

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION

INSTRUMENTS AND OBSERVING METHODS

REPORT No. 86

TRAINING MATERIAL ON
METROLOGY AND CALIBRATION

(textes en français, Stage Métrologie)

Jérôme Duvernoy *(France)*

Aurélie Dubois *(France)*



WMO/TD-No. 1306

2006

NOTE

The designations employed and the presentation of material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the World Meteorological Organization concerning the legal status of any country, territory, city or area, or its authorities, or concerning the limitation of the frontiers or boundaries.

This report has been produced without editorial revision by the Secretariat. It is not an official WMO publication and its distribution in this form does not imply endorsement by the Organization of the ideas expressed.

FOREWORD

The Thirteenth Session of the Commission for Instruments and Methods of Observation (CIMO) recognized the need for training to include topical areas such as Metrology, with a target audience being Regional Instrument Centers (RICs). I wish to express my appreciation to Mr Duvernoy and his colleague Mr Dubois on their ongoing contributions in conducting training for RICs as well as evaluating RIC performance with the goal of strengthening their capabilities and performance.

This excellent training document provides the basic instruction and reference materials for operators to improve their understanding of how operational instruments function, are monitored and calibrated. The various modules address primary sensor principles of operation, instrument characteristics, strengths and weaknesses of the various instruments used to measure meteorological parameters, as well as each instrument's range of operation.

In addition, users of this training material will have access to documents addressing:

- ◆ Exploratory Data Analysis – an approach as to how data analysis should be carried out.
- ◆ Measurement Process Characterization - lays the groundwork for understanding the measurement process in terms of errors that affect the process.
- ◆ Production Process Characterization – describes how to analyze data collected in characterization studies and studies how interpret and report the results.
- ◆ Process Modeling – provided the background and specific analysis techniques needed to construct a statistical model that describes a particular engineering or scientific process.
- ◆ Process Improvement – introduces the basic concepts, terminology, goals and procedures underlying the proper statistical design of experiments.
- ◆ Process or Product Monitoring and Control – provides the basic concepts of statistical process control, quality control and process capability.
- ◆ Product and Process Comparison – provides the background and specific analysis techniques needed to compare the performance of one or more processes against known standards or one another.

I wish to affirm my sincere gratitude to Mr Duvernoy and Mr Dubois for their efforts in the preparation of these training documents.



(Dr. R.P. Canterford)

Acting President
Commission for Instruments and
Methods of Observation

TRAINING MATERIAL ON METROLOGY AND CALIBRATION

STAGE METROLOGIE

SYLLABUS

1. Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie
2. Métrologie et statistiques (*PowerPoint en anglais seulement*)
3. Guide théorique à l'estimation des incertitudes de mesure
4. Métrologie des températures
5. Mesure de l'humidité de l'air
6. Instruments de mesure de la pression
7. Infrastructure et instruments d'un laboratoire d'étalonnage : exemple du Laboratoire de Métrologie de Météo-France

TRAINING MATERIAL ON METROLOGY AND CALIBRATION

STAGE METROLOGIE

1. **Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie**
2. Métrologie et statistiques (*en anglais seulement*)
3. Guide théorique à l'estimation des incertitudes de mesure
4. Métrologie des températures
5. Mesure de l'humidité de l'air
6. Instruments de mesure de la pression
7. Infrastructure et instruments d'un laboratoire d'étalonnage : exemple du Laboratoire de Métrologie de Météo-France

STAGE METROLOGIE

**VOCABULAIRE INTERNATIONAL DES TERMES
FONDAMENTAUX ET GENERAUX DE
METROLOGIE**

Octobre 2005

STAGE METROLOGIE

Les définitions suivantes sont extraites du document :

Vocabulaire International des termes fondamentaux et généraux de Métrologie / Deuxième édition, 1993.

International Organisation for Standardization
Case Postale 56
CH 1211 GENEVE 20 - SWITZERLAND

1 - GRANDEURS ET UNITES

1.1. GRANDEUR (MESURABLE),

attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.

