

## Lot nr. 2

### Prototype de sonde autonome de gradient de température

### Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP)

Responsable scientifique : **Jeffrey Poort**

Sorbonne Université, Institut Sciences de la Terre de Paris (ISTeP)

Référence : ISTEP-DSN-WP24-Achat-SAGT-CCTP-V3 du **03/03/2025**

Achat dans le cadre du projet DeepSea'nnovation



# Sommaire

<b>1. Contexte et objet du document .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Définition des exigences et des niveaux de priorité .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Exigences opérationnelles de l'équipement .....</b>	<b>6</b>
3.1. Engins porteurs souhaités .....	6
3.2. Conditions d'environnement.....	7
3.3. Exigences de mise en œuvre opérationnelle .....	7
3.4. Exigences de maintenance, de calibration .....	8
<b>4. Exigences fonctionnelles scientifiques de l'équipement .....</b>	<b>8</b>
4.1. Description scientifique de l'équipement .....	9
4.2. Périmètre d'utilisation.....	9
4.3. Gestion des données/échantillons .....	9
<b>5. Exigences techniques .....</b>	<b>10</b>
5.1. Exigences mécaniques.....	10
5.1.1. Caractéristiques mécaniques .....	10
5.1.2. Contraintes d'intégration .....	11
5.1.3. Interface hydraulique (si nécessaire) .....	11
5.2. Exigences électriques et signaux.....	11
5.2.1. Alimentation électrique.....	11
5.2.2. Communication/signaux.....	11
5.3. Exigences informatiques & IHM .....	11

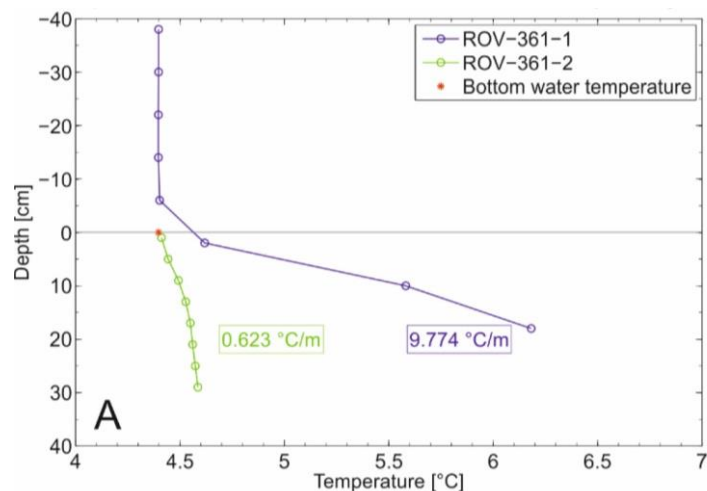
## 1. Contexte et objet du document

Les mesures de gradient de température effectuées avec une précision du m°C dans l'océan profond fournissent des mesures locales de flux de chaleur lorsqu'elles sont combinées avec des mesures de conductivité obtenues sur des carottes ou in situ. Ces mesures sont sensibles à l'advection ou à la convection locale des fluides, aux processus de bio-irrigation et à l'activité biochimique, et peuvent être utilisées pour déterminer avec précision les flux lorsqu'elles sont combinées avec les données des sondes exploitées depuis le navire. Nous proposons le développement d'un outil de mesure du gradient de température in-situ dans les sédiments et adapté pour une utilisation avec les ROVs de la Flotte Française. Le but principal est de répondre à un besoin de la communauté scientifique française qui souhaite détecter et étudier les transferts de fluides au fond des océans (circulations hydrothermales, suintements fluides, etc.). Ces circulations sont encore mal connues, mais elles contrôlent au fonds des océans des endroits de forte minéralisation (carbonates, hydrates de gaz) et des écosystèmes uniques. Depuis plusieurs années, il y a un vrai besoin de l'acquisition de données de flux de chaleur à haute résolution spatio-temporelle pour mieux comprendre et quantifier ces systèmes.

