performances du « Oxygene Optode 3830 »:

Echelle de mesure	0-500 µM <sup>(1)</sup>
Résolution	< 1 µM
Précision	< 8 µM (entre 0 et 2000 m et une salinité comprise entre 33 et 37 PSU).
Temps de réponse	< 20 s
Dimensions	Ø36 X 86 mm
Poids	230 g

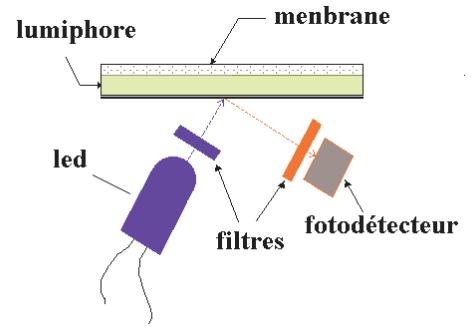
Bonne précision, stabilité à long terme (1an), insensible à l'agitation de l'eau devant la membrane, peu sensible au fouling, effet de pression connu et réversible, faible constante de temps.

La température a une influence sur la mesure optique aussi l'optode est associé à un capteur de température ce qui permet une correction automatique. La salinité a également un effet sur ce capteur. Elle doit être mesurée par ailleurs pour calculer avec précision l'oxygène dissous. Il en est de même pour la pression mais elle a une faible influence (3% à 1000 m).

<sup>1</sup>(1) 1 µM (micro molaire) = 31.25 mg/l



Principe (1)



Principe (2)



Oxygene optode 3830 (Aanderaa)

## XI - MESURE DE LA CELERITE DU SON DANS L'EAU DE MER

Description du célérimètre « Bissett-Berman » (d'après John JAEGER)<sup>(2)</sup> :

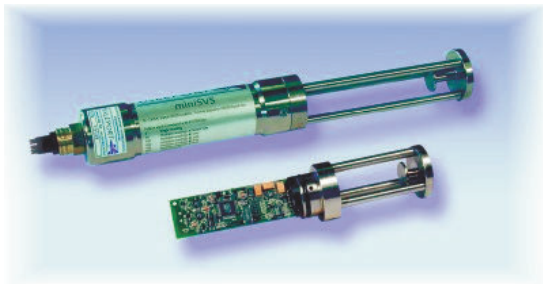
La mesure directe est généralement obtenue par un célérimètre opérant sur le principe de l'écho : Un transducteur piézo-électrique, généralement en cristal de Baryum, est soumis à une impulsion électrique qui le fait vibrer à sa fréquence de résonance. L'énergie sonore ainsi produite se propage sur une distance fixe jusqu'à un réflecteur. L'onde réfléchie revient vers le transducteur. Le signal acoustique reçu est converti en un signal électrique (après l'émission du signal sonore, l'électroniquement s'est commutée d'émetteur en récepteur).

Ainsi le temps mesuré par l'appareil entre le début de l'émission et le début de la réception de l'onde réfléchie est proportionnel à la célérité avec laquelle le son a parcouru la distance fixe entre le transducteur et le réflecteur (aller et retour).

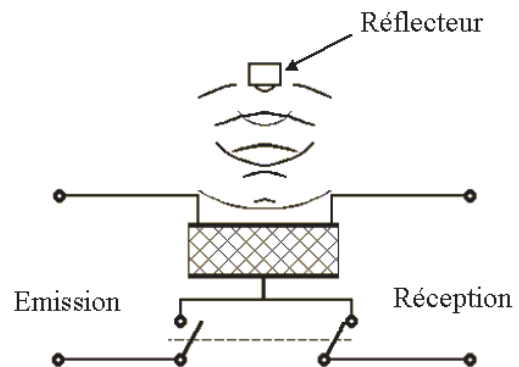
Le matériau piézo-électrique est en baryum de titane, recouvert de nickel afin d'obtenir un contact électrique résistant à la corrosion. Le transducteur est placé sur la paroi d'un boîtier rempli d'huile en équipression grâce à un diaphragme élastique. Le réflecteur est maintenu à une distance fixe du transducteur par des entretoises en invar<sup>(3)</sup> qui ont un coefficient de dilatation négligeable. Elles sont recouvertes d'une chemise les protégeant de la corrosion.

Le transducteur entre en résonance à la fréquence de 5 MHz, lorsqu'on applique une impulsion électrique entre sa face en contact avec l'huile et celle en contact avec l'eau de mer.

Le trajet aller-retour étant de 0.1 m, la fréquence des impulsions est de 10 fois supérieure à la vitesse du son dans l'eau. Le fonctionnement du célérimètre est perturbé si l'impulsion sonore est réfléchie par des surfaces autres que celles du réflecteur (bulles d'air, salissures sur les surfaces sensibles du transducteur). Une infiltration d'eau à l'intérieur du boîtier rempli d'huile provoque également un mauvais fonctionnement. La précision obtenue avec ce type de capteur associé à son électronique est de  $\pm 0.06$  m/s dans une gamme allant de 1400 à 1600 m/s.



Capteur de célérité Valeport Ltd  
Model MINI SVS2 (document Valeport)



Schémas de principe d'un célérimètre

<sup>(2)</sup> OCEANOGRAPHIC MEASUREMENT TECHNIQUES AND APPLICATIONS BY John E. JAEGER – The Bissett-Berman Co - San Diego, California.

<sup>(3)</sup> Invar : (vient de "invariable") L'invar est un alliage métallique de fer avec 36% de nickel. Son coefficient de dilatation est nul.



## XII - CALCUL DE LA CELERITE DU SON DANS L'EAU DE MER

Méthode de calcul de Chen et Millero (1977) :

$$U(S,t,p) = C_w(t,p) + A(t,p) S + B(t,p) S^{3/2} + D(t,p) S^2$$

$$C_w(t,p) = C_{00} + C_{01} t + C_{02} t^2 + C_{03} t^3 + C_{04} t^4 + C_{05} t^5 \\ + (C_{10} + C_{11} t + C_{12} t^2 + C_{13} t^3 + C_{14} t^4) p \\ + (C_{20} + C_{21} t + C_{22} t^2 + C_{23} t^3 + C_{24} t^4) p^2 \\ + (C_{30} + C_{31} t + C_{32} t^2) p^3$$

$C_{00} = + 1402.388$		$C_{10} = + 0.153563$	
$C_{01} = +5.03711$		$C_{11} = + 6.8982$	E-4
$C_{02} = - 5.80852$	E-2	$C_{12} = - 8.1788$	E-6
$C_{03} = +3.3420$	E-4	$C_{13} = + 1.3621$	E-7
$C_{04} = -1.47800$	E-6	$C_{14} = - 6.1185$	E-10
$C_{05} = + 3.1464$	E-9		
$C_{20} = + 3.1260$	E-5	$C_{30} = -9.7729$	E-9
$C_{21} = - 1.7107$	E-6	$C_{31} = + 3.8504$	E-10
$C_{22} = + 2.5974$	E-8	$C_{32} = - 2.3643$	E-12
$C_{23} = - 2.5335$	E-10		
$C_{24} = + 1.0405$	E-12		

$$A(t,p) = A_{00} + A_{01} t + A_{02} t^2 + A_{03} t^3 + A_{04} t^4 \\ + (A_{10} + A_{11} t + A_{12} t^2 + A_{13} t^3 + A_{14} t^4) p \\ + (A_{20} + A_{21} t + A_{22} t^2 + A_{23} t^3) p^2 \\ + (A_{30} + A_{31} t + A_{32} t^2) p^3$$

$A_{00} = + 1.389$		$A_{10} = + 9.4742$	E-5
$A_{01} = - 1.262$	E-2	$A_{11} = - 1.2580$	E-5
$A_{02} = + 7.164$	E-5	$A_{12} = - 6.4885$	E-8
$A_{03} = + 2.006$	E-6	$A_{13} = + 1.0507$	E-8
$A_{04} = - 3.21$	E-8	$A_{14} = - 2.0122$	E-10
$A_{20} = - 3.9064$	E-7	$A_{30} = + 1.100$	E-10
$A_{21} = + 9.1041$	E-9	$A_{31} = + 6.649$	E-12
$A_{22} = + 1.6002$	E-10	$A_{32} = - 3.389$	E-13
$A_{23} = + 7.988$	E-12		

$$B(t,p) = B_{00} + B_{01} t + (B_{10} + B_{11} t) p$$

$B_{00} = - 1.922$	E-2	$B_{10} = + 7.3637$	E-5
$B_{01} = - 4.42$	E-5	$B_{11} = + 1.7945$	E-7

$$D(t,p) = D_{00} + D_{10} p$$

$D_{00} = + 1.727$	E-3	$D_{10} = - 7.9836$	E-6
--------------------	-----	---------------------	-----

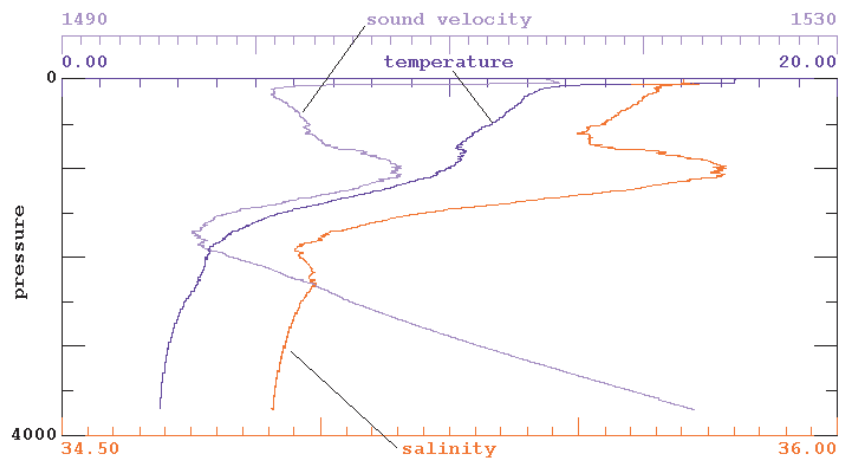
Pour vérification (S est en PSU, t en degrés Celsius et p est bars). :

$$U(30,0,0) = 1442.5 \text{ m/s} \quad U(35,10,500) = 1573.4 \text{ m/s} \quad U(40,40,1000) = 1732.0 \text{ m/s}$$

L'erreur absolue sur la célérité est d'environ :  $\Delta U(S,t,p) = 0.8 \Delta S + 0.3 \Delta t + 6 \Delta p$   
 $\Delta U$  est en m/s, S en PSU,  $\Delta t$  en degrés Celsius et  $\Delta p$  en bars

Le long d'un profil vertical, la salinité varie de quelques points, la température de quelques dizaines de degrés et la pression de quelques centaines de bars aussi la célérité varie surtout avec la pression, peu avec la température et encore moins avec la salinité.

Elle augmente avec la pression et diminue avec la température. Comme la température décroît de façon importante entre la surface et 1500 m environ, son effet est prédominant et la célérité diminue. Ensuite, quand la profondeur augmente la température varie peu, l'effet de la pression devient prépondérant et la célérité augmente. Il y a donc un minimum de célérité vers 1500 m de profondeur.



### XIII - CALCUL DE L'IMMERSION

L'équation hydrostatique exacte est d'après Saunders et Foffonof :

$$\int_p^z g dz = \left[ g_0(0) + \frac{1}{2} \gamma z \right] z = \int_0^p V dp = \int_0^p V(35,0,p) dp + \Delta D$$

où  $g_0(0)$  est la gravité à la surface de l'océan qui dépend de la latitude,  $\gamma$  est le gradient vertical moyen de gravité,  $V$  est le volume spécifique et  $\Delta D$  l'anomalie géopotentielle définie

par :

$$\Delta D = \int_0^p \delta dp$$

où :

$$\delta = V(S, t, p) - V(35,0, p)$$

est l'anomalie de volume spécifique.

$$V(35,0,p) = V(35,0,0) \left[ 1 - \frac{p}{K + A p + B p^2} \right]$$

Ce qui donne après intégration :

$$\int_0^p V(35,0,p) dp = V(35,0,0) \left[ p - \frac{1}{2B} \left\{ \ln(1 + A p / K + B p^2 / K) \right\} + A / R \ln \frac{(2 B p + A - R) / (A - R)}{(2 B p + A + R) / (A + R)} \right]$$

ou  $R^2 = A^2 - 4 B K$

et  $K = + 21582.27$

$$A = + 3.35941$$

$$B = + 5.032 \text{ E-5}$$

$$V(35,0,0) = 9.72662 \text{ E-4}$$

Pour  $S = 35$ ,  $t = 0^\circ\text{C}$  et pour une pression  $p$  en décibars.

Comme la formule exacte n'est pas pratique à utiliser pour les applications de routine, un polynôme du quatrième ordre permet de calculer la profondeur avec une précision d'au moins 0.0002 m dans une gamme allant de 0 à 12000 décibars :

$$\int_0^p V(35,0,p) dp \cong C_1 p + C_2 p^2 + C_3 p^3 + C_4 p^4$$

Avec  $C_1 = +9.72659$   $C_3 = +2.279 \text{ E-10}$

$C_2 = -2.2512 \text{ E-5}$   $C_4 = -1.82 \text{ E-15}$

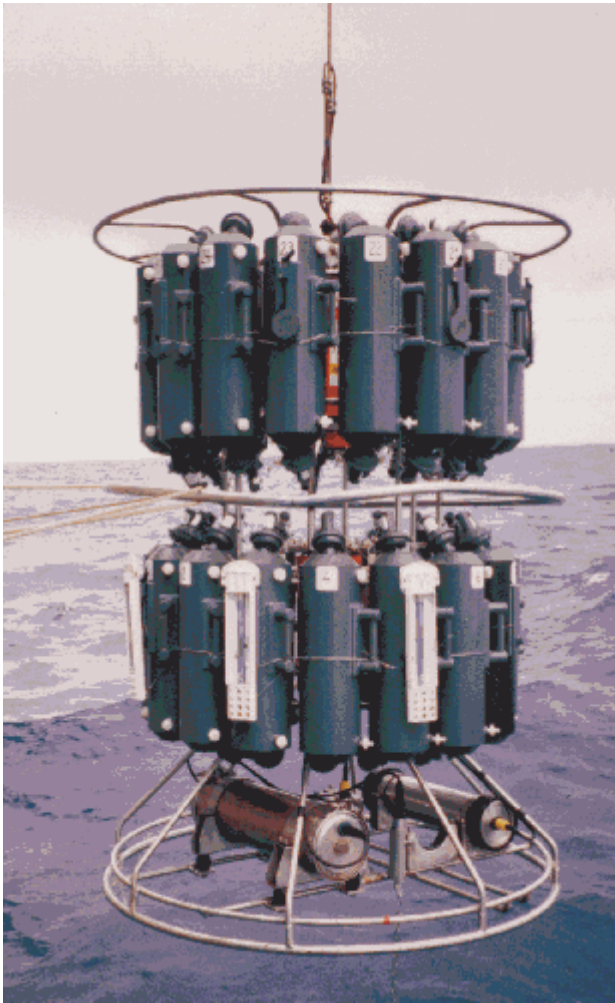
La formule précédente élimine un calcul logarithmique avec une perte de précision négligeable. La formule complète étant :

$$z = \frac{C_1 p + C_2 p^2 + C_3 p^3 + C_4 p^4}{g(0) + \frac{1}{2} \gamma' p} + \frac{\Delta D}{9.8}$$

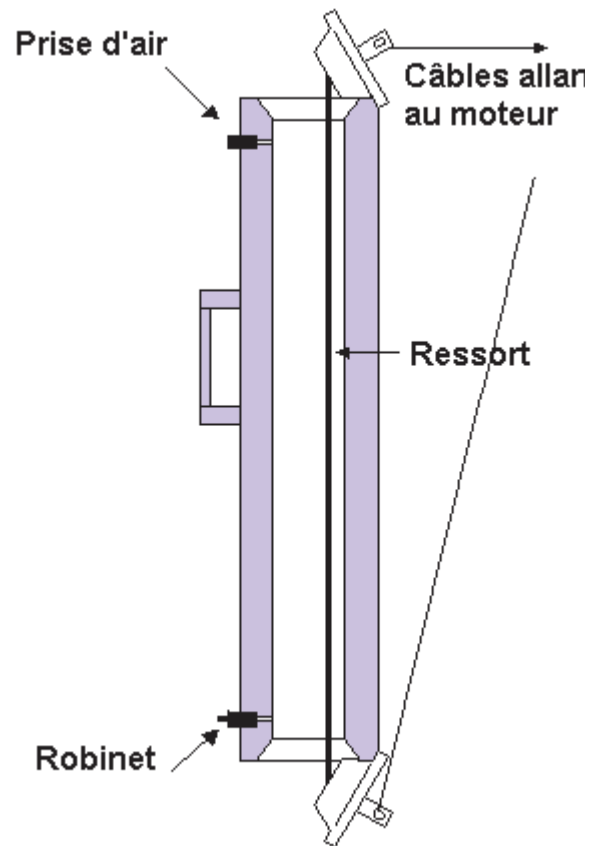
où :  $\gamma' = + 2.184 \text{ E-6 m/s}^2/\text{décibar}$

et :  $g(0) = 9.780318 (1.0 + 5.2788 \text{ E-3 } \sin^2 \phi + 2.36 \text{ E-5 } \sin^4 \phi)$

## XIV - BATHYSONDE



Bathysonde MK5 avec rosette du LPO (Laboratoire de Physique des Océans).



