

## INTRODUCTION

Comme la lumière, le son peut transmettre de l'information ou de l'énergie. Comme la lumière, le son est un phénomène ondulatoire mais c'est une onde mécanique et non pas électromagnétique. On retrouve donc les propriétés habituelles des ondes en liaison avec le milieu de propagation : vitesse, fréquence, réflexion, réfraction, diffraction, diffusion, absorption, interférences.

- 1) Vitesse : elle dépend considérablement du milieu (compressibilité, masse volumique) ainsi que des conditions (pression, température) et à un degré moindre de la fréquence (dispersion).

Exemples (à 20° et 1,013 bar) en m/s :

| Air | Eau  | Glace | Verre | Acier | Plomb | PVC (mou) | PVC (dur) | Béton | Hêtre | Granit | Sable    |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-------|-------|--------|----------|
| 343 | 1480 | 3200  | 5300  | 5200  | 1200  | 80        | 1700      | 3100  | 3300  | 6200   | 10 à 300 |

- 2) Fréquence : elle permet de classer les sons en infrasons ( $f < 20$  Hz), sons (audibles) entre 20 Hz et 20 kHz et ultrasons (au delà de 20 kHz).  
La fréquence peut être modifiée par effet Doppler si la source et le récepteur sont en mouvement relatif.
- 3) Réflexion et réfraction se manifestent lors du passage d'un milieu de propagation à un autre.
- 4) Diffraction et interférence sont liées à la nature ondulatoire des sons
- 5) L'atténuation de l'onde sonore est provoquée par de diffusion ou l'absorption par le milieu. Elle peut alors s'accompagner de transferts d'énergies (échauffements, cavitation).

Toutes ces propriétés permettent l'usage des sons et des ultrasons dans des domaines très variés (militaire, médecine, industrie mécanique, textile ou alimentaire, analyse physico-chimique...) pour des applications nombreuses (vélocimétrie, sonar, imagerie médicale, nettoyage, catalyseur chimique, soudage, découpe ...) nous nous intéresserons plus particulièrement à son emploi en télémétrie (1ere partie) et en CND (2ème partie).

Ouvrir le logiciel [4US\\_Bases\\_acous](#) sur la page "[Dossiers Techniques](#)" du site pour mieux acquérir les bases théoriques concernant les ondes acoustiques.

[http://fjehin.free.fr/LP/DOC/DossiersTechniques/4\\_accueil\\_US.Ink](http://fjehin.free.fr/LP/DOC/DossiersTechniques/4_accueil_US.Ink)

## TELEMETRIE - PRINCIPES

### 1. Télémétrie laser et ultrasons

De façon schématisée, on peut classer la télémétrie par techniques laser de la façon suivante :

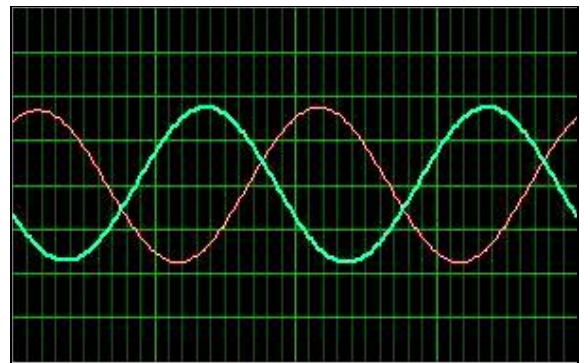
- **Interférométrie**: distances mesurées de quelques  $\mu\text{m}$  pouvant aller jusqu'à 100 m.
- **Télémétrie par modulation de faisceau** : on mesure le déphasage entre les signaux émis et reçus. On calcule ensuite la distance émetteur-cible en général de quelques mètres à quelques kilomètres.
- **Télémétrie par mesure du temps de vol** : on mesure la durée qui sépare les signaux émis et reçus. On calcule ensuite la distances en général très grande.
- **Triangulation** : c'est une adaptation de la méthode utilisée en topographie basée sur la connaissance d'une distance et de deux angles. Utilisée pour la robotique et le contrôle dimensionnel.