Les nouvelles sondes de gradient de température à développer s'inspirent fortement des expériences de développement précédentes par Ifremer (T-ROV) et Marum/RBR (T-stick), deux sondes avec 5 à 8 points de mesures qui ne sont plus disponibles pour la communauté et pas reproductibles par ces instituts d'origine. Pour répondre aux objectifs scientifiques et suite à une prospection du marché, nous proposons une solution de développement de deux types de sonde : (1) une sonde filaire qui permet le suivi d'une mesure ponctuelle, et (2) une sonde autonome pour une utilisation en observation long terme. Toutes les deux auront une aiguille de longueur de 60 cm avec minimum 6 points de mesures de type thermistance pour obtenir la haute précision et résolution nécessaire. Une plage de température assez large est envisagée (2° à 130°C) si la technologie actuelle le permet sans perte de résolution pour la plage classique de (2° à 20°C). Dans une première estimation, le budget disponible pour le développement dans le lot 2.4 permettra bien le développement et l'achat de deux sondes filaires (avec suivi de mesure en direct comme prévu, mais sans wifi) et 2 à 6 sondes autonomes. Cela donnera accès aux deux types de sondes pour une large communauté.



**Figure 1.** Sonde de gradient de température T-ROV (Ifremer) qui n'est plus disponible



**Figure 2.** Exemple de mesure de température in-situ et gradients de température associés (dans le Tsanyao Yang Knoll avec le T-stick de Marum)

Le cahier des charges fonctionnel liste les exigences liées à l'équipement pour couvrir son cycle d'utilisation lors d'une campagne type :

- Préparation de la campagne et de l'équipement
- Transport du système vers le lieu de la mobilisation
- Installation de l'équipement à bord / sur l'engin
- Utilisation de l'équipement lors d'une plongée type
- Désinstallation
- Transport du système vers le lieu de conditionnement / labo
- Maintenance si nécessaire

Dans la suite, les exigences seront classées dans les trois catégories suivantes :

- Exigences opérationnelles (EO)
- Exigences fonctionnelles scientifiques (EF)
- Exigences techniques (ET)

## 2. Définition des exigences et des niveaux de priorité

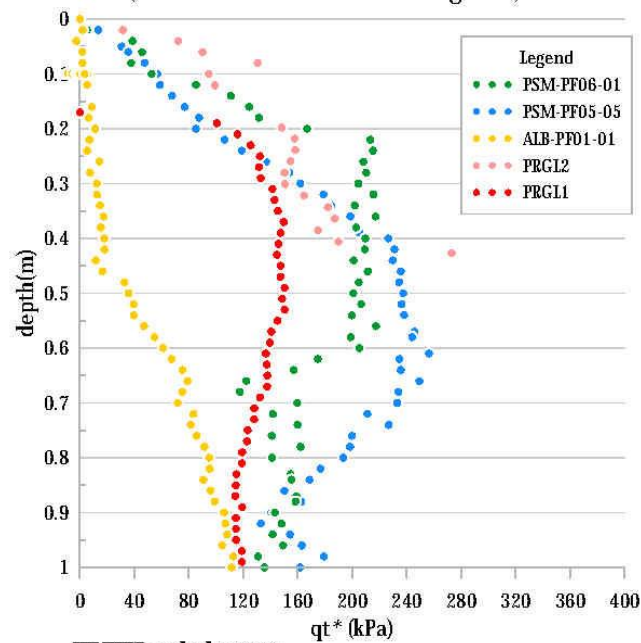
Les exigences principales pour la **sonde autonome de gradient de température** :

- 1) Développement **d'un prototype** de sonde autonome de gradient de température qui permet une mesure autonome longue terme (1 jour à 1 an) avec mise en place et récupération par un engin de type ROV.
- 2) Une tige de longueur de 50-60 cm pour insérer dans les sédiments avec minimum 5 à 6 points de mesures de type thermistance (T1 à T6)
- 3) Remplissage de la tige avec une huile qui compense la pression et qui a une diffusivité thermique basse pour minimiser les perturbations de la profile de température par la conduction le long de l'aiguille
- 4) Exigence au niveau de la calibration des thermistances pour obtenir la haute précision et résolution nécessaire (voir tableau ci-dessous).
- 5) Exigence au niveau de l'étanchéité pour une utilisation dans des profondeurs d'eau de 6000m
- 6) Un déclenchement de la mise en route et arrêt via programmation
- 7) Une cadence de mesure variable (1 seconde, 1 min, 1 heure, 1 jour). Besoin donc d'un horloge interne performante.
- 8) Logiciel Windows qui permet la programmation, le mise à l'heure, téléchargement des données stockées, et suivi de batterie.
- 9) Dimensionnement d'espace de stockage est par rapport à la cadence et durée de mesure (cadence 1 sec → 1 journée, cadence 10 min → 1 an)
- 10) Une batterie fiable et de préférence rechargeable qui permet la cadence/durée mentionné en (9)
- 11) Un essai de la sonde « prototype » dans un caisson hyperbare et un essai pendant une mission ROV (organisé par ISTeP dans le cadre du projet DeepSea'nnovation)
- 12) Achat d'une à cinq sondes autonomes supplémentaires après les essais et corrections identifiées sur le prototype