Principe d'une bouteille de prélèvement Sa fermeture a lieu lorsque le moteur libère les câbles allant sur les bouchons.

La sonde est le cylindre en bas à gauche. C'est une CTDO2 fabriquée par Neil Brown. Le cylindre à sa droite est un pinger. Le pinger émet une impulsion acoustique toutes les secondes (ou toutes les  $n$  secondes). Cette impulsion est émise dans toutes les directions. Une partie se dirige directement vers la surface, une autre vers le fond qui la réfléchit. A bord du navire la mesure du temps qui sépare l'impulsion reçue directement de celle réfléchié fourni la distance entre la sonde et le fond. Au-dessus, deux rosettes de 16 bouteilles de prélèvements sont superposées. Le tout est monté dans un châssis en tube d'inox.

Les capteurs, vus précédemment, peuvent être associés à une électronique d'acquisition qui est placée dans une enceinte étanche résistant à la pression. L'ensemble ainsi constitué est appelé « bathysonde » ou même simplement « sonde ». Une bathysonde est équipée au moins d'un capteur de conductivité, d'un capteur de température et d'un capteur de pression. Il s'agit alors d'une sonde « CTD ». Ce sigle vient de l'anglais (**C**onductivity, **T**emperature and **D**eepth sensors), c'est pourquoi cet appareil est couramment appelé CTD ou phonétiquement « Sitidi ».

Lors de son utilisation, la bathysonde est fixée à l'extrémité d'un câble. A partir d'un navire à l'arrêt, elle est descendue jusqu'à une immersion choisie (généralement jusqu'à une dizaine de mètres du fond) en dévirant le câble du tambour d'un treuil. Elle est ensuite remontée. Cette opération est désignée sous nom de station.

Pendant la descente et la remontée les mesures sont enregistrées dans une mémoire interne à la sonde ou transmises à bord. Dans ce cas il faut utiliser un câble électroporteur. C'est un câble d'acier anti-giratoire dont l'âme est un conducteur isolé. Il permet d'alimenter en courant l'électronique de la sonde et de recevoir en retour les données. Il est également possible de transmettre des ordres à la sonde ou à des appareils qui lui sont associés. Comme il faut assurer la continuité électrique pendant que le câble se déroule ou s'enroule sur le tambour du treuil, un système de contacts tournants est fixé à une extrémité de l'arbre du tambour.

Il est intéressant de prélever des échantillons d'eau de mer à différentes profondeurs pour les analyser afin de contrôler le bon fonctionnement des capteurs, d'affiner leur étalonnage et d'obtenir après analyse une mesure des paramètres physiques ou chimiques pour lesquels il n'existe pas de capteurs. Pour cela il faut ajouter à la bathysonde un système de bouteilles de prélèvement. Ces bouteilles sont placées verticalement les unes à côté des autres en formant un cercle autour du moteur qui commande leur fermeture. Cette disposition fait que ce système s'appelle une « rosette ». Les bouteilles sont descendues ouvertes à leur partie supérieure et inférieure. Pendant la remontée, une commande est envoyée au moteur pour les fermer à des immersions choisies (le moteur est télécommandé depuis le navire par un signal qui passe dans le câble électroporteur).

La sonde descend et remonte à une vitesse de l'ordre d'un mètre par seconde. Le navire est immobilisé longtemps quand la sonde est à la mer. Une station à 3600 mètres dure plus de deux heures. Des techniques permettant de gagner du temps sont recherchées.

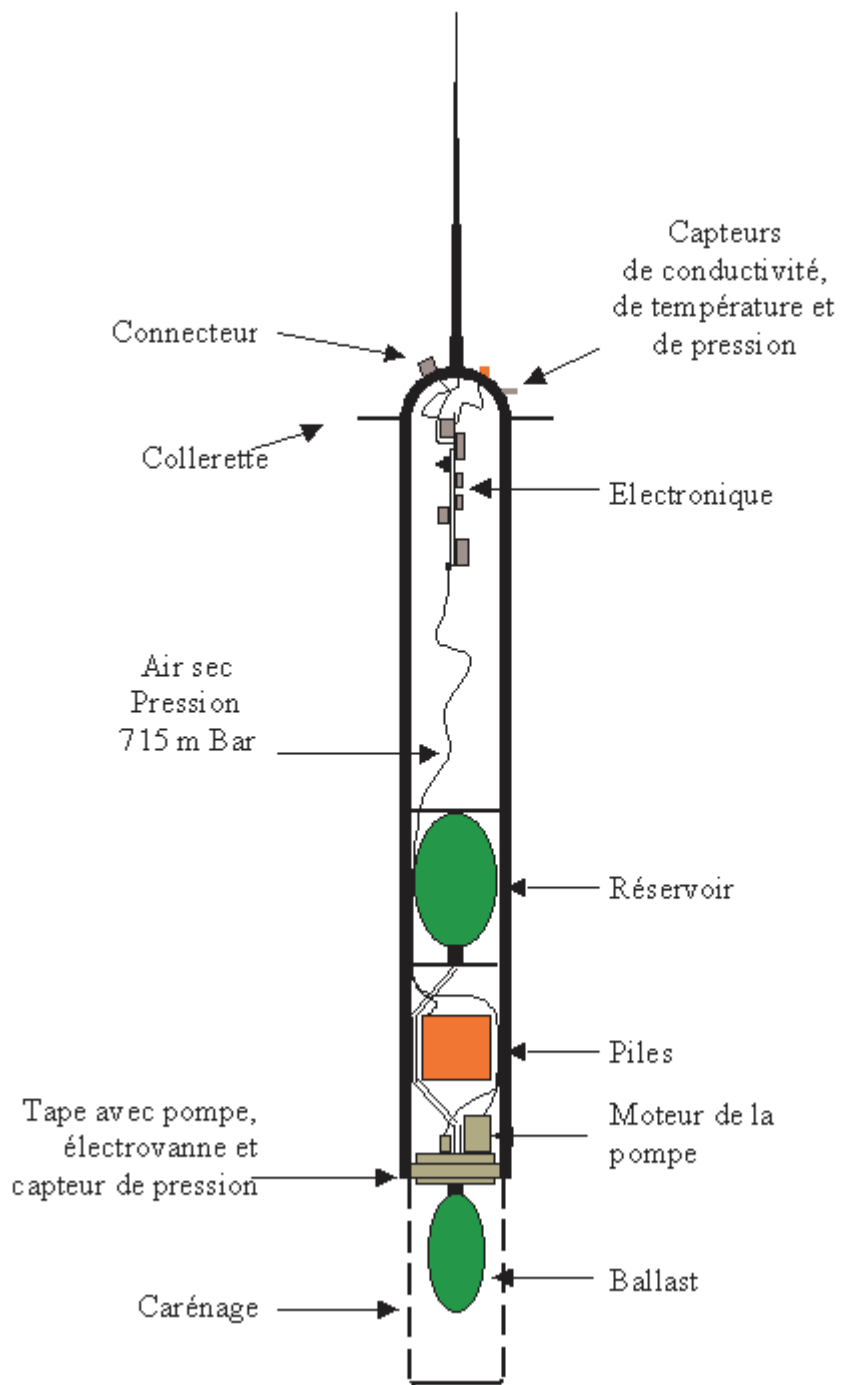
Sondes perdables : C'est une solution moins précise et très onéreuse.

Poisson remorqué : La sonde est placée dans un engin remorqué derrière le navire. Il est possible de commander son immersion et de le faire évoluer entre la surface et quelques centaines de mètres. Le câble électroporteur doit être profilé, il ne peut s'enrouler que sur une couche sur le tambour du treuil. Le treuil devient complexe et encombrant. L'immersion maximale est limitée.

Sondes autonomes : Ces sondes ne sont plus liées au navire par un câble

1) Classique. Après sa mise à l'eau elle plonge jusqu'à atteindre l'immersion voulue. Sa récupération en surface peut poser des problèmes la nuit, par mauvaise visibilité ou par mauvais temps.

2) Perdable (Provor). Cet appareil passe la majeure partie de son temps à une immersion choisie. A partir des positionnements en surface il fournit une approximation du courant à son immersion. Avant de remonter à la surface il plonge et remonte en mesurant un profil en température et conductivité.



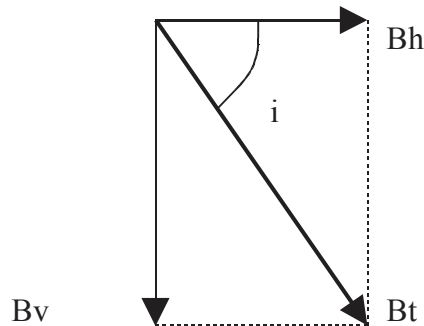
FLOTTEUR PROVOR

## XV - MESURE EULERIENNE DES COURANTS MARINS

### XV - 1 - MESURE DE LA DIRECTION DES COURANTS MARINS

La direction des courants marins est obtenue en mesurant l'orientation du courant par rapport au nord magnétique. Pour cela il faut mesurer 2 angles :

- celui du courant par rapport à l'appareil,
  - celui de l'appareil par rapport au nord magnétique,
- et en faire la différence.



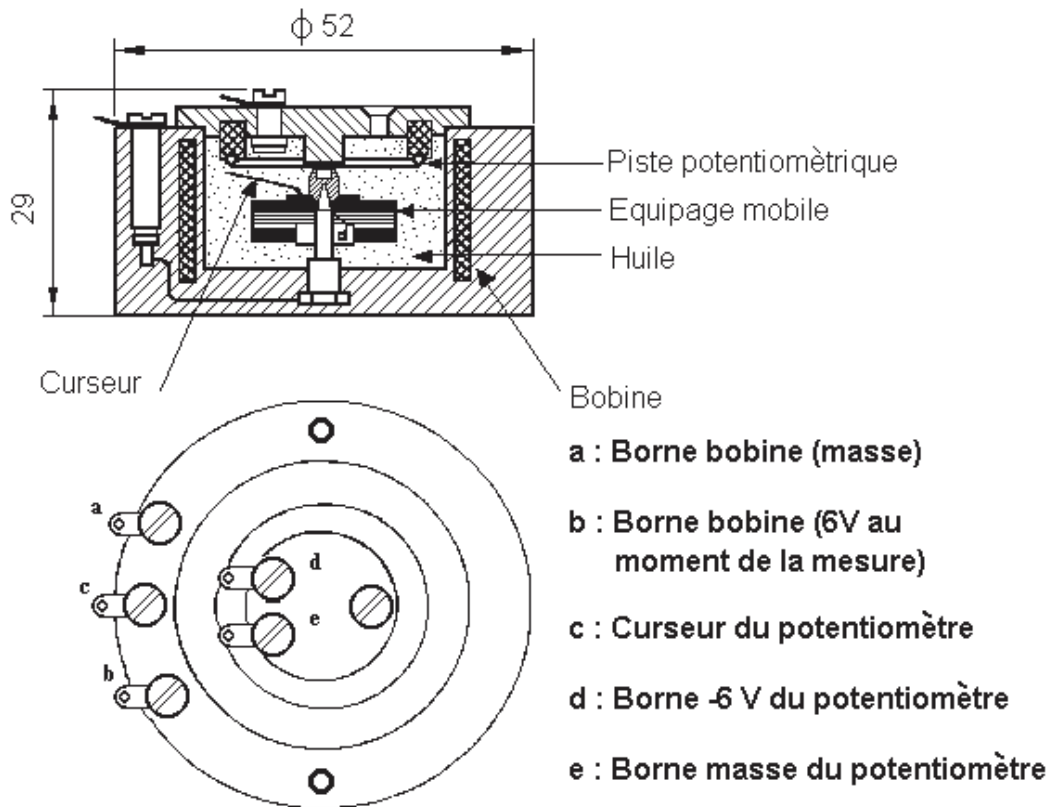
Le champ magnétique terrestre  $B_t$  est faible, d'environ  $46 \cdot 10^{-6}$  Tesla à Paris. Seul sa composante horizontale  $B_h$  donne la direction du nord magnétique (comme  $i \cong 64^\circ$ , toujours à Paris,  $B_h \cong B_t \cos(i)$  ce qui donne  $B_h = 20 \cdot 10^{-6}T$ ). La mesure de l'angle entre l'appareil et cette composante nécessite des capteurs sensibles. La mesure sera impossible à proximité des pôles magnétiques et aucun courantomètre ne permettra d'y mesurer les courants.

La direction du courant peut être mesurée à l'aide d'une petite girouette qui donne la direction du courant par rapport à l'appareil. Il est aussi possible d'orienter l'appareil dans le courant en utilisant une dérive. Dans ce cas, l'ensemble doit pouvoir pivoter librement. Enfin il est possible de déduire la direction du courant par rapport à l'appareil à partir de la mesure des 2 composantes horizontales du courant.

Ensuite l'orientation de l'appareil par rapport au nord magnétique est mesurée, soit directement à l'aide d'un compas, soit en la déduisant de la mesure de deux composantes horizontales du champ magnétique terrestre.

### XV - 1.1 - Compas magnétique à équipage mobile

Un ou deux barreaux aimantés couplés sont montés sur un système pouvant pivoter. L'ensemble tournant ainsi constitué s'appelle "l'équipage mobile". Il est équilibré sur le plan horizontal. Il s'oriente suivant la composante horizontale du champ magnétique terrestre. Il est immergé dans un liquide (alcool, glycol...) qui amortit ses éventuels mouvements d'oscillations.



**Compas à équipage mobile et lecture potentiométrique - modèle Anderaa n° 1248.**

#### XV - 1.1.1 - Compas magnétique à équipage mobile et potentiomètre

L'équipage mobile est parfois couplé à un potentiomètre à micro friction mais il est plus couramment monté sur un système pivot crapaudine. Il est équilibré pour que les aimants restent bien horizontaux. Il est solidaire d'un curseur qui ne s'applique sur la piste du potentiomètre qu'au moment de la mesure... C'est le cas est du compas 1248 utilisé dans les courantomètres Aanderaa. Dans ce compas, au moment de la mesure, une bobine crée un champ magnétique vertical qui fait basculer l'équipage mobile et plaque le curseur sur la piste du potentiomètre. Entre chaque mesure, l'alimentation de la bobine est coupée et le champ magnétique vertical s'annule. L'équipage mobile est à nouveau libre de s'orienter vers le nord magnétique.



## XV - 1.1.2 - Compas magnétique à équipage mobile et codage optique

L'équipage mobile est solidaire d'un disque ayant un codage optique. Il utilise un code binaire particulier appelé code Gray ou code binaire réfléchi. Ce code a la particularité, pour n'importe quel nombre, de ne voir qu'un de ses bits changer d'état lorsque que ce nombre passe à la valeur immédiatement supérieure ou inférieure ce qui n'est pas le cas du code binaire pur (cf. tableau ci dessous). Lorsqu'un bit est à un le disque codé laisse passer la lumière, lorsqu'il est à zéro, il empêche son passage. Un système optique vient lire l'état des bits et donc la valeur de l'angle entre l'appareil et le nord.

Décimal	Binaire pur	Binaire réfléchi
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1100
13	1101	1101
14	1110	1001
15	1111	1000

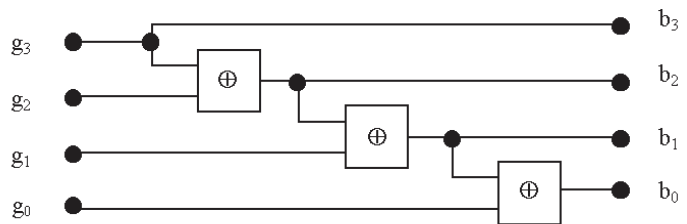


Schéma de principe d'un circuit de conversion du code Gray en code binaire pur à l'aide de portes OU exclusives.