NOTES :

- 1 Le terme "grandeur" peut se rapporter à une grandeur dans un sens général ou à une **grandeur particulière**.
- 2 Les grandeurs qui peuvent être classées les unes par rapport aux autres en ordre croissant (ou décroissant) sont appelées **grandeurs de même nature**.
- 3 Les grandeurs de même nature peuvent être groupées ensemble en **catégorie de grandeurs**, par exemple :
 - travail, chaleur, énergie ;
 - épaisseur, circonférence, longueur d'onde.
- 4 Des **symboles de grandeurs** sont donnés dans l'ISO 31.

1.2. GRANDEUR DE BASE,

l'une des grandeurs qui, dans un système de grandeurs, sont admises par convention comme étant fonctionnellement indépendantes les unes des autres.

EXEMPLE : Les grandeurs longueur, masse et temps sont généralement prises comme grandeurs de base dans le domaine de la mécanique.

NOTE : Les grandeurs de base qui correspondent aux unités de base du Système international d'unités (SI) sont données dans la NOTE de 1.12.

1.4. GRANDEUR DERIVEE,

grandeur définie, dans un système de grandeurs, comme fonction des grandeurs de base de ce système.

EXEMPLE : Dans un système qui a pour grandeurs de base la longueur, la masse et le temps, la vitesse est une grandeur dérivée définie comme le quotient de la longueur par le temps.

STAGE METROLOGIE

1.7. UNITE (DE MESURE),

grandeur particulière; définie et adoptée par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement par rapport à cette grandeur.

NOTES :

- 1 Des noms et des symboles sont attribués par convention aux unités de mesure.
- 2 Les unités de grandeurs qui ont la même dimension peuvent avoir le même nom et le même symbole, même si ces grandeurs ne sont pas de même nature.

1.12. SYSTEME INTERNATIONAL D'UNITES, SI,

système cohérent d'unités adopté et recommandé par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM).

NOTE : Le SI est fondé actuellement sur les sept unités de base suivantes :

Grandeur	Unité SI de base	
	Nom	Symbole
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
temps	seconde	s
courant électrique	ampère	A
température thermodynamique	kelvin	K
quantité de matière	mole	mol
intensité lumineuse	candela	cd

1.13. UNITE (DE MESURE) DE BASE,

unité de mesure d'une grandeur de base dans un système donné de grandeurs.

NOTE : Dans tout système d'unités cohérent, il y a une seule unité de base pour chaque grandeur de base.

STAGE METROLOGIE

1.14. UNITE (DE MESURE) DERIVEE,

unité de mesure d'une grandeur dérivée dans un système donné de grandeurs.

NOTE : Pour certaines unités dérivées, il existe des noms et des symboles spéciaux ; par exemple, dans le SI :

Grandeur	Unité SI dérivée	
	Nom	Symbole
Force	newton	N
Energie	joule	J
Pression	pascal	Pa

1.18. VALEUR (D'UNE GRANDEUR),

expression quantitative d'une grandeur particulière, généralement sous la forme d'une unité de mesure multipliée par un nombre.

EXEMPLE :

- a) Longueur d'une tige : 5.34 m ou 534 cm ;
- b) masse d'un corps : 0.152 kg ou 152 g ;
- c) quantité de matière
d'un échantillon d'eau (H₂O) : 0.012 mol ou 12 mmol.

NOTES :

- 1 La valeur d'une grandeur peut être positive, négative ou nulle.
- 2 La valeur d'une grandeur peut être exprimée de plus d'une façon.
- 3 Les valeurs des grandeurs de dimension un sont généralement exprimées sous la forme de nombres.
- 4 Certaines grandeurs, pour lesquelles on ne sait pas définir leur rapport à une unité, peuvent être exprimées par référence à une échelle de repérage ou à un procédé de mesure spécifié ou aux deux.

1.19. VALEUR VRAIE (D'UNE GRANDEUR),

valeur compatible avec la définition d'une grandeur particulière donnée.

NOTES :

- 1 C'est une valeur que l'on obtiendrait par un mesurage parfait.
- 2 Toute valeur vraie est par nature indéterminée.

STAGE METROLOGIE

- 3 L'article indéfini "une" plutôt que l'article défini "la" est utilisé en conjonction avec "valeur vraie" parce qu'il peut y avoir plusieurs valeurs correspondant à la définition d'une grandeur particulière donnée.

1.20. VALEUR CONVENTIONNELLEMENT VRAIE (D'UNE GRANDEUR),

valeur attribuée à une grandeur particulière et reconnue, parfois par convention, comme la représentant avec une incertitude appropriée pour un usage donné.