Les autres exigences opérationnelles (EO) et fonctionnelles (EF) avec un ordre de priorité : P0 = Exigence principale conditionnant le fonctionnement de l'équipement ; P1 = Exigence souhaitée présentant un intérêt fort pour l'équipement ; et P2 = Critère optionnel

Référence	Libellé de la fonction	Description détaillée de la fonction / valeurs attendues	Niveau de priorité
EO_01	Dimension de l'instrument	Tige active d'une longueur 50 à 60 cm Diamètre <15 mm, épaisseur max. des parois 3 mm (Hyndman et al., 1979 ; Feseker et al., 2012)	P0
EO_02	Solidité de la tige	Remplissage de la tige avec une huile qui compense la pression. Pendant la pénétration dans les sédiments, il doit résister à un chargement axial de 100 daN sans flambage (caractéristiques géotechniques des sédiments : $f_s = 20 \text{ kPa}$ = frottement du manchon, et $q_t = 1 \text{ MPa}$ = résistance de pointe)	P1
EO_03	Point de mesure	5 à 6 points de mesure de type thermistance dans la tige (intervalle de 10 à 12 cm)	P0
EO_04	Conduction dans la tige	L'huile de remplissage doit avoir une diffusivité thermique basse pour minimiser les perturbations de la profile de température par la conduction le long de la tige	P0
EO_05	Connectique	USB pour la connexion à un ordinateur à bord	P0
EO_06	Contrôle de la verticalité	Tolérance $18^\circ = 5\%$ d'erreur sur la mesure de gradient L'intégration d'un inclinomètre serait un avantage	P1
EO_07	Étanchéité	Sonde étanche jusqu'à 6000m de profondeur d'eau	P0
EO_08	Software de configuration et téléchargement données	Logiciel Windows qui permet la programmation de la cadence de la mesure (1 sec à 1 jour), la mise à l'heure, téléchargement des données stockées, et suivi de batterie.	P0
EO_09	Batterie rechargeable	Une batterie rechargeable fiable qui permet la durée d'acquisition de la mesure de gradient (voir EF_03)	P1
EF_01	Mesure de gradient de température	Précision de 1 mK/10 cm	P0
EF_02-a	Mesure de température basse	Plage de température : $0^\circ$ à $30^\circ\text{C}$ Précision/résolution : précision de $0.05^\circ\text{C}$ et résolution $0.001^\circ\text{C}$	P0
EF_02-b	Mesure de température haute	Plage de température : $30^\circ$ à $130^\circ\text{C}$ Précision/résolution : précision et résolution dégradée acceptée	P1
EF_03	Durée d'acquisition de la mesure de gradient	Dimensionnement d'espace de stockage et de la batterie par rapport à la cadence et durée de mesure (cadence 1 sec $\rightarrow$ 1 journée, cadence 10 min $\rightarrow$ 1 an, 30 min $\rightarrow$ 2 ans)	P0
EF_04	Horloge interne	Performante et stable à la seconde	P0
EF_05	Mesure de température de l'eau	Précision de $0.05^\circ\text{C}$	P0
EF_06	Mesure de conductivité thermique in-situ	optionnel	P2

Expected corrected tip resistance ( $q_t$ ) of fine-grained marine sediments  
(western mediterranean testing sites)



**FENFELD seabed system:**

PSM: Balearic margin of Eivissa Channel contourite (carbonate dominated)

ALB: Souther margin of Alboran Sea contourite (terrigenous dominated)

**Fugro down-hole system:**

PRG2: Gulf of Lion outer shelf (terrigenous)

PRGL1: Gulf of Lion upper slope (terrigenous)

\* measures with a  $10 \text{ cm}^2$  CPT tip

**Figure 3.** Quelques exemples des valeurs  $q_t$  (correctip tip resistance) mesurées dans le premier mètre des sédiments de différents environnements marins profonds (comm. pers. Sara Lafuerza, 2023).