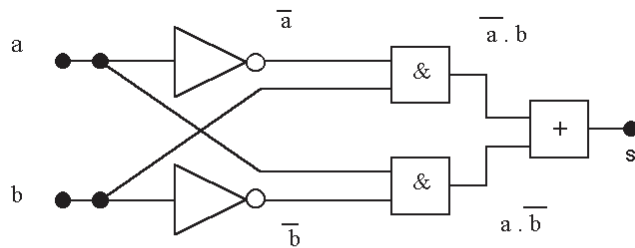
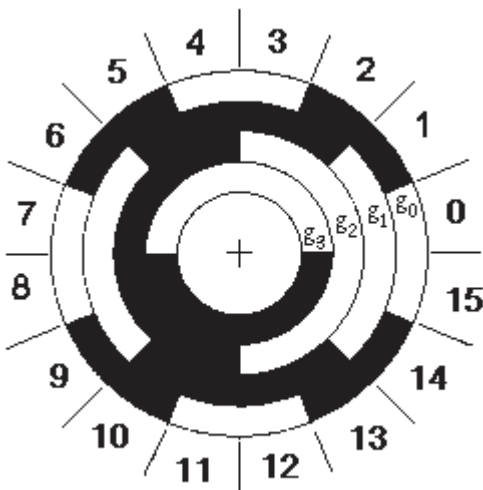


Schéma de principe d'une porte « OU » exclusive



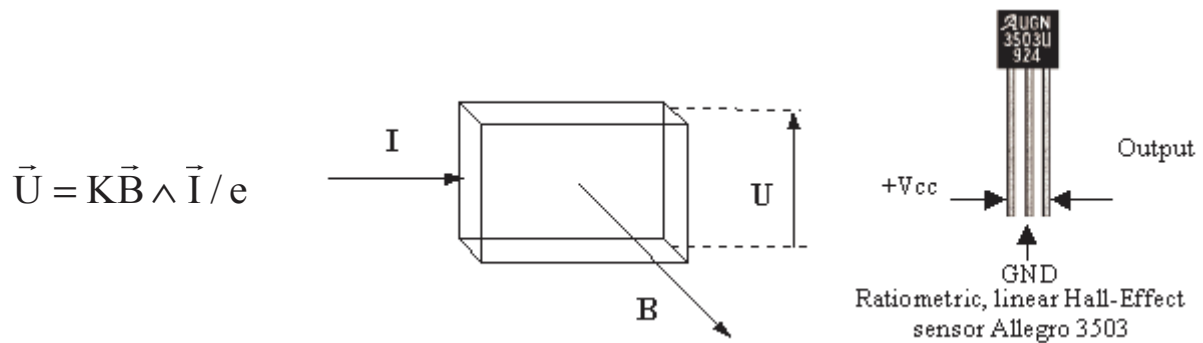
Le disque ci-contre est codé en binaire réfléchi sur les 16 secteurs de ses 4 pistes. Pour chaque valeur 0 la piste est transparente, pour chaque valeur 1 elle est opaque (ou l'inverse). Un système optique composé d'un émetteur de lumière et d'un récepteur (photodiode ou phototransistor) vient lire, suivant un rayon, la valeur de chaque secteur. L'erreur de lecture reste inférieure à un secteur. En pratique, pour avoir une meilleure résolution, le nombre de pistes et de secteurs est plus élevé.

Il existe pour d'autres domaines des codeurs angulaires qui utilisent ce même principe.

## XV - 1.1.3 - Compas à effet Hall

## Capteur à effet Hall

Reportons nous au schéma ci-dessous : Lorsqu'un courant électrique circule du bord gauche au bord droit d'une mince plaque en matériau semi-conducteur, les charges élémentaires (électrons ou positons) qui composent ce courant sont déviées par le champ magnétique  $B$  perpendiculaire à la plaque. Cette déviation fait apparaître une tension  $U$ , (positive ou négative) entre le bas et le haut de la plaque, qui s'exprime :



avec :

- K** : constante de Hall (varie avec le matériau utilisé ; peut être  $> 0$  ou  $< 0$ ),
- B** : induction magnétique,
- I** : intensité du courant dans la plaque,
- e** : épaisseur de cette plaque.

Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Hall.

En pratique, ces capteurs se présentent sous la forme d'un composant assez plat qui ressemble à un transistor de faible puissance (voir composant "linear Hall-Effect sensor Allegro 3503" ci-dessus).

Compas à effet Hall :

Le compas se compose d'un rotor aimanté monté sur des pivots de saphir. Ce rotor s'oriente suivant la composante horizontale du champ magnétique terrestre. Son orientation, et donc la direction du nord magnétique, est obtenue en utilisant 4 capteurs à effet Hall placés autour du rotor à  $90^\circ$  les uns des autres comme sur le schéma ci-après.

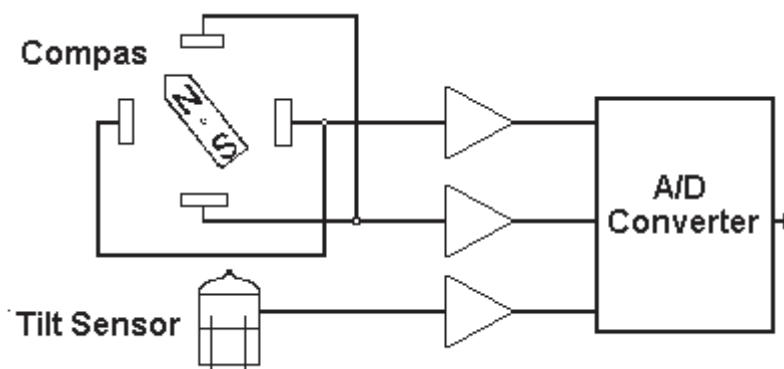
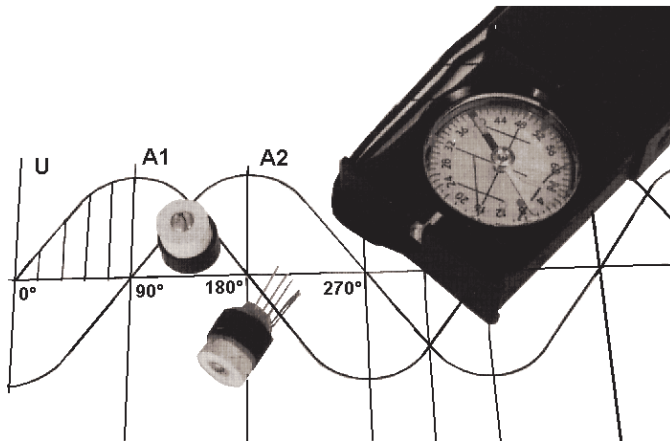
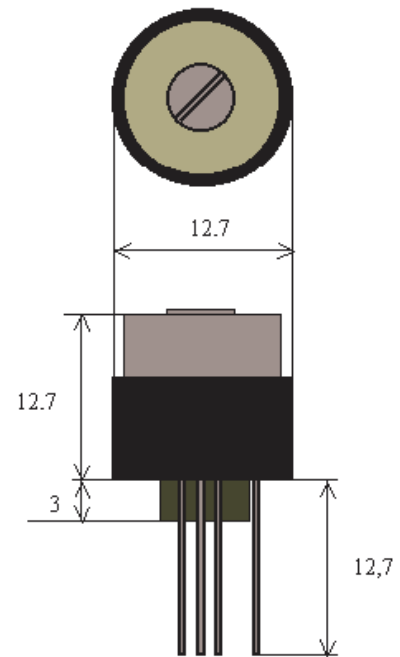


Schéma de principe du compas à effet Hall du courantomètre Aanderaa RCM9<sup>(4)</sup>

<sup>(4)</sup> D'après Transactions/Journal : OCEAN 96, Vol 1, Issue 1



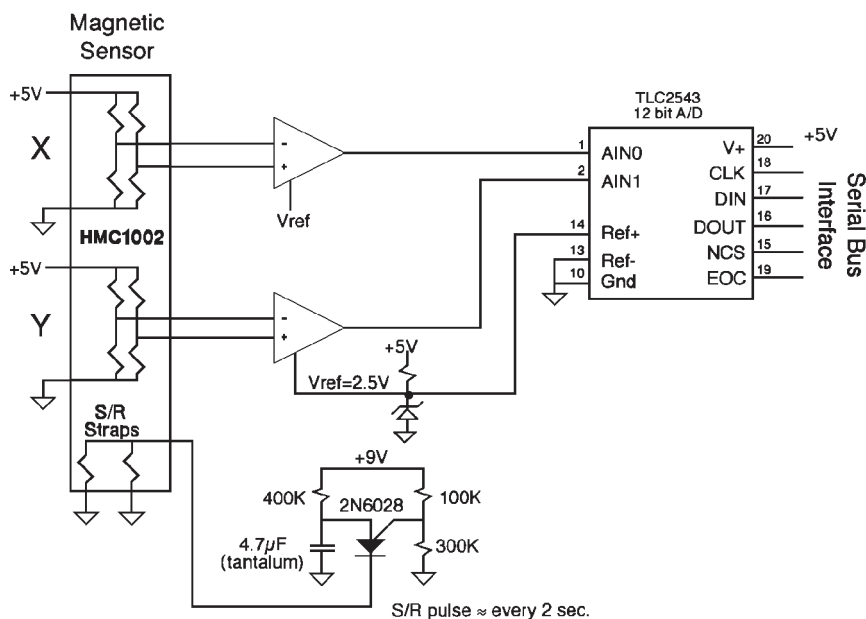
**Compas à équipement mobile dont l'orientation est mesurée par 4 capteurs à effet Hall**



### XV - 1.3 - Compas magnéto-résistifs

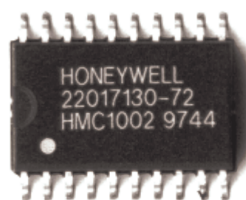
Un capteur magnéto-résistif est constitué de fines bandes de permalloy (80% de Ni et 20% de Fe) dont la résistance varie sous l'effet d'un champ magnétique. Ces résistances sont montées dans deux ponts orientés à 90 degrés l'un de l'autre. Le capteur ainsi constitué a une bonne sensibilité et se présente sous la forme d'un circuit intégré.

Les capteurs récents ont une sensibilité inférieure à 0.1 milligauss, ils ont un temps de réponse inférieur à 1 microseconde. Ils permettent d'obtenir une mesure du champ magnétique terrestre précise au degré. La mesure peut se faire 1000 fois par seconde.



**Exemple :** Compas digital réalisé à partir du circuit intégré (CMS) Honeywell HMC1002.

(Applications of Magnétoresistive Sensors in Navigation Systems. M. Caruso. Honeywell Inc)



HMC1002

V alim 5 V  
 R pont 850 Ω  
 Gamme -2.2 à +2.2 Gauss  
 Sensibilité 2.5 mV/V/Gauss  
 Résolution 40 µ Gauss  
 Linéarité 2% PE

### XV - 1.4 - Compas magnétométriques

Comme dans le cas précédent, deux magnétomètres mesurent les deux composantes horizontales  $B_x$  et  $B_y$  du champ magnétique terrestre. Exception faite pour de très simples et robustes montages sur cardan, ils ne comportent pas de pièces mobiles.

Un magnétomètre peut être constitué d'un tore en matériau ferromagnétique à haute perméabilité et faible champ de saturation. Deux bobines sont placées autour du tore. La première est alimentée par un courant continu. Pour des courants faibles, l'induction magnétique à l'intérieur du tore est directement proportionnelle à ce courant :

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N}{L} I$$

Où  $\mu_0$  est la perméabilité absolue ( $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ ),  $\mu_r$  est la perméabilité relative, ordre de grandeur  $10^4$ ,  $N$  est le nombre de tour du fil de la bobine,  $L$  la longueur moyenne du tore et  $I$  le courant dans la bobine.

Passé une certaine valeur, si le courant continue à augmenter, l'induction magnétique croît de moins en moins jusqu'à la saturation du circuit magnétique où l'on a :

$$\Delta B = \mu_0 \frac{N}{L} \Delta I$$

Le courant  $I_1$  dans cette première bobine est ajusté pour se situer entre le début et la fin de la saturation du tore (au milieu du coude de saturation).

Un courant alternatif d'amplitude  $I_a$  de fréquence élevée est superposé au courant continu  $I_1$ . Le courant dans la première bobine est donc :

$$I = I_1 + I_a \sin(\omega t)$$

Ce courant produit un champ magnétique continu avec superposition d'un champ alternatif dans le tore. Seul le champ magnétique alternatif induit une tension  $V_s$  dans la deuxième bobine

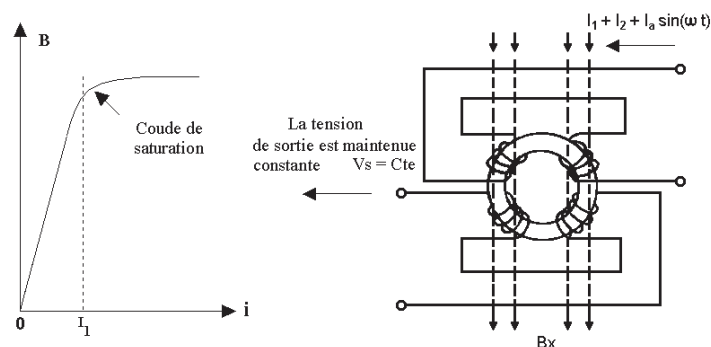
$$V_s = - d\Phi/dt \text{ avec } \Phi = B S$$

Remarquons que cette tension alternative n'est pas parfaitement sinusoïdale.

Si un champ magnétique continu  $B_x$  extérieur au système s'ajoute à celui qui passe dans la deuxième bobine cela augmente la saturation et la tension  $V_s$  diminue (et inversement). En fait la tension  $V_s$  est maintenue constante par un système d'asservissement électronique qui diminue le courant dans la première bobine de  $I_2$  et nous avons :

$$I = I_1 - I_2 + I_a \sin(\omega t) \quad \text{et} \quad B_x = K I_2$$

Ce courant  $I_2$  est donc directement proportionnel au champ magnétique  $B_x$  extérieur au tore magnétique. Il en serait de même si ce champ était dans l'autre sens. Pour connaître l'intensité de ce champ magnétique, qui pour nous est une des composantes horizontales du champ magnétique terrestre, il suffit de mesurer ce courant  $I_2$ . En pratique, dans un magnétomètre, il n'y a une paire de bobines mais deux paires de bobines comme sur le schéma ci-après.



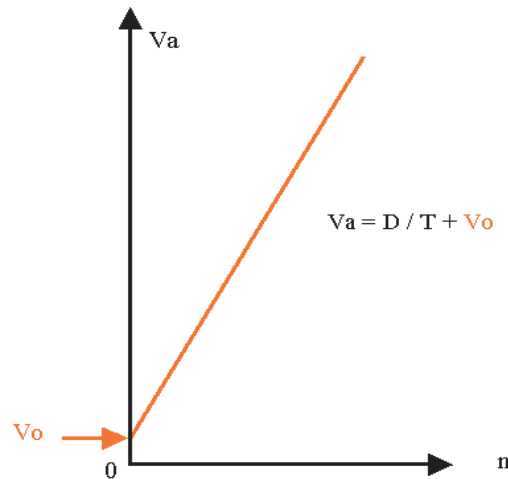
**Principe d'un magnétomètre**

## XV - 2 - MESURE DE LA VITESSE DES COURANTS MARINS

### XV - 2.1 - Capteurs tournants

Ils mesurent le déplacement moyen des particules d'eau  $D$  pendant un temps  $T$  ce qui donne une vitesse mesurée :

$$V_a = D / T + V_o$$

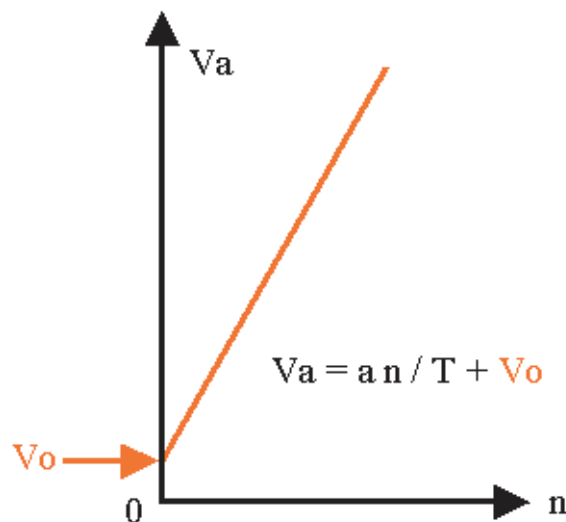


Où, comme " $D$ " correspond à " $n$ " tours du capteur tournant :

$$V_a = a n / T + V_o$$

" $a$ " est un coefficient de proportionnalité qui dépend du capteur utilisé.

" $V_o$ " est appelé seuil de démarrage, désignation qui n'est pas rigoureuse ;  $V_o$  est en fait l'ordonnée à l'origine de cette droite.  $V_o$  est dû au frottement du système pivots-crapaudines du capteur.