Un télémètre laser à comparaison de phase utilise une diode laser dont l'intensité lumineuse est modulée avec une fréquence  $N = 60 \text{ MHz}$ .

Calculer la période  $T$  et la longueur d'onde  $\lambda$  de modulation (on prend  $c = 3.00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ).

Quel sera le retard de phase (en rad et en degrés) si  $D = 2 \text{ m}$  ?

Quel est le retard de phase sur l'exemple du cadre 1.



cadre 1 : Signal émis en trait fort (vert) et signal reçu en trait fin (rouge) sur l'écran d'un oscilloscope.

La localisation de défauts sur une ligne à fibres optiques opère par rétrodiffusion. Elle s'inspire de la méthode du temps de vol en télémétrie. Chaque point d'un dioptre, chaque défaut et même chaque particule du cœur de la fibre est un centre réfléchissant ou diffusant qui renvoie vers l'entrée une partie de la lumière qu'il reçoit.

La **réflectométrie** consiste à injecter dans la fibre une brève impulsion de lumière émise par une diode laser à l'instant  $t = 0$ , puis à mesurer le temps  $t$  que met le signal provenant des divers centres diffusants pour faire un aller-retour.

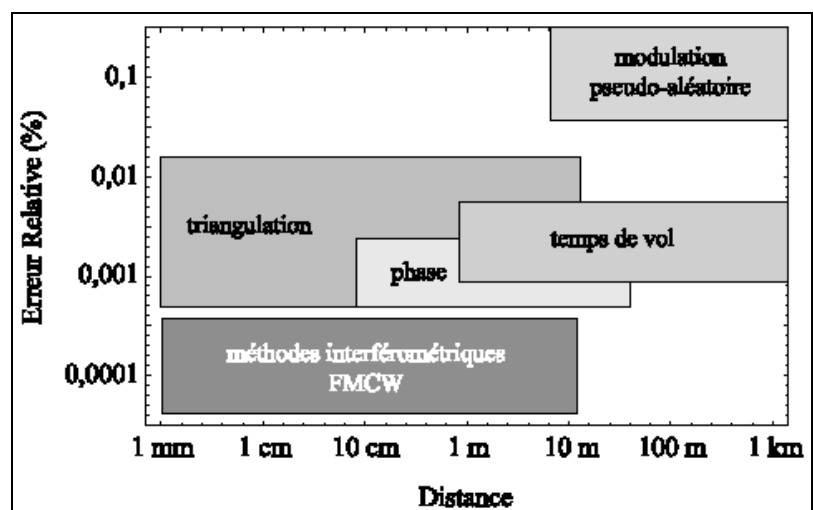
L'intérêt de la méthode est qu'elle permet de situer les défauts (ruptures, épissures, connecteurs défectueux) qui provoquent une augmentation brutale de l'amplitude des échos avec une précision de quelques mètres sur des distances de plusieurs kilomètres. Elle permet en outre de mesurer la longueur de la fibre et de contrôler le coefficient d'atténuation linéique.

La **niveaumétrie** sans contact utilise rarement les moyens optiques. On lui préfère les rayonnements gamma, les ondes radar ou les ultrasons.

On retrouve, dans la méthode par ultrasons, les caractéristiques de la télémétrie par temps de vol ainsi que celles de la réflectométrie.

Le système proposé par [Endress+Hauser](#) comprend une sonde installée au sommet de la cuve ou du silo, un transmetteur qui délivre un signal de 4-20 mA proportionnel au niveau de remplissage, une interface utilisateur permettant de configurer le système en fonction des besoins.

Dans le cas d'un signal lumineux, la vitesse de propagation est dans l'air  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Dans le cas d'un signal sonore, la célérité des sons est dans l'air (dans les conditions normales)  $v = 340 \text{ m/s}$ .



cadre 2 : Gamme de distance et erreur relative des principales techniques de télémétrie laser.