### 3. Exigences opérationnelles de l'équipement

#### 3.1. Engins porteurs souhaités

Engin		Priorité
ROV+	Oui	-
Victor	Oui	P0
UlyX	Non	
Nautile	Oui	P0
Ariane	Oui	P1
AUV IdefX/AsterX	Non	

### 3.2. Conditions d'environnement

Condition	Valeur (idem Victor/ROV+)
Immersion maximale	6000 m (pression équivalente : 625 bars)
Température eau	-2°C à +130°C
Température air (sur le pont)	-20°C à +50°C
Température de stockage	-20°C à +60°C (sans disposition particulière)
Résistance à l'eau de mer	Titane

L'ensemble de ces contraintes sont par défaut en P0 en vue de la compatibilité complète avec les conditions d'utilisation des ROVs.

Les sondes ne comporteront pas de matériel dangereux, ni de produits chimiques, ni radioactif, ni biologique.

### 3.3. Exigences de mise en œuvre opérationnelle

Le développement d'une sonde autonome implique qu'elle sera totalement autonome pour son alimentation. Le bras du ROV devra les placer sur leur cible et assurer une insertion verticale et complète dans le sédiment. Pour la préparation de la sonde, les décisions opérationnelles pendant la plongée, la récupération et analyse des données un seul utilisateur formé en amont est nécessaire.

#### 1. Manipulation de la sonde

Les sondes autonomes seront transportées dans le panier dans des supports qui protègent leur aiguille fine (longueur d'environ 60 cm et diamètre <15 mm) contre toute déformation accidentelle. Un support avec des emplacements pour plusieurs sondes est à prévoir (3 à 5). L'utilisation d'une sonde factice (dummy sans électronique) est fortement recommandée pour assurer qu'il y a assez de sédiment pour enfoncer la sonde entièrement. Cette sonde factice demande un emplacement en plus.

L'insertion de l'aiguille dans les sédiments doit être faite impérativement d'une façon verticale pour évaluer correctement le flux de chaleur vertical, mais également pour éviter de tordre l'instrument. Une cartographie optique et une analyse 3D avec les caméras de ROV sont essentielles pour deux raisons : (1) la reconnaissance des lieux pour bien cibler l'endroit d'insertion de la sonde et éviter un substratum dur, et (2) l'analyse de verticalité et de profondeur d'insertion de la sonde dans le sédiment. Pour les zones de suintement de fluides (encrouement potentiel du sous-sol avec carbonates et hydrates), l'utilisation d'un outil factice en amont pourra aider à identifier les sites adaptés pour une mesure.

#### 2. La sonde in-situ

La stabilité du ROV est très importante pour l'insertion de la sonde dans les sédiments. Chaque traction sur la sonde et son câble perturbera la mesure et compliquera fortement son analyse et sa qualité. La question du ROV posé sur le fond ou en pleine eau est à définir en fonction de cette problématique.

Les sondes autonomes seront déployées pour une observation plus long terme avec une programmation de temps et cadence de mesure en amont. A la différence de la sonde filaire, les sondes autonomes auront la nécessité de contenir un capteur de mesure de température de l'eau pendant leur acquisition in-situ.

### 3. Préparation avant plongée

Avant chaque plongée, l'utilisateur devra s'assurer que les capteurs répondent correctement, que le data logger est vide, que la batterie est assez remplie, que les horloges sont à jour et à l'heure, que les connecteurs étanches sont bien protégés.

### 4. Action après plongée

Une fois la sonde récupérée de sa plongée, l'état de l'aiguille est à vérifier car une toute petite déformation peut induire une difficulté pour l'insertion. Pour les sondes autonomes, les données sont à télécharger et l'état des batteries à vérifier.