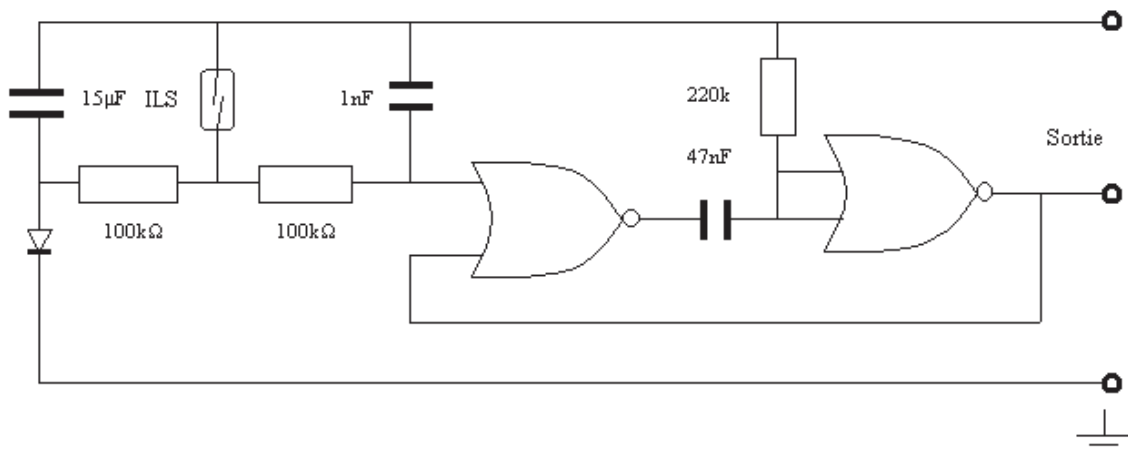
**NOTES :****Interrupteur à lame souple (ILS)**

Deux lamelles en métal magnétique non rémanent sont placées dans l'axe d'une petite ampoule de verre de forme cylindrique aux extrémités arrondies (voir figure ci-dessous). Au milieu de l'ampoule, les 2 lamelles sont légèrement écartées l'une de l'autre. Lorsqu'elles sont soumises à un champ magnétique relativement important, elles s'aimantent et, en s'attirant, viennent en contact. Le contact ne s'établit pas franchement, il présente des rebonds pendant environ 1 ms. Quand le champ magnétique passe en dessous d'une certaine valeur l'élasticité des lamelles les écarte et le contact est interrompu.

En anglais ce composant s'appelle « reed switch » ce qui est souvent mal traduit en français par « relais reed ».



Interrupteur à lames souples (ILS)



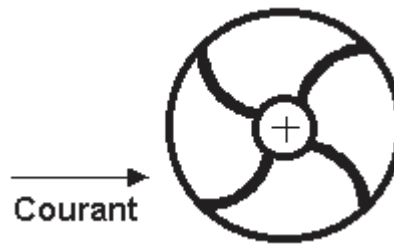
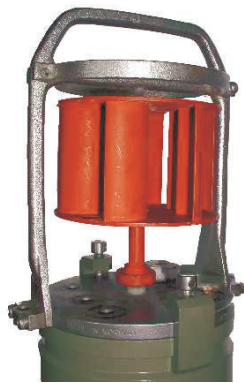
EXEMPLE DE MONTAGE ANTI REBOND POUR ILS

Utilise 2 portes NOR4001

XV - 2.1.1 - Rotor de Savonius

Le rotor de Savonius<sup>2</sup> est un modèle de capteur de vitesses simple. Il est réalisé en matière plastique, ses pivots et crapaudines sont étudiés pour diminuer le frottement au maximum. La relation qui lie la vitesse du courant à la vitesse angulaire du rotor est linéaire dans le domaine qui nous intéresse (de 0,01 m/s à 2,5 m/s). Ce capteur n'est pas sensible aux mouvements suivant son axe de rotation (mouvements verticaux de pilonnement) et il est peu affecté par son inclinaison, tant qu'elle reste faible puisque la vitesse mesurée est le produit de la vitesse du courant par le cosinus de l'angle d'inclinaison.

<sup>2</sup> Breveté par l'ingénieur finlandais Savonius en 1920



**ROTOR DE SAVONIUS**

Les lois de la dynamique des fluides sont les mêmes dans l'eau et dans l'air ce qui nous permet de réaliser les essais suivants :

Prenez un appareil à rotor de Savonius. Au repos, s'il n'y a pas de courants d'air, celui-ci ne tourne pas. Déplacez-le. Il se met rapidement en rotation. Posez l'appareil : le rotor continue à tourner pendant quelques secondes : Il a donc une faible constante de temps pour s'accélérer et une grande pour se ralentir. Ceci peut fausser les mesures.

Maintenant, considérons le cas d'un courant dont la vitesse varie lentement. A celui-ci se superpose un courant alternatif de courte période produit par la houle, les ondes internes ou plus généralement la turbulence. Dans ce cas, le rotor de Savonius, au lieu de mesurer une vitesse moyenne, mesure une vitesse supérieure. A la limite, comme ce rotor n'est pas directif, il peut mesurer la vitesse maximum d'un courant alternatif dont la valeur moyenne est nulle. Ce phénomène est facile à visualiser : Prenez en main un courantomètre à rotor de Savonius et, sans vous déplacer, balancez le à bout de bras Il se met à tourner alors que la vitesse moyenne est nulle. Il faut donc éviter de l'utiliser dans les mouillages avec flottabilité de surface ou à proximité de la surface.

Pour mesurer la vitesse angulaire du rotor en le freinant le moins possible, 2 méthodes sont utilisées :

- Un ou des aimants sont fixés au rotor. Ils créent un champ magnétique tournant suffisant pour fermer un interrupteur à lames souples (voir notes ci-après) lorsqu'ils passent à proximité de celui-ci. L'interrupteur à lames souples délivre alors des impulsions dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor.
- La transmission du mouvement de rotation du rotor à l'intérieur de l'enceinte étanche peut être réalisée par un couplage magnétique entre les aimants du rotor et un ou deux aimants tournants à l'intérieur de l'enceinte. Ces derniers peuvent comme précédemment commander un ILS ou entraîner un réducteur. Ce réducteur pouvant déplacer le curseur d'un potentiomètre (courantomètre AANDERAA), une dynamo tachymétrique (courantomètre CORNES), un codeur optique (courantomètre RICHARDSON).

#### XV - 2.1.2 - Capteur à hélice

On utilise des hélices à très grand pas Elles sont souvent placées devant l'enregistreur. Leur seuil de démarrage est du même ordre de grandeur que celui du rotor de Savonius.



### XV - 2.1.3 – Panémone

Afin de palier à certains défauts du rotor de Savonius il est préférable d'utiliser un rotor à palettes dans une demi-cage ou panémone. Le rotor mesure une vitesse plus proche de la vitesse moyenne du courant. Son seuil de démarrage est identique au précédent (5 cm/s) et sa vitesse angulaire est proportionnelle à la vitesse du courant.



### XV - 2.2 - Courantomètre à capteur tournant

En France, un appareil de mesure des courants marins à lecture directe était appelé "courantomètre" et un appareil à enregistrement autonome "courantographe". Ces désignations, logiques en français, ont été progressivement remplacées par le seul mot de "courantomètre". Cela est dû à l'influence des pays de langue anglaise qui les désignent sous le nom de "current meter" et au fait que les appareils à lecture directe sont moins utilisés.

Un courantomètre (ex courantographe) est un appareil dans lequel sont associés la mesure de la direction du courant et celle de sa vitesse.

Les capteurs tournants ne mesurent pas directement le module de la vitesse du courant mais la longueur moyenne du déplacement des molécules d'eau "D" pendant une période "T". Ce qui donne un module "approché" de la vitesse :

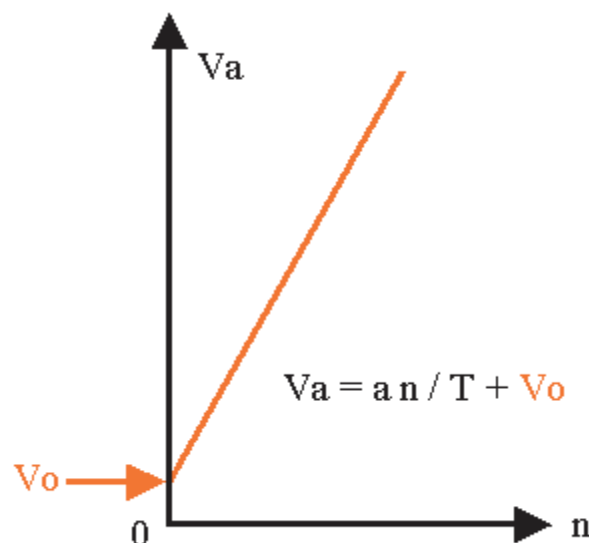
$$V_a = D / T + V_o$$

Où, comme "D" correspond à "n" tours du capteur tournant :

$$V_a = a n / T + V_o$$

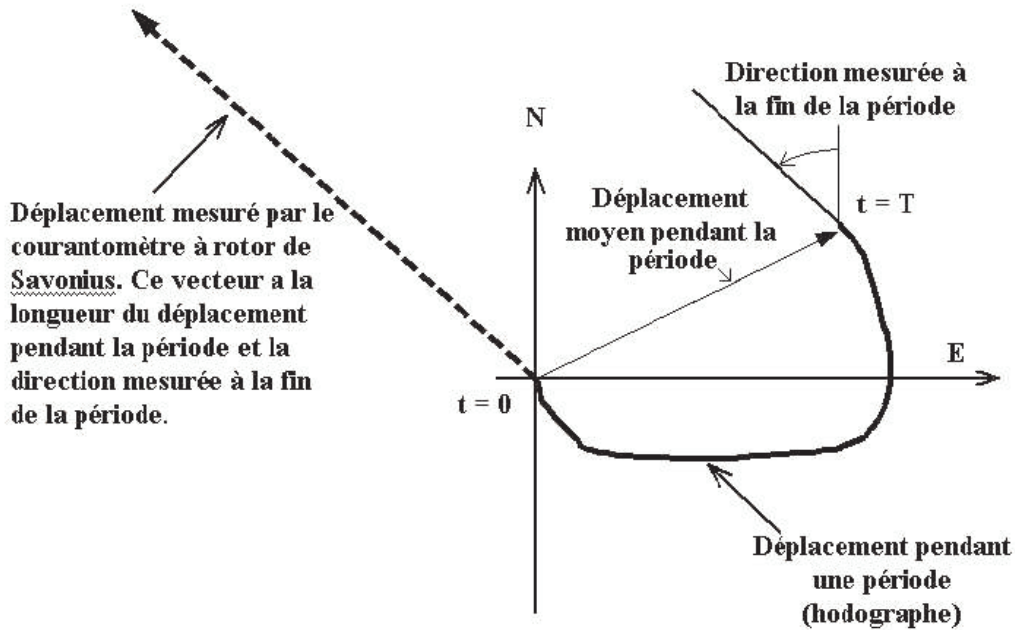
"a" est un coefficient de proportionnalité qui dépend du capteur utilisé.

"V<sub>o</sub>" est appelé seuil de démarrage, désignation qui n'est pas rigoureuse ; V<sub>o</sub> est en fait l'ordonnée à l'origine de cette droite. V<sub>o</sub> est dû au frottement du système pivots-crapaudines du capteur.

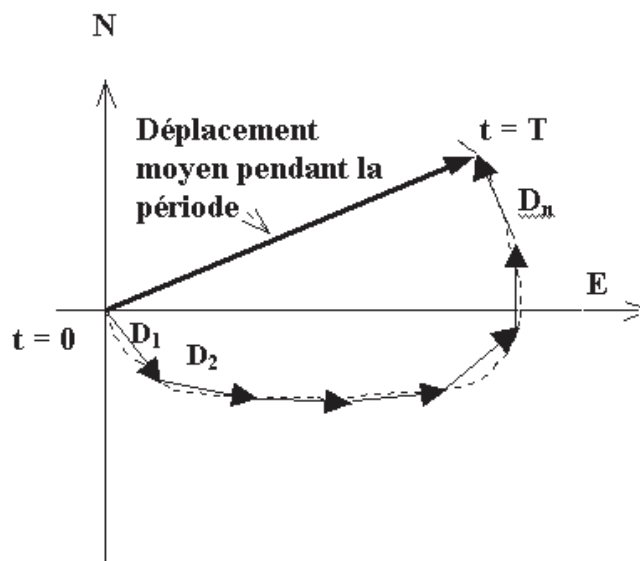


### XV - 2.3 - Différentes méthodes de mesure des courants à l'aide de capteurs tournants

Certains appareils à rotor de Savonius comme les RCM4 et RCM5 de chez Aanderaa mesurent et enregistrent le déplacement de l'eau pendant toute la période qui sépare 2 acquisitions et la direction instantanée du courant au moment de l'acquisition. Il peut en résulter des erreurs importantes comme présentées sur le schéma ci-dessous. Afin de palier à ces erreurs d'autres courantomètres mesurent fréquemment la longueur et la direction du déplacement de l'eau. Ils font la somme vectorielle de ces déplacements et enregistrent périodiquement la valeur du vecteur résultant. La somme est effectuée soit à des intervalles de temps réguliers, soit à des déplacements constants comme sur le schéma présenté ci-dessous. Ces appareils sont appelés « VACM » pour Vector Average Current Meter.



Déplacement réel, moyen et mesuré pendant une période de mesure.



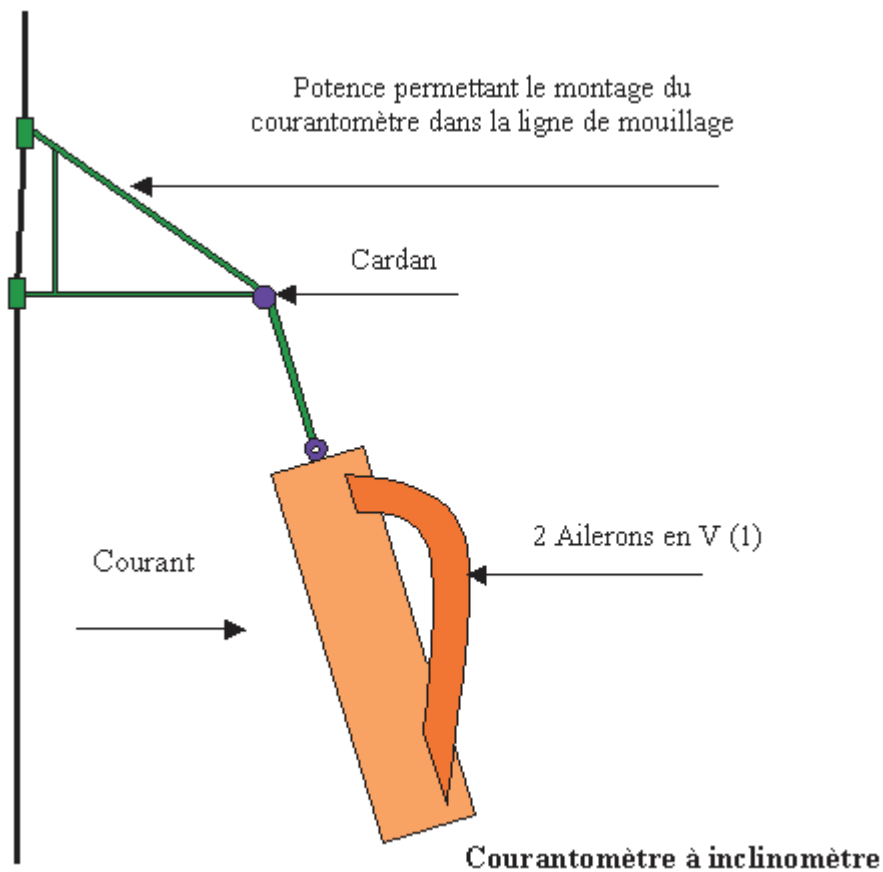
Approche du déplacement moyen pendant une période (somme vectorielle)

## XV - 2.4 - Capteurs statiques

### XV - 2.4.1- Inclinomètre

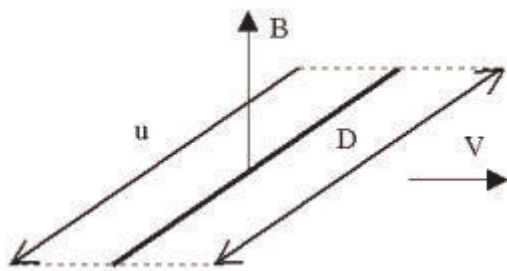
Une potence est placée dans la ligne de mouillage et le courantomètre est fixé à son extrémité. L'appareil est libre de pivoter et de s'orienter en tout sens. Il est généralement de forme cylindrique. Il est pesant dans l'eau et son axe reste vertical en l'absence de courant marin. S'il y a un courant, celui-ci va exercer une force de traînée sur le corps de l'appareil qui va s'incliner. Un système d'ailerons (1) l'oblige à s'orienter dans le courant. L'inclinaison va dépendre de la vitesse du courant. Elle est mesurée par un inclinomètre. La vitesse du courant peut être déduite de cette mesure.