Si la mesure  $\tau$  du temps de vol se fait à  $\Delta\tau = \pm 0,01 \mu\text{s}$  près, quelle est la précision de la mesure de la distance de parcours d'un signal lumineux ?

Avec quelle précision faut-il mesurer la durée du temps de vol d'un signal sonore pour que l'erreur sur la distance mesurée n'excède pas 1 mm ?

## 2. Mesure de niveaux par ultrasons.

Voir le document "Théorie US.ppt". Répondre aux questions suivantes :

La sonde US utilise un transducteur fonctionnant successivement en émetteur et en récepteur. Quelle est ce transducteur ? Quel est l'ordre de grandeur (en kHz) des fréquences US utilisées ? Quel est l'ordre de grandeur de la vitesse des US ? De quelles variables physiques dépend la vitesse ?

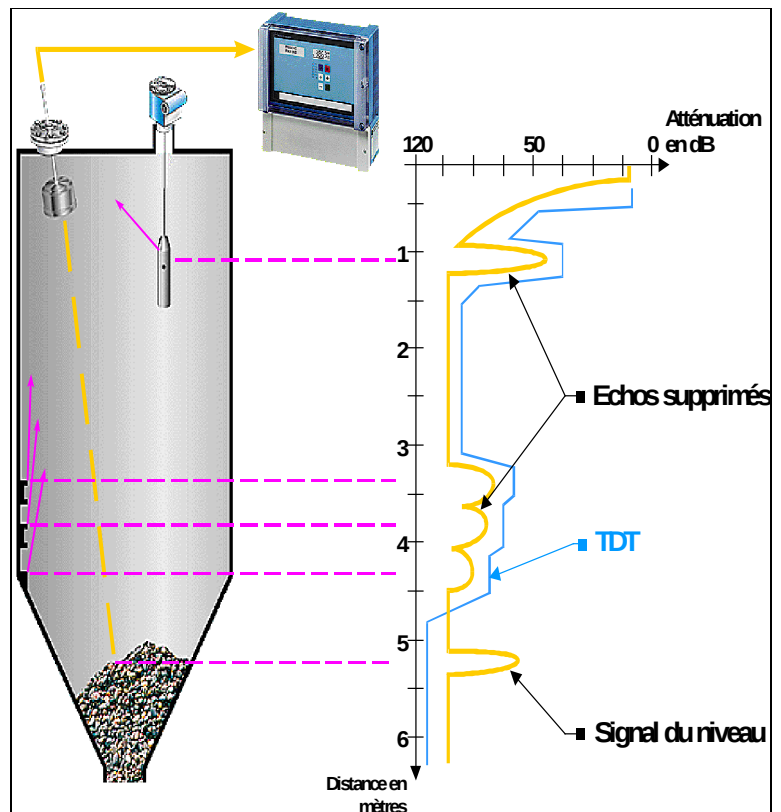
La source émet un signal pendant 1,0 ms ; 0,5 ms plus tard la membrane s'est suffisamment amortie pour pouvoir recevoir un écho. A quelle distance minimum B peut se trouver un obstacle détectable ?

A quelle distance se trouve la surface du produit si l'écho revient au bout de 6,0 ms.

Lorsque la cuve se vide, le niveau peut descendre à 5 m de la sonde. Quelle durée minimum sépare deux signaux successifs émis par la sonde ? En déduire (en Hz) la cadence d'impulsion des signaux (ne pas confondre avec la fréquence des US) ?

Le traitement du signal aboutit à une courbe enveloppe, comment s'obtient-elle ?

La courbe-enveloppe résulte de nombreux échos. On réalise au préalable une mesure de "tarage" lorsque la cuve est vide. Pour quelle raison ?



cadre 3 : courbe d'atténuation des ondes acoustiques.

Rq : site à consulter :

[http://artic.ac-besancon.fr/reseau\\_stl/FTP\\_STL/POISSENOT%20Niveaux/mesureparUS.htm#s2](http://artic.ac-besancon.fr/reseau_stl/FTP_STL/POISSENOT%20Niveaux/mesureparUS.htm#s2)

## MISE EN ŒUVRE

### 1. Niveaumétrie à ultrasons.

La sonde US [FMU40](#) est alimentée par l'intermédiaire d'une source 9V.