### 5. Autres équipements déployés en même temps

Le vibro-carottier (WP3.2) sera indispensable sur le même site d'utilisation que la sonde de température si on souhaite obtenir le flux de chaleur, mais le déploiement des deux outils peut se faire lors de deux plongées consécutives. Les carottes prises avec le vibro-carottier permettront de mesurer la conductivité thermique à bord du navire. Cela nécessitera l'utilisation d'un conductimètre à bord, un outil qui n'est pas pris en charge dans le projet DeepSea'nnovation, mais qui est disponible dans l'institut ISTeP (Sorbonne Université).

La stratégie scientifique multi-capteur avec la sonde de température dépendra du scénario de plongée envisagé (exploration, chantier ou observatoire). Dans des plongées exploratoires, il peut être intéressant de prendre la sonde pendant un survey acoustique, lidar ou CSEM, pour des mesures ponctuelles en périphérie des zones de migration de fluide. Pour une plongée sur un chantier, une utilisation avec les autres outils in-situ de DeepSea'nnovation sera une stratégie fortement à recommander pour les sites de suintement actif. Si une observation est prévue dans le projet, quelques sondes de température autonomes sont aussi à amener dans le panier pour planter pendant une période plus longue sur les sites actifs.

## 3.4. Exigences de maintenance, de calibration

Pendant le projet DeepSea'nnovation, ISTeP est en charge de l'exploitation des sondes de gradient de température. Elles seront stockées à ISTeP et maintenues en état par ces agents. En particulier l'état des batteries des sondes autonomes sont à vérifier après chaque campagne en mer. ISTeP mettra aussi en place une procédure de calibration (en interne ou externe). Le modèle d'exploitation sera redéfini après le projet.

## 4. Exigences fonctionnelles scientifiques de l'équipement

La fonction principale de la sonde de gradient de température sera de mesurer dans les premiers 60 cm des sédiments la température en plusieurs points (minimum 6) à très haute précision et résolution (milli degré). Pour des déploiements observation long terme avec les sondes autonomes, la fréquence d'acquisition doit être programmée en avance (variable entre 1 sec et un jour) et la température de l'eau doit également être enregistrée. Les gradients verticaux de température combinés avec des mesures de conductivité thermique de sédiment in-situ ou à bord sur une carotte de sédiment permettront d'obtenir le flux de chaleur de conduction.



#### 4.1. Description scientifique de l'équipement

Les sondes de gradient de température pour ROV permettront d'obtenir des informations haute-résolution sur l'état thermique et le flux de chaleur et fluides dans les premiers 60 cm des sédiments marins. Dans cette première partie des couches sédimentaires, les plus grandes variations de gradient et de flux sont à attendre. Elles témoigneront d'un système non-stationnaire associé à des migrations de fluides focalisées, une activité biogéochimique élevée, la formation/dissociation des hydrates, mais également à des courants d'eau peu étudiés près du fond des océans. Aussi latéralement, l'utilisation de la sonde de température avec le ROV augmentera la résolution par rapport aux mesures classiques de flux de chaleur et permettra de travailler à une échelle moins que métrique au lieu de 50 à 100 m.