Le principe de l'inclinomètre utilisé est très simple : Le corps d'un potentiomètre à micro friction est solidaire de l'appareil. Une masse, fixée à l'extrémité d'un balancier, le maintient vertical en faisant tourner l'axe du potentiomètre (cet axe est perpendiculaire à la direction du courant). Son curseur se déplace sur la piste. La tension fournie par le potentiomètre est proportionnelle à l'inclinaison de l'appareil.



### XV - 2.4.2 - Capteur électromagnétique

Principe : une bobine crée un champ d'induction magnétique alternatif au voisinage des électrodes. L'eau qui se déplace entre ces deux électrodes coupe le champ d'induction magnétique. Une tension apparaît donc entre deux points quelconques du fluide conducteur (eau de mer), donc entre les deux électrodes suivant la loi :



$$u = - B \sin (\omega t) D V$$

$u$  : tension induite en volts

$B$  : induction magnétique en Tesla

$D$  : distance entre les 2 électrodes en m

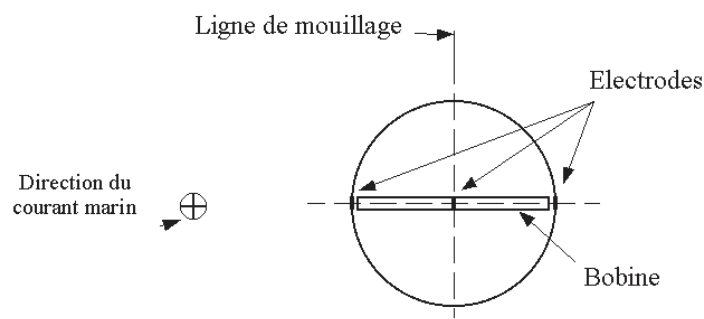
$V$  : vitesse du courant marin

Dans cette formule les 2 termes  $B$ ,  $D$  sont constants, la tension (alternative) induite est donc proportionnelle à la vitesse  $V$ .

Un tel système est utilisé dans les courantomètres S4 d'Inter Ocean.

Cet appareil se présente sous la forme d'une sphère de diamètre  $D$ . Quatre électrodes sont placées dans son plan équatorial. Une bobine plate à axe vertical est dans ce même plan. Elle crée un champ magnétique alternatif. Si le courant marin  $V$  est perpendiculaire à la vue ci-dessous, la tension entre l'électrode de gauche et celle de droite est :

$$u = B \sin (\omega t) D V$$

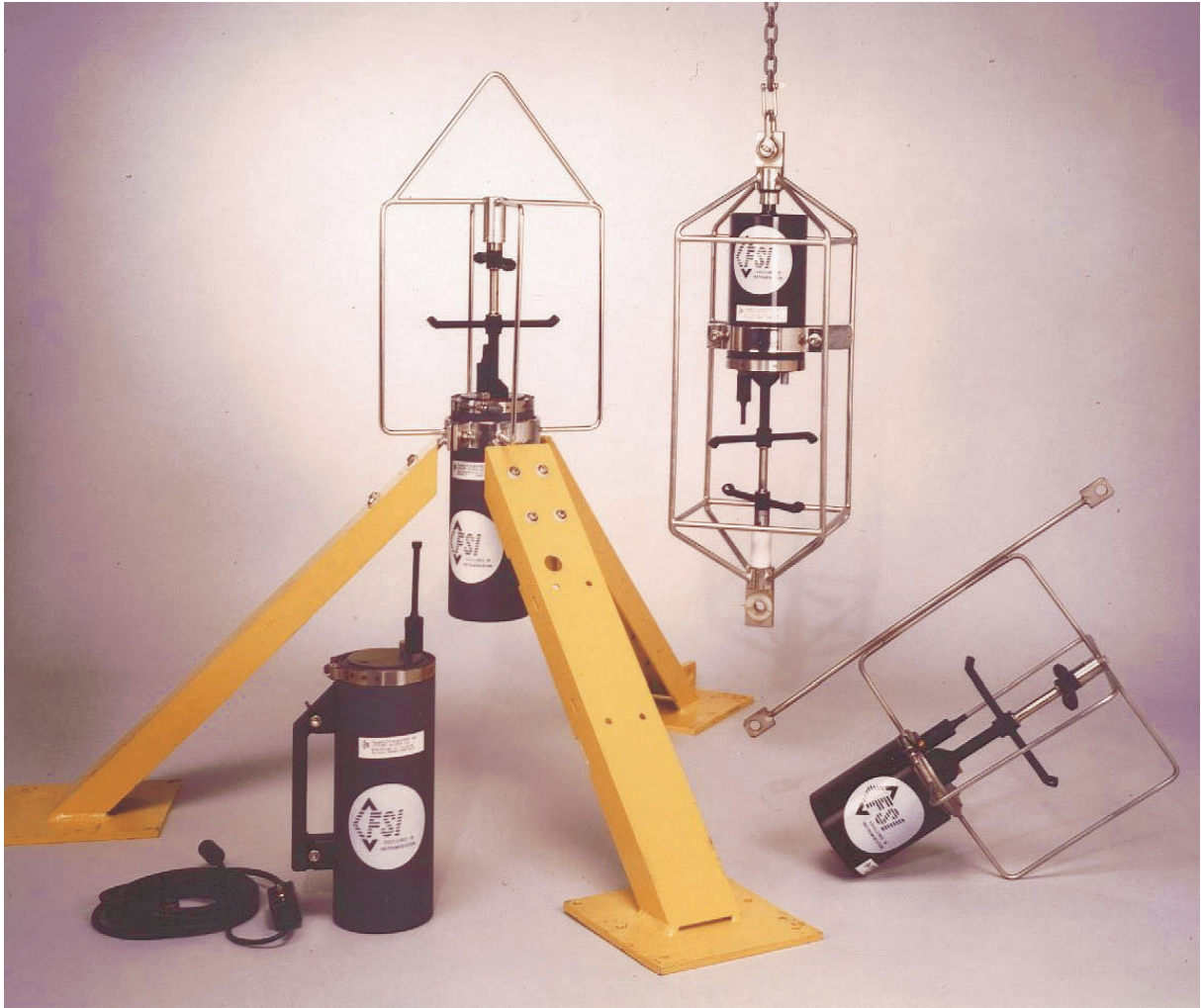


#### Schéma de principe d'un courantomètre électromagnétique

Chaque paire d'électrodes mesure une des 2 composantes horizontales du courant marin relatif à l'appareil.

### XV - 2.4.3 - Capteur acoustique

Ils utilisent quatre transducteurs qui peuvent émettre un signal acoustique ou le recevoir. Dans le cas des capteurs de marque FSI, les trois composantes de la vitesse du courant sont déduites de la mesure du temps de propagation des signaux entre les transducteurs.



**Courantomètre à capteur de vitesse acoustique de marque FSI**

#### XV - 2.4.4 - Capteur à effet Doppler

Principe de l'effet Doppler :

Le son est produit par des variations de pression dans les milieux solides, liquides ou gazeux.

Les ondes sonores sont comparables à des vagues. Imaginez-vous sur un bateau au mouillage. Les vagues sont perpendiculaires à l'axe du bateau. Vous voyez passer, par exemple, 8 vagues en 30 secondes. Maintenant, si le bateau fait route dans la direction d'où viennent les vagues, dans le même temps vous verrez passer plus de vagues, la fréquence des vagues vous semblera plus élevée. En allant dans la direction opposée vous rencontrerez moins de 8 vagues dans le même intervalle de temps. Leur fréquence vous semblera plus faible. C'est ce que l'on appelle l'effet Doppler.

Maintenant, au lieu de regarder les vagues vous écoutez une source sonore qui émet un son pur de fréquence  $F$ . L'effet Doppler est la différence  $\Delta F_1$  entre la fréquence  $F$  que vous entendez quand vous êtes immobile et celle que vous entendez lorsque vous vous déplacez à la vitesse  $V$ .

Si  $C$  est la célérité du son, nous avons : 
$$\Delta F_1 = F V / C$$

Mesure du courant par effet Doppler :

Dans un premier temps un transducteur émet, suivant un axe horizontal, un court train d'ondes de fréquence  $F$  appelé « ping ». Aussitôt après ce même transducteur écoute l'écho qui lui revient. Cet écho est dû à la réflexion de l'onde émise par des particules en suspension dans l'eau. Imaginons une particule assez importante pour renvoyer une partie du signal. Si cette particule est immobile, le signal reçu par le transducteur aura la même fréquence que celui qui a été émis. Si un courant marin éloigne la particule la fréquence qu'elle reçoit (qu'elle entend) est affectée du décalage Doppler. Mais comme la distance entre la particule qui réfléchit le signal et le transducteur augmente aussi, le signal de retour est affecté à nouveau d'un même décalage. Par rapport à la fréquence émise, la fréquence retournée au transducteur est donc doublement décalée, ce qui s'exprime sous la forme :

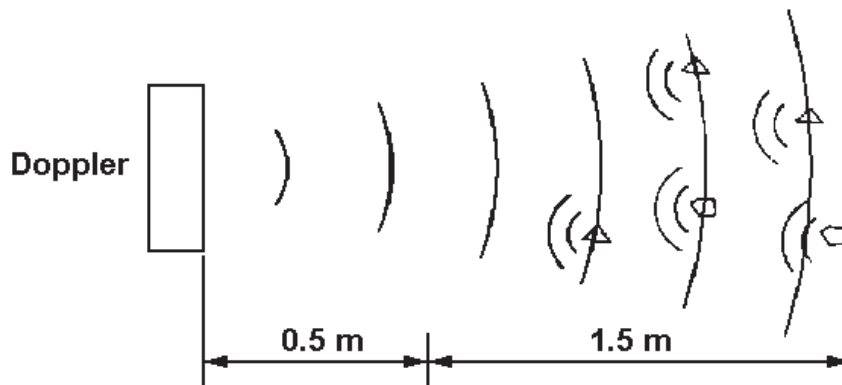
$$\Delta F_2 = 2 F V / C \quad \text{d'où} \quad V = \Delta F_2 C / (2 F)$$

Il suffit donc, dans le plan horizontal, de mesurer ce décalage  $\Delta F_2$  suivant 2 axes normaux pour connaître la composante horizontale du courant. C'est le principe de mesure des capteurs de vitesse de certains courantomètres "à effet Doppler", comme pour le RCM9 de chez Aanderaa.

Exemple : RCM9 Aanderaa

La mesure vectorielle du courant peut être obtenue en utilisant deux transducteurs émettant suivant deux axes horizontaux à 90 degrés l'un de l'autre. Mais pour avoir un capteur symétrique et de meilleure précision, le RCM9 utilise 2 paires de transducteurs. Chaque paire émet suivant le même axe horizontal mais le premier transducteur émet dans un sens et le second dans l'autre. Les faces des transducteurs « voient » donc ce qui se passe des deux côtés comme le dieu romain Janus dont tête a deux visages opposés. C'est pourquoi cette disposition est appelée « Janus ».

Chaque transducteur, l'un après l'autre, émet un ping de 2 MHz pendant 1 ms puis 0.67 ms plus tard il écoute le signal de retour (l'écho) pendant 1ms, ce qui permet de mesurer une composante du courant à une distance du transducteur comprise entre 0.5 m et 2 m. L'angle du faisceau sonore est de  $\pm 2^\circ$ .



### PRINCIPE DE LA MESURE DU COURANT PAR EFFET DOPPLER<sup>(4)</sup>

Caractéristiques :

Vitesse : Echelle de mesure de 0 à 300 cm/s avec une précision  $\pm 2$  cm/s ou  $\pm 2\%$  de la pleine échelle

Direction : Suivant l'inclinaison, erreur de  $\pm 5^\circ$  pour une inclinaison  $< \pm 15^\circ$   
ou de  $\pm 7.5^\circ$  pour une inclinaison de 15 à  $35^\circ$ .

Mesure des profils de courant par effet Doppler :

Le profileur de courant est un appareil qui permet la mesure des courants sur une verticale. Les Américains l'appellent ADCP pour Acoustic Doppler Current Profiler. Nous présentons le principe de fonctionnement des ADCP fabriqués par R D Instruments (voir figure ci-dessous).

Du temps  $t_1$  à  $t_0$ , le profileur émet simultanément un ping sur ses quatre transducteurs. Ceux-ci sont inclinés afin d'émettre 4 faisceaux sonores inclinés de 30 degrés<sup>(5)</sup> par rapport à la verticale. Ensuite, le profileur écoute le signal écho.

Plaçons-nous dans le plan vertical  $xOz$  qui passe par le centre de deux transducteurs opposés.

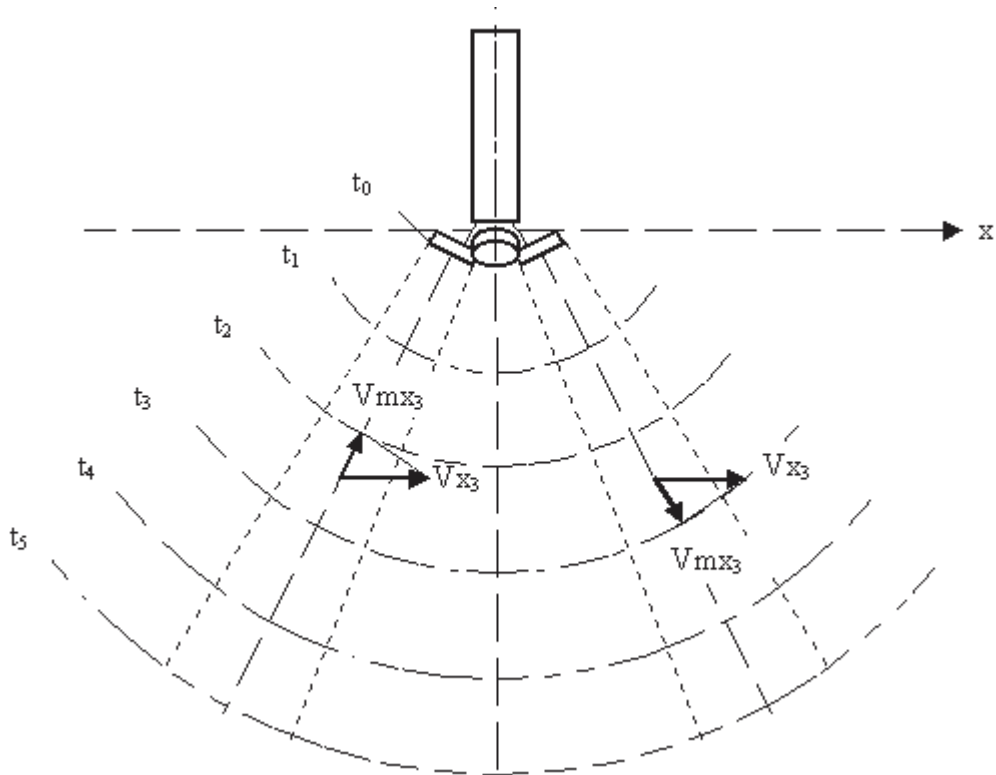
Entre les temps  $t_i$  et  $t_{i+1}$ , ces transducteurs reçoivent un signal affecté d'un décalage Doppler qui lui permet de connaître la composante  $V_{mx_n}$  de la vitesse horizontale du courant. Ce qui donne comme module de la vitesse horizontale suivant  $Ox$  :  $V_{x_i} = 2 V_{mx_i}$ .