La configuration et la lecture des informations peuvent se faire directement sur la console munie d'un écran LCD (afficheur VU331) sous le couvercle du boîtier de la sonde. On préférera utiliser le PC et le logiciel d'exploitation [TOF Tool](#), la liaison se faisant par une boucle de courant (4... 20mA) utilisant le boîtier Commubox FXA191 et le protocole de communication HART. Voir [FMU40/43.pdf](#) pages 4 et 12.

Rq : HART : Marque déposée par la société HART Communication Foundation, Austin, USA .

TOF : Marque déposée par la société Endress+Hauser GmbH+Co., Maulburg, Allemagne.

Plus d'informations : <http://www.fr.endress.com/>

## 1.1 Montage.

Réaliser le montage, la sonde, placée à proximité du PC, émettra horizontalement vers le mur opposé à une distance d'environ 2 m.

Assurez vous que les liaisons d'alimentation et de communication sont correctement réalisées.

Ouvrir le logiciel TOFTool dont le raccourci est sur le bureau.

Valider le bus HART. Faire **balayage du bus** puis **connecter FMU 40**.

## 1.2 Configuration.

### 1) Remise à zéro des paramètres.

Dans le menu "**Diagnostic**" entrer la valeur 333 dans RàZ. Le système reprend alors les paramètres des réglages usine.

### 2) Etalonnage de base (page 32 de *FMU40/43.pdf*).

On prépare les conditions de la mesure (cadre 5) .

**Forme réservoir** = ouvert

**Caract. produit** = Solide > 4mm

**Cond. process** = variations rapides

**Etalonnage vide** = 2.200 m (par exemple)

**Etalonnage plein** = 1.900 m (tenir compte de la distance de blocage)

### 3) Linéarisation

On définit la grandeur **Niv./Vol.résid [(b) Niveau m/ft/in]**

### 4) Affichage

Préciser la langue.

### 5) Paramètre système

Préciser l'unité (m)

Réaliser quelques mesures de distances et niveaux (cadre 6).

Positionner la sonde à 2,0 m du mur. Des variations de niveaux peuvent être simulées en utilisant un écran en bois. Observer les indications de l'afficheur et sur PC.

Rq : il faut plusieurs secondes avant que l'afficheur LCD puis l'affichage sur PC ne signale un changement de niveau.

## Montrer votre montage

## 1.3 Courbe enveloppe.

### 1) Lire courbe

Vérifier l'absence d'obstacles entre la sonde et le mur.

Cliquez sur l'onglet "**courbe enveloppe**" puis demander "lire courbe". Les échos sont enregistrés.

Recommencer en plaçant des obstacles divers de part et d'autre du parcours des US.