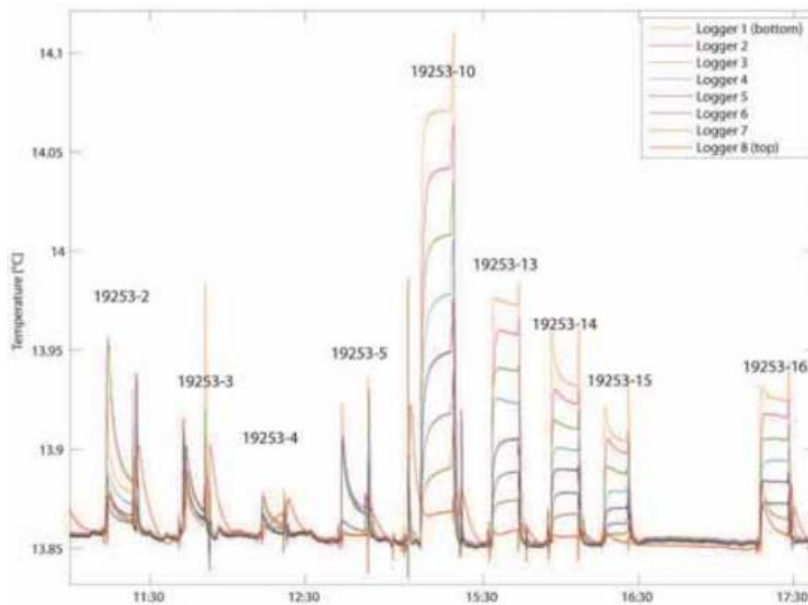
Pour répondre aux objectifs scientifiques, le développement de deux types de sonde est prévu : (1) une sonde filaire qui permet le suivi d'une mesure ponctuelle, et (2) une sonde autonome pour une utilisation en observation long terme. Toutes les deux auront une aiguille de longueur de 60 cm avec minimum 6 points de mesures de type thermistance pour obtenir la haute précision et résolution nécessaire. Une plage de température assez large est envisagée (-2° à 130°C) si la technologie actuelle le permet sans perte de résolution pour la plage classique de (2° à 20°C). Cela donnera accès aux deux types de sondes pour une large communauté.

#### 4.2. Périmètre d'utilisation

La sonde de flux de chaleur est destinée à être utilisée in-situ dans des milieux sablo-vaseux ou argileux. La présence importante de coquilles, de cailloux, de croute carbonatée ou d'autre substratum dur dans le sédiment pourra poser un problème d'insertion de l'aiguille, et même une déformation et casse de cette aiguille fragile. La sonde devra de préférence être installée sur un sol plat pour éviter des effets de relief sur le champ thermique, mais pourra accepter une légère pente du terrain (<5°). Pour la profondeur d'eau du chantier, il est fortement recommandé de sélectionner des sites à plus de 500 m (même 1000m) pour avoir une température stable de fond de mer. La thermocline mais aussi des courants plus profondes induisent des variations de température assez fortes qui perturbent le champ thermique proche de surface de sédiment.

#### 4.3. Gestion des données/échantillons

La sonde de gradient de température permet d'obtenir ce gradient dans les premiers 60 cm de sédiment grâce à la mesure de la température en haute précision et résolution à différents intervalles fixes définis par le positionnement des thermistances dans l'aiguille. La cadence de mesure est typiquement une par seconde. Sur un site donné, la séquence de mesure consiste à : (1) garder stable pendant 2 à 5 min près du fond pour réaliser une inter-calibration afin d'établir une référence commune pour la mesure du gradient ; (2) insérer verticalement l'aiguille dans les sédiments qui produira un réchauffement des températures ; (3) rester 7 à 10 minutes in-situ sans bouger pour avoir les courbes de relaxation qui permettront de calculer les températures d'équilibre et les gradients entre eux ; (4) remonter l'aiguille qui produira de nouveau un réchauffement des températures. Cette séquence est à répéter pour le nombre de sites à mesurer qui dépend des objectifs de la plongée (figure 4).



**Figure 4.** Un exemple de la séquence d'acquisition avec une sonde de gradient de température : ici neuf mesures sont faites dans le volcan de boue Cetus avec le T-stick avec 8 thermistances (Bohrmann et al., 2015) :

Les données à stocker sont donc une série temporelle de plusieurs températures. Si disponible, les données d'accéléromètre trois composantes et/ou d'autres paramètres renseignant sur la verticalité et l'enfoncement de la sonde (photos du site) sont aussi à stocker. La procédure de stockage de données dépend du type de la sonde de gradient de température. Pour la sonde autonome, les données seront stockées dans la mémoire de la sonde et téléchargées une fois récupérée à bord. Si la sonde autonome reste longtemps in-situ, il n'y aura plus besoin d'un post-traitement. Pour l'utilisation d'une sonde autonome en observatoire, le choix de fréquence d'acquisition, en fonction de la durée du déploiement et de l'énergie et l'espace de stockage disponible dans la sonde est important. Ce type de mesure permettra de suivre la variabilité temporelle de l'activité des sites, et est donc très complémentaire aux mesures ponctuelles qui auront pu identifier initialement les sites les plus actifs.