Cette mesure est faite à une distance moyenne oblique " $d_i$ " du transducteur

$$d_i = \frac{t_{i+1} - t_i}{4} U$$

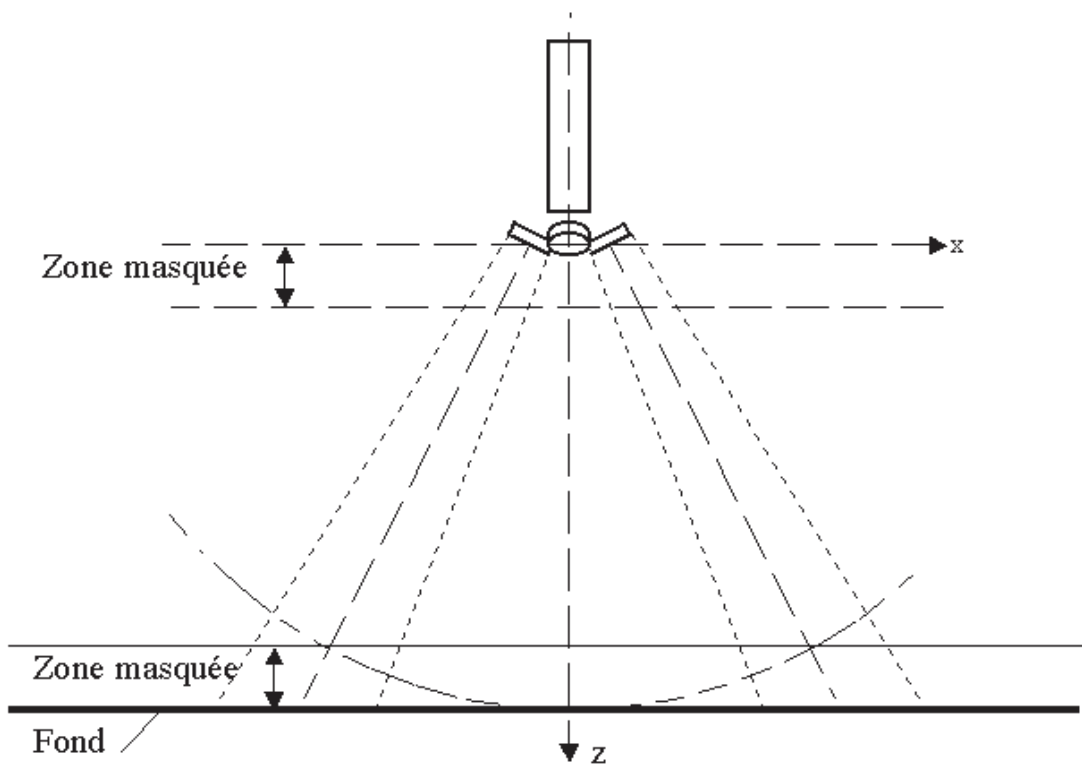
<sup>(5)</sup> Le constructeur propose une inclinaison de  $20^\circ$  en option ce qui permet un léger gain en portée mais une perte de précision.





### Principe de fonctionnement d'un ADCP

$V_{mX_3}$  : composante de vitesse mesurée dans la 3<sup>e</sup> couche,  
 $V_{X_3} = V_{mX_3} / \tan(\alpha)$  : composante horizontale du courant suivant l'axe Ox



**Zones masquées : résonance et écho sur le fond**



où  $U$  est la célérité du son<sup>(6)</sup>.

Soit à une distance verticale suivant  $Oz$  de

$$z_i = \frac{\sqrt{3}}{2} d_i$$

Dans ce même plan un inclinomètre permet de corriger cette valeur afin de fournir celle qu'aurait donnée l'appareil s'il avait été parfaitement vertical.

Si les vitesses horizontales déduites des mesures provenant d'une même paire de transducteurs ne sont pas identiques il est possible de calculer une valeur de la composante verticale du courant.

Une autre valeur de cette composante verticale est fournie par l'autre paire de transducteurs. L'erreur sur l'estimation de la vitesse horizontale est calculée à partir de la différence entre ces deux vitesses verticales. Sa valeur permet de retenir ou rejeter la mesure.

Cette autre paire fournit aussi la vitesse horizontale  $V_{y_i}$  suivant  $Oy$ .

A chacune une de ces composantes horizontales et suivant le même axe est associée la valeur du champ magnétique fourni par un magnétomètre. Un calcul vectoriel permet d'obtenir les composantes nord-sud et est-ouest du courant. Comme une seule mesure de la vitesse présente une incertitude, l'appareil fait un ensemble de mesure, en fait la moyenne et l'enregistre.

Il en va de même pour les  $n$  vitesses mesurées sur la verticale ( $n \leq 128$ ).

Après chaque ping, les transducteurs continuent à résonner pendant un temps d'environ  $t_1 - t_0$  ce qui fait qu'il n'est pas possible d'obtenir de mesure à proximité de l'appareil.

Les transducteurs sont directifs, une faible énergie est cependant émise dans les autres directions notamment suivant l'axe vertical  $Oz$  de l'ADCP. Si le ping est réfléchi par le fond, le signal de retour est assez fort pour masquer celui des courants proches du fond. Dans une couche d'une hauteur de 15 % de la distance entre l'ADCP et le fond le courant n'est pas mesurable. Il en est de même si l'appareil regarde vers le haut et qu'un écho important est produit par la surface.

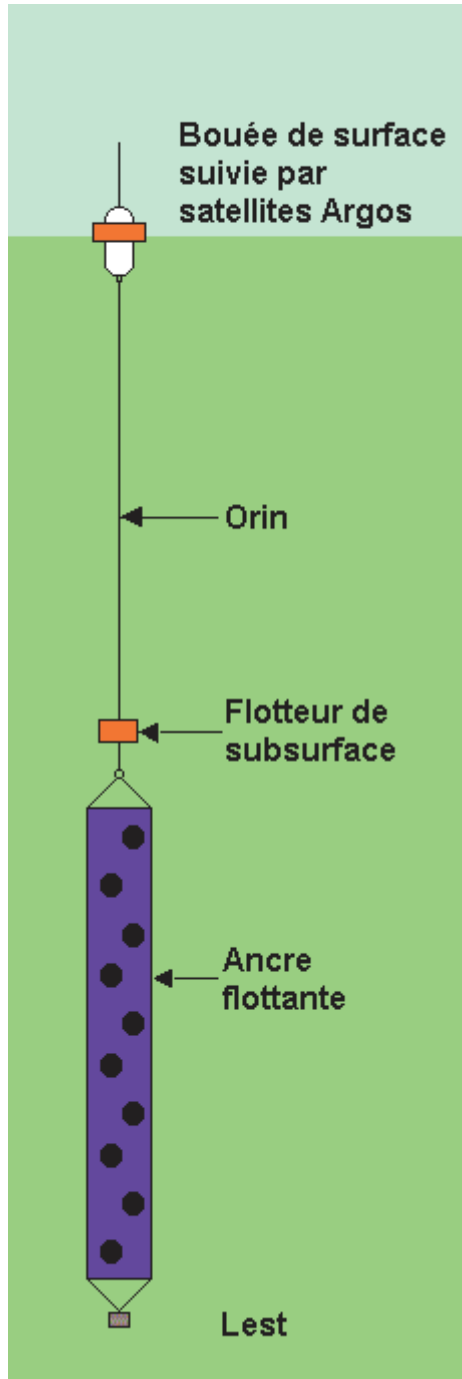
Fréquence en kHz	Portée en m	Diamètre transducteur
76.8	400	280 mm
153.6	240	165 mm
307.2	120	133 mm
614.4	60	101 mm
1228.8	25	54 mm

<sup>(6)</sup> L'ADCP calcul la célérité du son à partir de la salinité, température et pression.

## XVI - MESURES LAGRANGIENNES DES COURANTS MARINS

(Mesure en dérive : suivi du mouvement des particules)

### XVI - 1 - BOUEES DERIVANTES



Ce système est un mouillage dérivant constitué d'une bouée de surface reliée à une ancre flottante par un câble (orin, câblot). Il doit suivre avec le plus de précision possible la masse d'eau dans laquelle l'ancre flottante est immergée. Cet ensemble est couramment appelé surdrift pour « surface drifter ».

La bouée est de faible dimension afin d'offrir une traînée minimum et une faible prise au vent. Elle est positionnée par satellites Argos ou par GPS. Dans ce dernier cas, les positions sont stockées pendant plusieurs jours dans une mémoire interne à la bouée et elles sont ensuite transmises par le système Argos, Imersat ou autre. L'avantage de cette méthode est de diminuer le coût d'utilisation des satellites tout en obtenant plus souvent et à des périodes régulières des positions plus précises.

L'orin est de faible section, il ne fait que quelques millimètres de diamètre afin d'avoir une traînée parasite minimum. Comme il doit être suffisamment résistant il est généralement en Aramide (fibre très résistante). Il maintient l'ancre flottante à une immersion constante qui peut être de quelques dizaines de mètres à un millier de mètres.

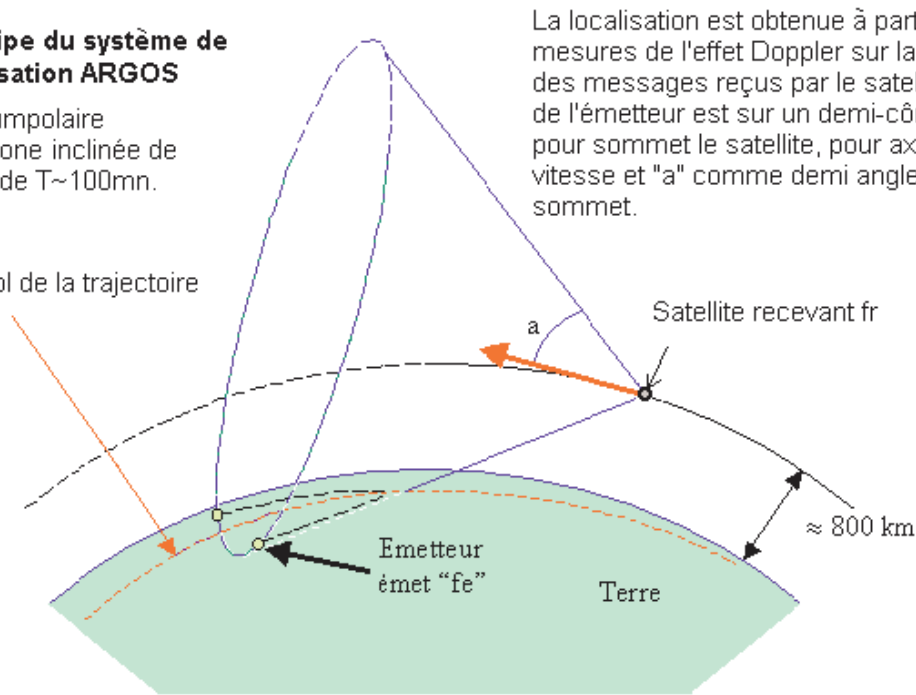
L'ancre flottante doit offrir un maximum de traînée puisqu'elle doit suivre la masse d'eau à étudier. Sa traînée doit être au moins 30 fois plus grande que les autres éléments du mouillage. Les formes d'ancres les plus diverses sont utilisées mais les plus courantes sont cylindriques (Holey sock) ou en "diamant" (Tristar). Ces dernières sont constituées de 3 panneaux carrés en tissus montés à 90° les un des autres en se croisant suivant leurs diagonales. La forme des panneaux est maintenue par un système de tiges.

Un lest est fixé à la base de l'ancre flottante afin de maintenir l'ensemble vertical.

### Principe du système de localisation ARGOS

Orbite circumpolaire héliosynchrone inclinée de 98,7°, période T~100mn.

Trace au sol de la trajectoire



La localisation est obtenue à partir des mesures de l'effet Doppler sur la fréquence des messages reçus par le satellite. Le lieu de l'émetteur est sur un demi-cône ayant pour sommet le satellite, pour axe le vecteur vitesse et "a" comme demi angle au sommet.

$$\cos(a) = \frac{f_r - f_e}{f_e} \frac{C}{V}$$

C = vitesse de la lumière

V = vitesse du satellite par rapport à l'émetteur

f<sub>e</sub> = fréquence d'émission de 401,646 à 401,654 MHz

f<sub>r</sub> = fréquence de réception

A chaque mesure effectuée l'émetteur est positionné sur l'enveloppe d'un cône défini sa conicité (2a) ainsi que par la position du satellite qui est connue avec précision. L'intersection de ce cône avec la surface de la mer donne une courbe sur laquelle se trouve l'émetteur. Après plusieurs mesures, les courbes se croisent en 2 points qui donnent 2 positions possibles, symétriques par rapport à la trace du satellite. Pour lever l'ambiguïté, il faut disposer d'informations supplémentaires : positions précédentes, gamme de vitesses possibles de l'émetteur... Plusieurs satellites sont opérationnels. Leur visibilité est de 5000 km.

Le système à positionner est appelé plate-forme. Il émet avec une période moyenne T (par exemple de 80s). Une gigue (jitter en anglais) introduit une variation pseudo-aléatoire pouvant aller jusqu'à ±10% de la période. Elle évite que des plate-formes, en émettant toujours en même temps, ne puissent pas être positionner.

Le signal émis comprend : une porteuse de 160 ms, un préambule de 15 bits, 8 bits de synchronisation, 1 bit d'initialisation, 4 bits donnant la longueur des données, 14 bits d'identification, 6 bits de code d'erreur et un message de 32 à 256 bits. Suivant sa taille, la durée d'un message varie de 360 à 920 ms. Le nombre de message correctement reçu par les satellites dépend de la puissance de l'émetteur, de la densité des plate-formes... Il est faible, de l'ordre de 10%.

## XVI - 2 - FLOTTEURS DERIVANTS DE SUBSURFACE

Il s'agit de flotteurs perdables de subsurface qui, en restant immergés à une profondeur constante, dérivent avec la masse d'eau dans laquelle ils se trouvent.

### XVI - 2.1 - SOFAR

Le Sofar était un émetteur acoustique puissant alimenté par de nombreuses piles. Le tout était placé dans une enceinte cylindrique étanche en alliage d'aluminium de 8 mètres de long et de 10 centimètres de diamètre. La densité moyenne de l'appareil était ajustée afin qu'il trouve une position d'équilibre entre deux eaux à une immersion choisie. Cette densité moyenne était calculée de façon précise en tenant comptes des coefficients de dilatation thermique et de compressibilité de l'eau de mer et de l'appareil, ainsi que de la masse volumique de l'eau de mer à l'endroit où il était placé.

Dès sa mise à l'eau, l'appareil plongeait jusqu'à ce qu'il atteigne son immersion d'équilibre. L'effet à long terme de la pression sur l'enceinte étanche avait tendance à diminuer très légèrement son volume (phénomène de fluage). Un capteur de pression contrôlait l'immersion. Lorsque celle-ci augmentait une électrode sacrificielle était activée. En se désagrégant, elle ramenait le Sofar à son immersion de consigne.

L'appareil comportait une horloge très précise (dérive inférieure à 3 secondes par an) afin d'émettre à intervalles précis et réguliers un signal acoustique jusqu'à épuisement des piles. L'appareil ne pouvait pas être récupéré.

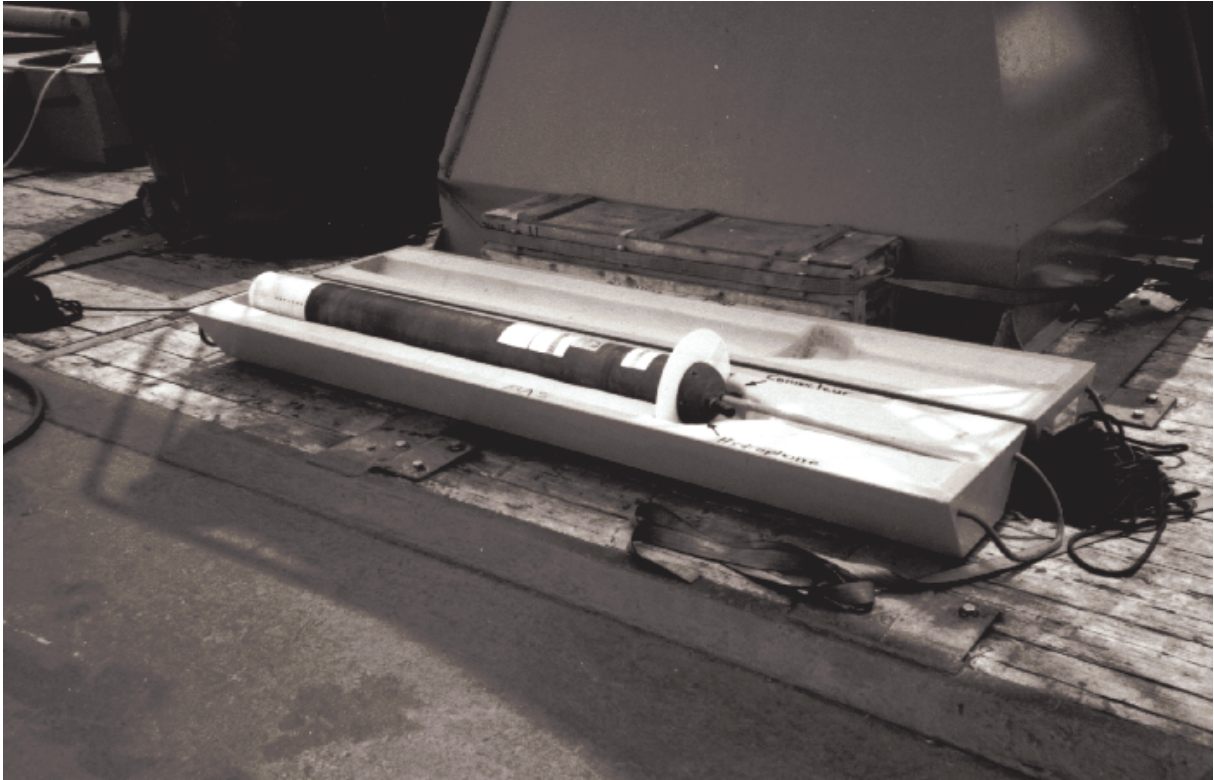
Les signaux étaient reçus par des stations d'écoutes fixes placées sur des mouillages autour de la zone d'étude. Ces stations avaient des horloges également très précises. Les temps d'arrivée de ces signaux - que l'on appelle TOA pour Time Of Arrival - étaient stockés dans la mémoire des stations.