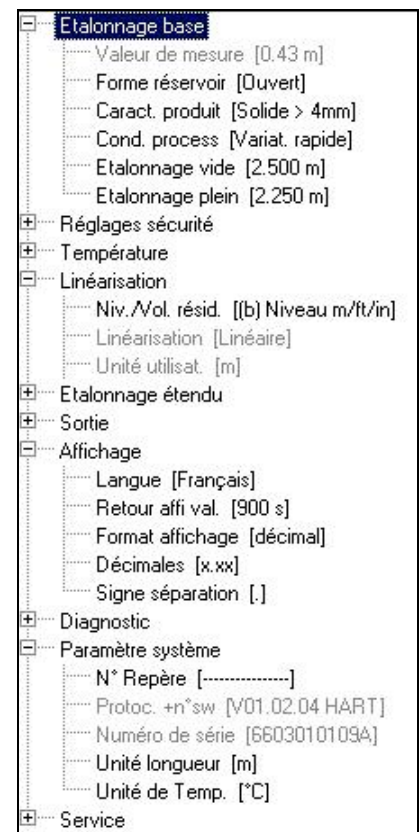
### 2) Etalonnage étendu

**Vérifier la distance** : manuelle

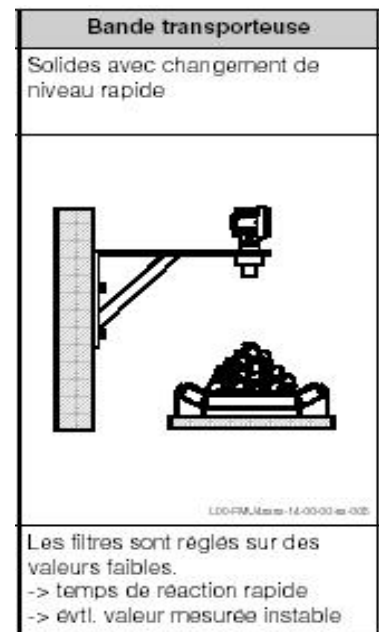
**Plage suppression** :

1.900 m (par exemple)

**Lancer mapping** : actif



cadre 4 : les groupes de fonctions.



cadre 5 : conditions de mesure

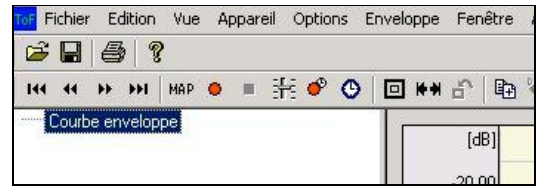
|                  |       |    |
|------------------|-------|----|
| Valeur de mesure | 19.13 | %  |
| Sortie courant   | 7.06  | mA |
| Distance mesurée | 2.069 | m  |
| Temp. mesurée    | 21.9  | °C |

cadre 6 : exemple d'un premier affichage sur PC

### 3) Map

Retourner à la courbe enveloppe et demander Map (Cadre 9).

Enregistrer une nouvelle enveloppe lorsque le niveau (écran en bois) est placé à 1.20 m environ de la sonde, sans déplacer les obstacles.



cadre 7 : courbe enveloppe

Enregistrer votre courbe sous *Nom\_date.crv*.

Observer les différents des échos. Identifier l'origine des différents échos observés. Comment juge-t-on de la qualité d'un écho ?

Lire le document technique TDT et FAC (voir les deux dernières pages de DT7\_LP.pdf) et expliquer comment le système permet d'exclure les échos parasites.



cadre 8 : étalonnage étendu



Cadre 9 : courbe enveloppe et mapping.

## 2. Réflectométrie. Mesure de rétrodiffusion sur kit EducOptic (facultatif)

Réaliser le montage décrit cadre 10. Ne pas trop amplifier le signal de manière à n'observer que la réflexion.

Mesurer (en précisant l'incertitude) le temps  $\Delta t$  qui sépare les **2 pics de réflexion** sur l'entrée et la sortie de F1 ou de F2. Éloigner le plus possible les pics et placer les curseurs au même niveau **sur le début des fronts montants**.

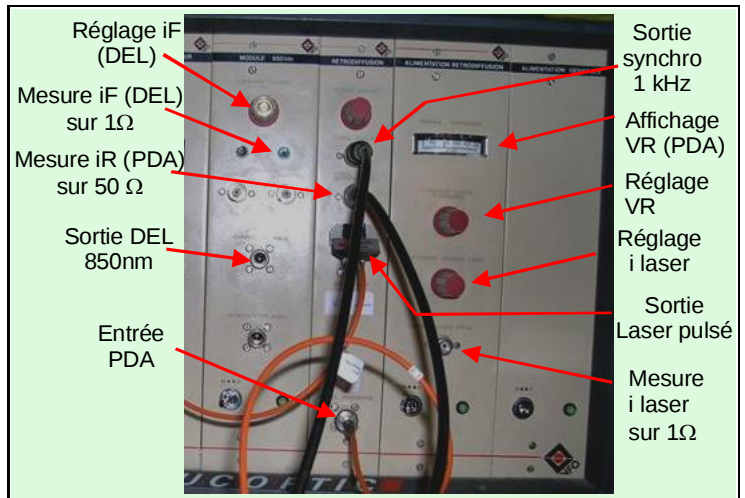
Amplifier le signal pour obtenir un signal important entre les pics (**signal rétrodiffusé**). Utiliser la fonction "AVERAGE" pour supprimer les bruits aléatoires. Faire une moyenne sur 256 valeurs. La partie située entre les 2 pics est une branche d'exponentielle décroissante.