A noter de nouveau que pour obtenir un flux de chaleur à partir des données de gradient de température, il faudra obtenir en plus la conductivité thermique de différents intervalles de mesure de gradient. La conductivité thermique peut être mesurée à bord du navire sur des carottes de sédiment récupérées par le vibro-carottier du ROV en utilisant un conductivimètre comme le Hukseflux disponible à ISTEPh. Le prélèvement de sédiment sur le site d'étude après la récupération de la sonde est donc nécessaire pour qu'on puisse calculer les valeurs de flux de chaleur sur ce site.

## 5. Exigences techniques

### 5.1. Exigences mécaniques

#### 5.1.1. Caractéristiques mécaniques

La sonde autonome sera composée d'une unité électronique et d'une aiguille fine de 60 cm dans laquelle se trouvent les thermistances à des intervalles fixes. Une fonction d'importance pour le développement est l'équilibre entre la robustesse d'une aiguille fine de 50- 60 cm et les contraintes

sur (1) le diamètre et (2) la conduction thermique des matériaux utilisés. Pour le T-stick de Marum les analyses ont montré qu'un tube en acier inoxydable de diamètre extérieur 12 mm et rempli d'une huile de faible conductivité thermique était adapté aux mesures dans les sédiments vaseux (Feseker et al., 2012). Il faudra aussi assurer l'étanchéité à l'utilisation dans des profondeurs d'eau de 6000m.

Le poids d'une sonde ne doit pas dépasser 1 à 3 kg en air, mais des scénarios de plongée avec plusieurs sondes sont à considérer également. En vue de la fragilité de l'instrument, des supports spécifiques pour le transport dans le panier ou ailleurs sur le ROV sont à recommander, en particulier pendant des plongées multi-capteurs.

#### 5.1.2. Contraintes d'intégration

Le développement d'une sonde autonome implique qu'elle sera totalement autonome pour son alimentation. Le bras du ROV devra les récupérer de leur support, les placer sur leur cible et assurer une insertion verticale et complète dans le sédiment.

Un support avec des emplacements pour plusieurs sondes est à prévoir (3 à 5). L'utilisation d'une sonde factice (dummy sans électronique) est fortement recommandée et demande un emplacement en plus. Le bras du ROV devra être en mesure de fixer les sondes d'une telle façon qu'elles soient récupérées de leur emplacement sans risque de torde l'aiguille, et que le bras assure l'insertion de cette aiguille verticalement dans les sédiments.

Une cartographie optique et une analyse 3D avec les caméras de ROV sont essentielles pour deux raisons : (1) la reconnaissance des lieux pour bien cibler l'insertion de la sonde et éviter un substratum dur, et (2) l'analyse de verticalité et de profondeur d'insertion de la sonde dans le sédiment. La vision de devant doit donc être libre sans interférence.

#### 5.1.3. Interface hydraulique (si nécessaire)

Sans objet

### 5.2. Exigences électriques et signaux

#### 5.2.1. Alimentation électrique

Pour les sondes autonomes, sa puissance électrique sera fournie par batterie placées dans l'unité électronique de la sonde et sera donc indépendante d'une alimentation du ROV. La batterie rechargeable et fiable doit permettre une durée d'acquisition de la mesure de gradient dimensionnée par rapport à la cadence et la durée de mesure (cadence 1 sec → 1 journée, cadence 10 min → 1 an, 30 min → 2 ans)

#### 5.2.2. Communication/signaux

Pour les sondes autonomes aucune communication entre le ROV et la sonde filaire est à prévoir. Par contre, une connexion USB doit être prévue pour la connexion à un ordinateur à bord

### 5.3. Exigences informatiques & IHM

Pour la sonde autonome le développement de l'IHM est important avant la mise à l'eau et après la récupération à bord. La connexion avec un ordinateur à bord peut se faire par USB. Un logiciel Windows est à prévoir qui permet la programmation (cadence de mesure), la mise à l'heure, le téléchargement des données stockées et une suivi de batterie.

## Bibliographie

Feseker T, Wetzel G and Heesemann B. Introducing the T-Stick: a new device for high precision in situ sediment temperature profile measurements. *Limnol Oceanogr Meth* 2012; 10(1): 31–40.