SOFAR est l'acronyme de SOund Fixing And Ranging. En effet le signal sonore durait 80 secondes pendant lesquelles sa fréquence variait linéairement en fonction du temps de 259.375 à 260.898 Hertz. Dans les stations d'écoute, un corrélateur comparait le signal reçu avec celui qui était attendu (tel que défini ci-dessus) et calculait un indice de corrélation à chaque réception. Il n'enregistrait que les meilleurs TOA avec leurs indices de corrélation.

Ces stations étaient récupérées et à partir des temps d'arrivée il était possible de déduire la trajectoire des flotteurs Sofar.

Le système SOFAR était très lourd à mettre en œuvre, le nombre de flotteurs était limité, leurs prix est élevés. Il fallait relever régulièrement les stations d'écoutes ...Aussi, dès qu'il a été possible de transmettre facilement des données par satellites, le système c'est inversé : Maintenant les flotteurs enregistrent le temps d'arrivée des signaux sonores émis par des sources acoustiques fixes placées sur des mouillages. Ils remontent à la surface pour transmettre les données qu'ils ont enregistrées. En s'inversant, le système SOFAR est devenu RAFOS !





**FLOTTEUR MARVOR PRET A ETRE MIS A L'EAU**



**MISE A L'EAU D'UNE SOURCE ACOUSTIQUE**

## XVI - 2.2 – RAFOS

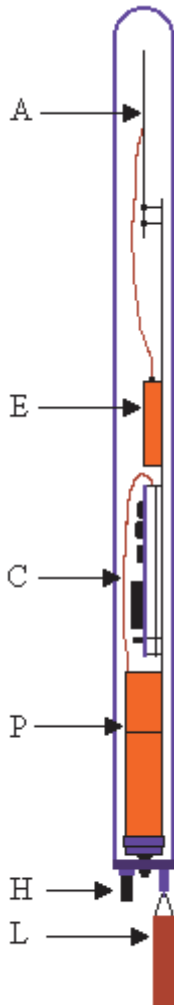
Comme pour les SOFAR la densité moyenne des RAFOS est ajustée pour que ces flotteurs se maintiennent à une immersion voulue après leur mise à l'eau. Il existe aussi des modèles plus évolués qui peuvent exécuter plusieurs cycles de plongé, dérive avec écoute et remontée.

Les RAFOS enregistrent les temps d'arrivées de signaux acoustiques, émis généralement avec une période de 8 heures, par des sources sonores fixes.

La durée de leur mission est programmée avant leur mise à l'eau. Elle peut être de quelques mois à quelques années. Pour les flotteurs les plus simples, lorsque leur mission est terminée, ils larguent un lest ce qui les fait remonter à la surface. Là, ils émettent les données qu'ils ont enregistrées à des satellites qui les retransmettent à terre. Après traitement nous connaissons la trajectoire des RAFOS donc celle du courant.

Ensuite, flotteur reste en surface et dérive au grès des vents et courants. Il est considéré perdu.

Il existe plusieurs modèles de flotteurs RAFOS, Nous en présentons 2 modèles différents, le RAFOS IFM et le Marvor.



## XI – 2.2.1 - RAFOS IFM

(Institut Fur Meereskunde – Universität Kiel)

C'est un des RAFOS les plus simples. Son enceinte est un tube de verre en forme d'éprouvette d'environ 1.5 m de long et 10 cm de diamètre. Le tube est fermé à sa partie inférieure par une tige métallique sur laquelle sont fixés un hydrophone H, un capteur de pression au centre et un lest largable L. Ce lest est fixé par un en fil de nylon à un anneau en fil métallique solidaire du flotteur. Ce fil métallique présente une résistance électrique.

Lorsque la mission se termine, un courant passe dans le fil métallique qui s'échauffe. Le fil de nylon fond. Le lest est largué et le flotteur remonte à la surface. Il émet les temps d'arrivée des signaux acoustiques stockés en mémoire.

Il est possible de voir à l'intérieur du tube, de haut en bas, l'antenne A et le boîtier de l'émetteur Argos E, la carte d'électronique C et le pack de batteries alcalines P. L'ensemble ne pèse qu'environ 14 Kg.

La programmation du flotteur se fait à partir d'un ordinateur par une liaison RS232 optique à travers le tube de verre du flotteur.

Pour la mise à l'eau, le flotteur est placé dans un ber en forme de gouttière. Ce ber est équilibré dans l'air, mais lorsqu'il arrive en surface, comme l'un de ses côtés a une plus forte flottabilité que l'autre, il se retourne en libérant le flotteur qui commence alors sa plongée.

## XVI - 2.2 - Marvor

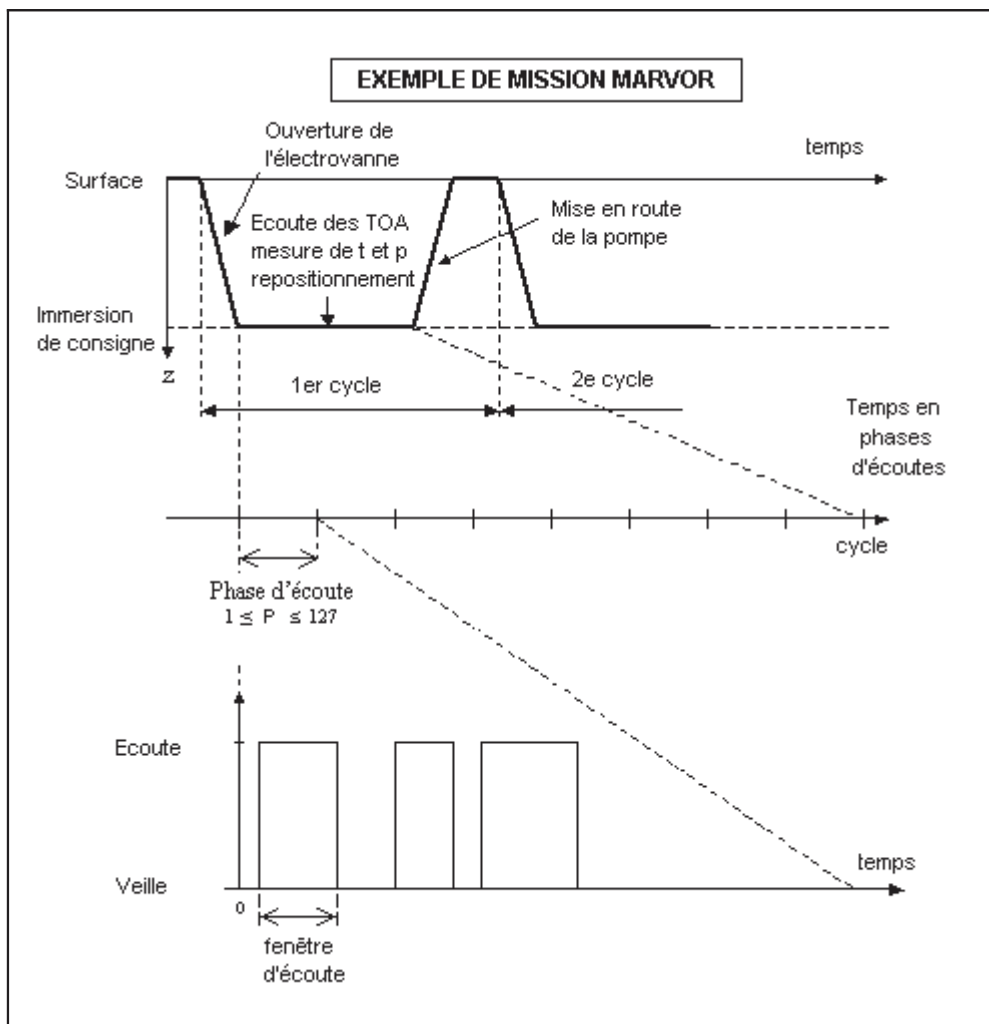
Du breton « march » cheval et « mor » mer qui mute en « vor ». « Marvor » signifie donc cheval de mer c'est à dire hippocampe.

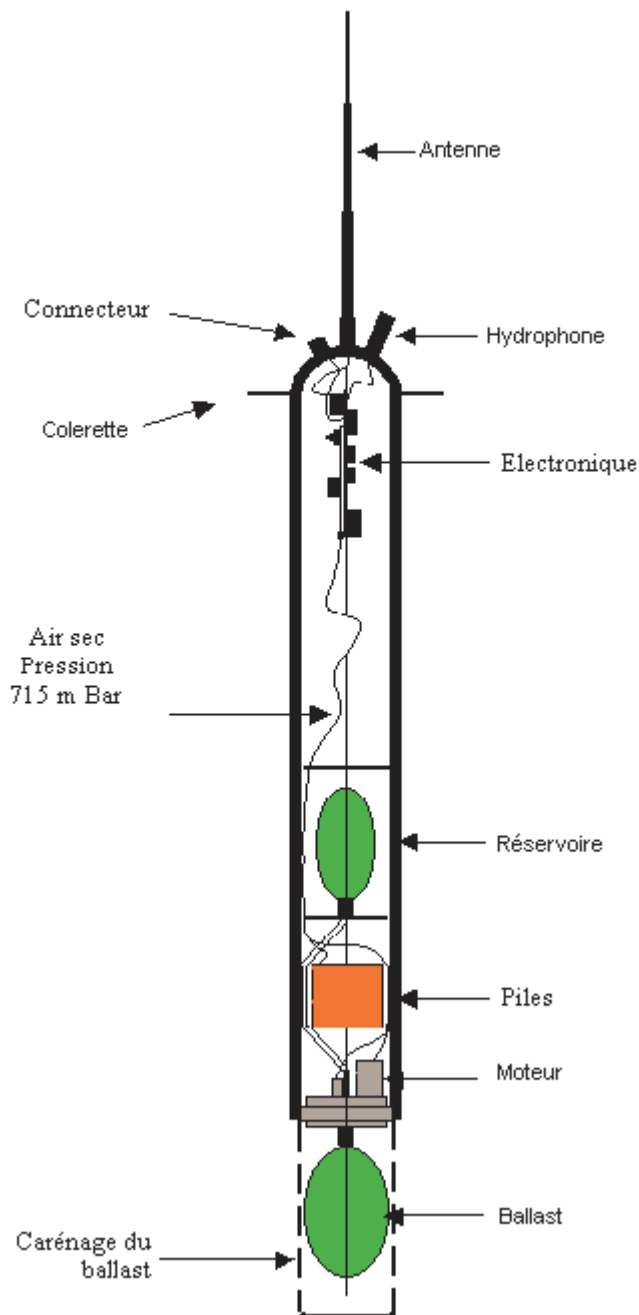
Le Marvor est un flotteur de subsurface de type RAFOS. Il a été développé conjointement par IFREMER et TEKELEC-AIRTRONIQUE. Il est commercialisé par Martec. Il est destiné à effectuer pendant plusieurs années des missions multi-cycles programmés : Plongé, séjours en profondeur en dérivant avec le courant, retour en surface, émission des données enregistrées, re-plongée... Son équilibre à l'immersion choisie est ajusté par un système de ballastage automatique.

Pendant sa dérive en profondeur, le Marvor écoute les sons émis par des sources acoustiques SOFAR mouillées en des points fixes connus. Ces ondes sonores se propagent dans une zone dite « insonifiée », définissant ainsi la zone d'expérience dans laquelle sont placés les flotteurs. Les instants d'arrivée des ondes, dénommés TOA (Time Of Arrival), sont conservés en mémoire.

A chaque retour en surface, le Marvor émet vers les satellites du système ARGOS, les TOA mémorisés ainsi que les mesures de pression et de température faites pendant son séjour en profondeur.

Ces informations sont retransmises aux services de traitement des données à partir desquelles la trajectoire du flotteur est reconstituée, ce qui permet de connaître le courant dans la couche d'eau où se trouvait le Marvor.





**Flotteur de sub-surface MARVOR**

L'enceinte étanche est en alliage d'aluminium. Elle est constituée d'un tube d'environ 17 cm de diamètre et de 180 cm de hauteur. Il est fermé à son extrémité supérieure par un hémisphère surmontée d'une antenne de 69 cm. Un hydrophone et un connecteur sont placés de part et d'autre de l'antenne. Une colerette est placée à la jonction entre l'hémisphère et le tube. Son rôle est de limiter les mouvements de pilonnement verticaux de l'appareil lorsqu'il est en surface. La partie inférieure du tube est fermée par une tige. Celle-ci est traversée par un conduit qui permet à de l'huile hydraulique contenue dans le réservoir intérieur de gonfler plus ou moins le ballast. Ce ballast est en contact avec l'eau de mer par l'intermédiaire de trous percés dans la carène. Les variations du volume du ballast modifient la poussée d'Archimède appliquée au Marvor.

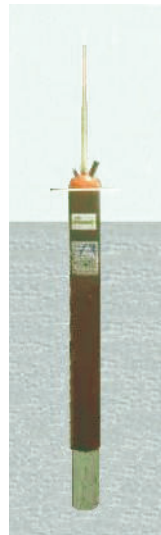


Un capteur mesure la pression qui s'exerce sur le ballast. Cette mesure est utilisée pour commander la pompe et l'électrovanne pendant les descentes et remontées du flotteur ainsi que pour le maintenir en plongée à la pression voulue. Pour cela la masse volumique moyenne du flotteur est maintenue égale à celle de l'eau de mer environnante.

Avant sa mise à l'eau, le Marvor est programmé en fonction de la mission qu'il aura à effectuer. Cette mission se décompose en cycles. Chaque cycle correspond à une descente, un séjour en immersion à pression constante, une remontée, un passage en surface avec émission des données enregistrées.

Le temps en immersion se décompose en plusieurs phases d'écoutes. Une phase correspond à l'intervalle de temps où une localisation du flotteur est souhaitable ; elle dure par conséquent un multiple de la période d'émission des sources SOFAR. Au cours d'une phase, il est indispensable d'écouter les signaux de sources différentes pour obtenir une localisation correcte du Marvor.

Les phases d'écoute comprennent plusieurs fenêtres ; une fenêtre correspond à l'intervalle de temps pendant lequel le flotteur est susceptible de recevoir les signaux acoustiques émis par une ou plusieurs sources. Les informations « instant d'arrivée (TOA) + niveau de corrélation » sont mémorisées. A la fin de chaque fenêtre d'écoute, un nombre d'informations compris entre 1 et 5, fixé d'avance, est enregistré.



FLOTTEUR MARVOR

## XVII - HISTOIRE DES SALINOMETRES ET DES SONDES CTD

(Neil Brown)

Avant l'introduction des salinomètres à cellule de conductivité en 1930, la mesure de la température et de la salinité était obtenue en utilisant des thermomètres à renversement au mercure et en analysant en laboratoire des échantillons prélevés à l'aide de bouteilles de prélèvement Nansen. La salinité était mesurée par titrage au nitrate d'argent de la chlorinité, c'est à dire des ions chlore, brome et iode. Cette technique a été développée en 1901 par Martin Knudsen en Norvège. Les chlorures étant les constituants principaux de l'eau de mer et la proportion relative de solides dissous étant constante, la salinité était calculée à partir de la chlorinité. Cette méthode était très longue et très coûteuse. Elle demandait un soin extrême pour obtenir une précision de 0.03 PSU en salinité.

### XVII - 1 - LES PREMIERS SALINOMETRES

Les salinomètres mesurant la conductivité ont été introduit en 1930 par Frank Wenner des Coast Guard. Ils mesuraient directement le rapport de conductivité entre l'échantillon et l'eau standard en utilisant deux cellules de mesure à électrodes. Les cellules étaient maintenues à la même température. La salinité était calculée à partir du rapport de conductivité. Cet instrument fournissait des mesures au moins aussi précises que celles obtenues par la méthode de Knudsen mais il était plus simple et plus rapide à utiliser.