Utiliser le logiciel *Tektro* pour transmettre les données vers l'ordinateur. Sélectionner le port série sous **Oscilloscope/Port série**. Vérifier sous **Oscilloscope/Test communication** que la liaison est correcte.

Par **Oscilloscope/Acquisition**, faire l'acquisition des spectres oscilloscope pour la fibre F1 ou la fibre F2.

Acquérir le graphe  $U = f(t)$ .

On traite ce signal pour obtenir un signal identique à celui obtenu sur un réflectomètre industriel. Faire **Analyse/ Rétrodiffusion**. Cliquer sur **Calculer Uref** et modifier éventuellement cette valeur. Cliquer sur **Tracer** pour visualiser la courbe  $At.(dBm) = f(l(km))$ .

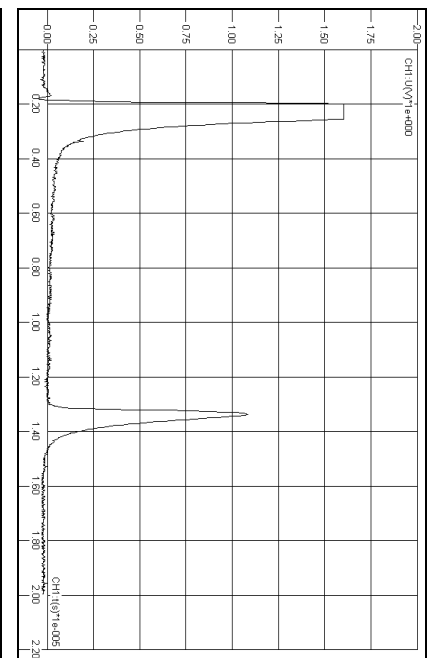
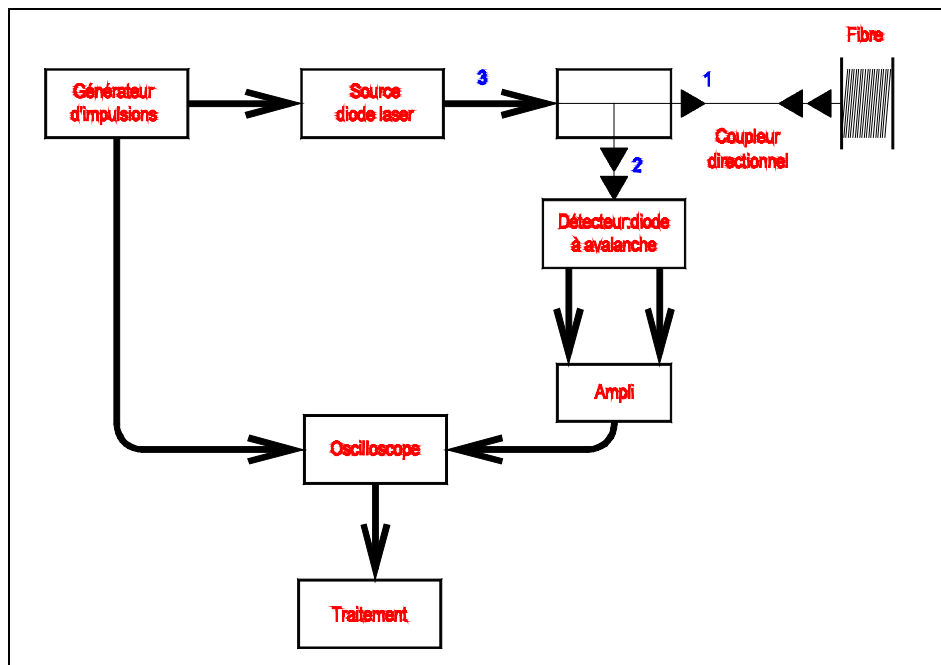


Cadre 11 : le module DL et PDA du Kit EducOptic

### Montrer le signal à un professeur.

#### Répondre oralement aux questions :

Comment mesure-t-on la longueur de la fibre ?  
De quoi dépend la précision sur cette mesure ?  
Quelle est l'atténuation linéique ?



cadre 12 : courbe de rétrodiffusion

cadre 10 : Schéma fonctionnel.