La température a un effet important sur la conductivité de l'eau de mer. Une augmentation de la température de 0.01°C a le même effet sur la conductivité qu'une augmentation en salinité de 0.01. Actuellement les océanographes ont besoin d'une précision de  $\pm 0.003$  ou meilleure dans l'océan profond ce qui a amené le développement d'instruments d'une plus grande précision. Par exemple en 1956 Alvin Bradshaw et Karl Schleicher (Woods Hole Oceanographic Institution ou WHOI), ainsi qu'en 1958 Roland Cox (National Institute of Oceanography, UK), avaient développé des salinomètres de laboratoire constitués de cellules de conductivité à deux électrodes dans un bain d'huile thermostaté équipé d'un chauffage, d'une réfrigération, d'un contrôle électronique de température et d'un pont de mesure de la conductivité. La salinité était mesurée en comparant la conductivité du prélèvement à mesurer avec celle de l'eau de mer standard après équilibrage de la température des deux échantillons dans le bain d'huile. Ces instruments étaient grands, complexes, lourds (plus de 200 kg) et donc non commercialisable. Cependant ils atteignaient la précision requise de  $\pm 0.003$ .

En 1961 Bruce Hamon, qui travaillait à la division des pêches et de l'océanographie du « Commonwealth Science and Industrial Research Organization » en Australie, concevait un salinomètre portable d'un poids approximatif de 15 kilogrammes. Il utilisait une thermistance et un pont de résistances pour compenser de façon précise l'effet de la température sur le rapport de conductivité ce qui évitait l'utilisation d'un bain d'huile thermostaté. Cet appareil dont la précision était de  $\pm 0.003$ , a été fabriqué en grande quantité. Il utilisait un capteur à induction placé dans un récipient en plexiglas. La cellule contenant l'eau standard dans l'appareil précédent était remplacée par une branche du pont de mesure qu'il fallait calibrer avant de passer les échantillons. Dans la partie haute du récipient, un agitateur permettait de maintenir rapidement un bon mélange. L'eau était en contact avec deux thermistances. Une thermistance était placée dans le circuit de compensation de l'effet de température, l'autre thermistance mesurait la température de l'échantillon avec une précision de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  ce qui permettait de calculer quel aurait été le rapport de conductivité si la mesure s'était effectuée à 15°C (ou 20°C). C'est en effet pour cette température qu'a été établie l'équation -dite

« équation d'état de l'eau de mer »- qui permet le calcul de la salinité. L'utilisation d'un capteur à induction dans ce salinomètre éliminait les problèmes de dérive existant avec les cellules à deux électrodes. Cette dérive est due à l'impédance de polarisation, identique à une résistance électrique, qui existe entre chaque électrode et l'eau de mer. La dérive était réduite de manière importante en utilisant des électrodes de platine recouvertes de platine passivé. Cependant, il subsistait une dérive suffisamment importante pour nécessiter fréquemment un nettoyage des cellules et une re-calibration à l'eau de mer standard.

Les capteurs de conductivité à induction sont constitués de deux transformateurs toroïdaux superposés de telle sorte que leur trou central soit aligné. L'eau de mer les entoure complètement et remplit le trou central de telle sorte que cela forme une spire commune aux deux transformateurs. Une tension alternative est appliquée à l'un des transformateurs ce qui induit un courant électrique dans le circuit d'eau de mer. Ce courant est proportionnel à la conductivité. Il est mesuré par le second transformateur.

Bien que ces cellules soient plus stables que les cellules à deux électrodes la résistance électrique cause des instabilités mineures qui doit être compensée par des calibrations fréquentes.

En 1975 Tim Dauphinee (National Research Council du Canada à Ottawa) a conçu un salinomètre de laboratoire commercialisé sous le nom d'AUTOSAL. Ce salinomètre est encore utilisé fréquemment par les océanographes aujourd'hui. L'AUTOSAL utilise une cellule à quatre électrodes immergée dans un bain thermostaté qui permet d'éviter le problème de la dérive posée par la polarisation

La cellule à quatre électrodes est exactement analogue à un shunt. Les deux électrodes extrêmes induisent un courant électrique dans la cellule, entre les deux autres électrodes la tension présente fournit le rapport de conductance entre l'échantillon mesuré et l'eau standard avec laquelle le salinomètre a été calibré.

Bien que ces salinomètres satisfassent aux besoins de précision de la plupart des océanographes, les techniques de prélèvement des échantillons destinés à des analyses ultérieures laissaient à désirer. Ces échantillons étaient collectés à des profondeurs prédéfinies et relativement peu nombreuses, si bien que d'importants détails passaient souvent inaperçus, les valeurs de la salinité n'étaient pas disponibles assez rapidement pour avoir une influence sur la suite de la campagne. Les techniques de prélèvement étaient longues et coûteuses.

## **XVII - 2 - MESURES IN SITU**

Les limites à la collecte des échantillons d'eau de mer et à leur analyse à bord a conduit au développement en 1948 du premier système in situ conçu par A. W. Jacobsen qui travaillait au «Bristol Corporation à Waterbury» dans le Connecticut. Son utilisation était limitée à 400 mètres. Cet instrument utilisait un câble porteur et un autre câble multiconducteur pour obtenir les données. Bien que très simple, ce système ouvrait la voie à de nouvelles techniques de mesure en océanographie.

En 1958, en Australie, Bruce Hamon et moi-même avons décrit un instrument conçu pour être utilisé jusqu'à 1000 mètres. Il était le premier à utiliser un câble électroporteur, câble porteur avec pour âme un simple conducteur isolé, qui permettait d'alimenter l'appareil et de transmettre les données à bord. La précision sur la température était de  $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$  et celle sur la salinité de  $\pm 0.05$ . La salinité était mesurée en utilisant une cellule de conductivité à deux

électrodes et un circuit comprenant des thermistances et des résistances pour la compensation de l'effet de température sur la conductivité. Un simple oscillateur à réseau R C déphaseur convertissait l'information fournie par chaque capteur en un signal audio modulée en fréquence. Ce signal était transmis à bord où il était converti en tensions continues qui étaient enregistrées sur une table traçante. Il n'y avait pas de compensation de l'effet de pression sur la conductivité : Les données (de conductivité) enregistrées devaient être lues sur les enregistrements fournis par la table traçante, puis corrigés manuellement de l'influence de la pression.

Cet appareil permis à Hamon d'être le premier à calculer l'effet de la pression sur la conductivité de l'eau de mer. En 1965 Bradshaw et Schleider (WHOI) étudièrent de manière beaucoup plus complète et précise cet effet de la pression. Bien que cet appareil nécessite un nettoyage permanent et une replatinisation de la cellule pour maintenir la précision, il montrait d'une manière claire qu'il existait des structures à beaucoup plus petite échelle dans l'océan que ce qui était révélé autrefois par les méthodes classiques de prélèvement.

### **XVII - 3 - REALISATION DES BATHYSONDES STD**

En 1959 je quittais l'Australie pour m'installer à Woods Hole (au WHOI) et travailler avec Bradshaw et Schleider afin de concevoir ce que l'on espérait être un instrument de mesure in situ plus précis. Il utilisait un capteur de conductivité à induction et une cellule de compensation scellée remplie d'eau de mer standard. Cette cellule était destinée à compenser de façon précise à la fois les effets de la température et de la pression ; cependant, notre tentative de fabriquer une cellule à la fois stable et ayant une réponse rapide aux variations de température a été un échec et elle fut abandonnée.

Je retournais en Australie en 1961 puis en 1962 je revins aux Etats-Unis à la division marine de société Bissett-Berman à San Diego en Californie pour poursuivre les travaux de développement d'une bathysonde commencés à Woods Hole. La sonde STD (Salinity, Temperature, Depth) qui en a résulté fut commercialisée en 1964. A cette époque, les ordinateurs et leurs périphériques coûtaient cher, étaient peu fiables et difficiles à utiliser en mer. Puisqu'il était essentiel que les mesures de salinité soient immédiatement disponibles, la relation complexe entre salinité, température, pression et conductivité devait être émulée par un « pont de salinité ». Ce pont était composé de deux capteurs de température au platine et de trois thermistances, de deux capteurs de pression et de six transformateurs ainsi que d'un capteur de conductivité à induction et d'importants circuits électroniques. Il nécessitait de nombreux et complexes réglages pour sa calibration.

La bathysonde STD utilisait un oscillateur connu sous son nom commercial de « Paralog Oscillator » fabriqué suivant le même principe que l'appareil utilisé en Australie. Des oscillateurs séparés convertissaient les sorties des ponts de mesure de la salinité, de la température et de la pression en trois bandes de fréquences audio différentes. Bien que cette STD ait poussé la technique analogique à ses limites, cet appareil complexe et coûteux devint le premier « profileur » régulièrement utilisé. Plus de 700 furent vendus de par le monde jusqu'à ce que les bathysondes CTD (Conductivity, Temperature, Depth), fabriquées à partir de 1970, la rende obsolète. La précision de la STD se dégradait pour des profondeurs supérieures à 100 mètres et il y avait d'importantes anomalies de la salinité (spiking) dues au fait que le capteur de conductivité ait une réponse plus vite que les capteurs de température. De plus, sa précision était limitée par les erreurs systématiques du calcul analogique de la salinité à partir des informations fournies par les mesures de la conductivité, température et pression.

## XVII - 4 - L'ARRIVEE DES CTD

Ces inconvénients suivis de l'arrivée rapide des ordinateurs, m'ont poussés à rejoindre le WHOI en 1969 pour commencer la conception d'un appareil digital qui pallie aux limitations de la STD. Je publiais ce travail en 1974, après cette publication j'ai quitté le WHOI pour créer la « Neil Brown Instrument Systems » et y fabriquer la CTD Mark III. Cette Mark III utilisait un capteur de conductivité miniature à quatre électrodes de 3 centimètres de long, réalisé en fine céramique d'alumine. La température était mesurée en utilisant un thermomètre à fil de platine très stable ayant un temps de réponse de 250 millisecondes et une thermistance dont le temps de réponse était d'environ 50 millisecondes. Les signaux de sortie provenant de ces deux capteurs étaient combinés dans un circuit analogique qui délivrait un signal ayant la stabilité du thermomètre de platine et le temps de réponse de la thermistance. Le signal était indépendant de la calibration de la thermistance. Il était digitalisé en même temps que ceux provenant des capteurs de pression et de conductivité. L'expérience montra qu'en raison de la variabilité et de la complexité du temps de réponse de ces capteurs, il était préférable de digitaliser séparément leurs signaux et de les recombinaer numériquement par calcul en utilisant l'ordinateur d'acquisition. Un des points forts de la CTD était la haute résolution du convertisseur analogique digital (16 bits) sur la mesure des tensions alternatives. Ce convertisseur avait un bruit de fond de 0.1 microvolt à 100 mesures par seconde.

En 1974 Nick Fofonoff, Stanley Hayes et Robert Millard écrivirent dans un rapport technique du WHOI qu'avec un traitement approprié et une calibration à la mer adéquate, la CTD donnait des données d'une qualité égale ou supérieure à celles obtenues à partir des meilleures stations hydrographiques classiques. Ils affirmaient que pour des mesures sous la thermocline principale les précisions étaient de  $\pm 0.0015^{\circ}\text{C}$  sur la température,  $\pm 1.5$  décibar sur la pression et de  $\pm 0.003$  sur la salinité. Tous les utilisateurs de la CTD n'étaient pas capables d'obtenir une telle précision qui nécessitait une calibration précise immédiatement avant et après chaque campagne, en faisant en plus, pendant la campagne, des analyses fréquentes sur des prélèvements effectués simultanément à des acquisitions de calibrage et en utilisant de bons logiciels de traitement.

La CTD Mark III présente deux sources d'erreurs principales :

Les dépôts de corps gras ou de matière organique sur les électrodes ainsi que les dépôts calcomagnésiens à la surface de la céramique.

La précision limitée sur la mesure de la pression ( $\pm 0.1\%$ ). A la profondeur de 6000 mètres cette imprécision sur la pression provoquait une erreur de  $\pm 0.004$  sur la salinité.

Depuis le début des années 1970 pendant que la Mark III était mise au point, la technologie des microprocesseurs a subi une évolution spectaculaire. A la même époque la demande pour des CTD modifiées et possédant des capteurs supplémentaires devint la règle plutôt que l'exception. En conséquence la Mark V fut fabriquée à partir de 1987 pour profiter de la technologie des microprocesseurs de sorte que les modifications souhaitées et les ajustements de calibration puissent être fait par software plutôt que par hardware, ce qui simplifiait le processus de fabrication. Une autre amélioration importante est l'utilisation d'une cellule de conductivité à six électrodes promettant une amélioration considérable de la stabilité. Cette cellule est sensible à l'eau de mer extérieure à une extrémité et n'est pas sensible à l'eau de mer qui présente à l'intérieure de la cellule. Les six électrodes sont à l'intérieure de la cellule loin de sa partie sensible. Cependant l'électronique associée à cette cellule est forcément complexe. Un capteur de pression au titane est monté sur la CTD Mark V. Il est environ trois fois plus précis que celui de la Mark III.



## XVII - 5 - DEVELOPPEMENTS FUTURS

La quantité de données océanographiques que les bateaux et le personnel peuvent récolter en utilisant les CTD limite les progrès en océanographie et en climatologie. Parmi les autres méthodes possibles on peut installer des CTD dans des véhicules autonomes, utiliser des mouillages conventionnels ou non récupérables et des navires de passages (navires d'opportunités). Indépendamment de la plate-forme utilisée, les capteurs des CTD doivent être moins cher, consommer moins d'énergie, être plus léger, plus petit et, le plus important, d'avoir une excellente stabilité à long terme. Même les méthodes actuellement utilisées à bord profiteraient considérablement de tels systèmes CTD. La philosophie à la conception de la Mark III puis de la Mark V était de rendre chaque partie du système extrêmement stable et performante. Il en est résulté des systèmes ayant les performances désirées mais au prix d'une consommation énergétique importante, d'une grande complexité et d'un coût élevé.

Comme mon entreprise employait plus de 50 personnes, J'ai trouvé qu'il n'était plus intéressant de la diriger. En 1982 le conseil d'administration et moi-même avons désigné un directeur afin que je puisse me remettre aux travaux de conception qui me plaisaient davantage. Deux années après, l'entreprise fut achetée par EG&G. Je suis resté chez eux pendant 5 ans en tant que responsable scientifique. Mais pendant cette période je n'ai eu que très peu de possibilités de travailler à la conception de nouveaux appareils, aussi, à la fin de ces cinq années, j'ai été très heureux de pouvoir retourner (en 1989) au WHOI.

Le nouveau concept que je développe actuellement utilise des circuits électroniques simples, compacts et bon marché. Ils ne sont pas forcément stables mais sont calibrés dynamiquement in situ en les comparant avec des réseaux de résistances ultra stables qui simulent avec précision les signaux de sortie des capteurs pour des valeurs connues des paramètres mesurés. Un microprocesseur interne corrige ensuite la dérive de l'électronique.

Un des objectifs principaux de ces nouveaux développements est d'appliquer ce concept à des applications à long terme alimentées par des piles. Une étude préliminaire montre qu'il est possible de ne consommer qu'un milliwatt par capteur. Ce qui veut dire qu'un capteur peut être utilisé en continu pendant deux ans en étant alimenté par deux piles de type D au lithium. Les biosalisures marines posent un sérieux problème pour l'utilisation à long terme de tous les systèmes CTD utilisant des capteurs de conductivité à électrodes. Puisque les électrodes doivent être directement exposées à l'eau de mer, elles ne peuvent pas être fiablement protégées du fouling en utilisant une peinture anti-fouling. Le nouvel appareil utilise un capteur de conductivité à induction avec une bobine d'asservissement supplémentaire et une électronique qui élimine les erreurs présentes dans les appareils précédant qui était dues à la résistance des enroulements. Ceci élimine aussi la nécessité de protéger les transformateurs en les plaçant dans un boîtier qui résiste à la pression, et de ce fait, cela réduit considérablement la taille, le prix et la masse thermique du capteur. Puisqu'il n'y a pas d'électrodes, les techniques anti-fouling classiques peuvent être utilisées, ce qui augmente considérablement les chances d'obtenir une stabilité à long terme.

Au cours des années, les capteurs de conductivité des salinomètres et des sondes CTD ont évolués de la simple cellule à deux électrodes à la cellule à induction, suivie de celle à quatre puis à six électrodes pour finalement revenir à la cellule à induction. L'utilisation de la nouvelle cellule à induction et de la calibration dynamique de l'électronique en utilisant la puissance d'un microprocesseur permet d'envisager de nouveaux appareils CTD, petits et peu coûteux, avec une excellente stabilité à long terme.