## ANALYSE DES PERFORMANCES

### 1. Application des ultrasons

Lire le document "Principes généraux des ultrasons" puis compléter le tableau suivant : cocher la case où, selon vous, la propriété est directement utilisée dans l'application.

|                                       | Vitesse | Fréquence | Réflexion | Réfraction | Absorption | Diffusion |
|---------------------------------------|---------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|
| Télémétrie par mesure du temps de vol |         |           |           |            |            |           |
| Echographie et imagerie médicale      |         |           |           |            |            |           |
| Télémétrie par mesure du déphasage    |         |           |           |            |            |           |
| Sonar et acoustique sous marine       |         |           |           |            |            |           |
| Analyse physico-chimique des mélanges |         |           |           |            |            |           |
| Débitmétrie                           |         |           |           |            |            |           |
| Niveaumétrie                          |         |           |           |            |            |           |
| CND                                   |         |           |           |            |            |           |

### 2. Niveaumétrie

Lire le document **niveau.mht** ou aller sur le site : <http://gatt.club.fr/page1/page27/page27.html> (principalement paragraphe 5). Voir aussi les sites cités en dernière page.

Répondre aux questions :

Observer les points communs aux systèmes sans contact. Dans quels cas la niveaumétrie sans contact doit être choisie ? Dans quels cas doit-on préférer un système avec contact ?

Quels sont les deux principaux avantages apportés par le système à ultrasons ? Quels sont ses deux principaux inconvénients ?

LISTE DU MATERIEL et DES LOGICIELS

| Type matériel                               | Nbre                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Où? | Où? | Remarques |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----------|
| Sonde à ultrasons avec VU331                | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | M4  |     | FMU40     |
| Interface FXA191 et liaisons                | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | M4  |     |           |
| Kit édutopic                                | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | m10 |     |           |
| Multimètres                                 | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | m10 |     |           |
| Cordon optique (jarretière)                 | 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | m10 |     |           |
| Micro-ordinateur                            | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | m10 |     |           |
| Imprimante                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |     |           |
| Logiciels                                   | Documents sur sites                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |     |           |
| Bas_acous (Eric Gindre)                     | <a href="http://fjehin.free.fr/LP/DOC/DossiersTechniques/4US_bas_acous/acc_base.html">http://fjehin.free.fr/LP/DOC/DossiersTechniques/4US_bas_acous/acc_base.html</a>                                                                                                                                                                                                  |     |     |           |
| TOFTool (Endress+Hauser)                    | <a href="#">TOF Tool</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |     |           |
| La sonde US Prosonic FMU40 (Endress+Hauser) | <a href="#">FMU40</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |     |           |
| Excel                                       | <a href="http://artic.ac-besancon.fr/reseau_stl/FTP_STL/POISSENOT%20Niveaux/mesureparUS.htm#s2">http://artic.ac-besancon.fr/reseau_stl/FTP_STL/POISSENOT%20Niveaux/mesureparUS.htm#s2</a><br><a href="http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/dereumaux/mesureniveau.htm#ultra">http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/dereumaux/mesureniveau.htm#ultra</a> |     |     |           |
|                                             | <a href="http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique">http://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique</a><br><a href="http://www.iut-lannion.fr/LEMEN/MPDOC/NTPF2/SERIE3/retrpres.htm">http://www.iut-lannion.fr/LEMEN/MPDOC/NTPF2/SERIE3/retrpres.htm</a>                                                                                                                   |     |     |           |