EXEMPLES :

- a) En un lieu donné, la valeur attribuée à la grandeur réalisée par un étalon de référence peut être prise comme étant une valeur conventionnellement vraie ;
- b) Valeur recommandée par CODATA (1986) pour la constante d'Avogadro, N_A : $6,022\ 136\ 7 \times 10^{23}$ mol⁻¹.

NOTES :

- 1 La valeur conventionnellement vraie est quelquefois appelée **valeur assignée**, **meilleure estimation** de la valeur, **valeur convenue** ou **valeur de référence** ; le terme "valeur de référence", dans ce sens, ne doit pas être confondu avec le même terme utilisé dans le sens de la note de 5.7.
- 2 On utilise souvent un grand nombre de résultats de mesures d'une grandeur pour établir une valeur conventionnellement vraie.

2 - MESURAGES

2.1. MESURAGE,

ensemble d'opération ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

NOTE : Le déroulement des opérations peut être automatique.

2.2. METROLOGIE,

science de la mesure.

NOTE : La métrologie embrasse tous les aspects aussi bien théoriques que pratiques se rapportant aux mesurages, quelle que soit l'incertitude de ceux-ci, dans quelque domaine de la science et de la technologie que ce soit.

2.3. PRINCIPE DE MESURE,

STAGE METROLOGIE

base scientifique d'un mesurage.

EXEMPLES :

- a) L'effet thermoélectrique utilisé pour le mesurage de la température ;
- b) L'effet Josephson utilisé pour le mesurage de la tension électrique ;
- c) L'effet Doppler utilisé pour le mesurage de la vitesse ;
- d) L'effet Raman utilisé pour le mesurage du nombre d'onde des vibrations moléculaires.

2.4. METHODE DE MESURE,

succession logique des opérations, décrites d'une manière générique, mises en oeuvre lors de l'exécution de mesurages.

NOTE : La méthode de mesure peut être qualifiée de diverses façons telles que :

- **méthode de substitution**
- **méthode différentielle**
- **méthode de zéro.**

2.5. MODE OPERATOIRE (DE MESURE),

ensemble des opérations, décrites d'une manière spécifique, mises en oeuvre lors de l'exécution de mesurages particuliers selon une méthode donnée.

NOTE : Le mode opératoire est habituellement décrit dans un document qui est quelquefois appelé lui-même "mode opératoire" et qui donne assez de détails pour qu'un opérateur puisse effectuer un mesurage sans avoir besoin d'autres informations.

2.6. MESURANDE,

grandeur particulière soumise à mesurage.

EXEMPLE : Pression de vapeur d'un échantillon donné d'eau à 20 °C.

NOTE : La définition du mesurande peut nécessiter des indications relatives à des grandeurs telles que le temps, la température et la pression.

2.7. GRANDEUR D'INFLUENCE,

STAGE METROLOGIE

grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur le résultat du mesurage.

EXEMPLE :

- a) Température d'un micromètre lors de la mesure d'une longueur.
- b) Fréquence lors de la mesure de l'amplitude d'une tension électrique alternative.

2.8. SIGNAL DE MESURE,

grandeur qui représente le mesurande et qui lui est fonctionnellement liée.

EXEMPLE :

- a) Le signal électrique de sortie d'un transducteur de pression.

3- RESULTATS DE MESURE

3.1. RESULTAT D'UN MESURAGE,

valeur attribuée à un mesurande, obtenue par mesurage.

NOTES :

1. Lorsqu'on donne un résultat, on indiquera clairement si l'on se réfère :
 - à l'indication,
 - au résultat brut,
 - au résultat corrigé

et si cela comporte une moyenne obtenue à partir de plusieurs valeurs.

2. Une expression complète du résultat d'un mesurage comprend des informations sur l'incertitude de mesure.

3.3. RESULTAT BRUT,

résultat d'un mesurage avant correction de l'erreur systématique.

3.4. RESULTAT CORRIGE,

résultat d'un mesurage après correction de l'erreur systématique.

3.5. EXACTITUDE DE MESURE,

étroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande.

NOTES :

1. Le concept d'"exactitude" est qualitatif.
2. Le terme "**précision**" ne doit pas être utilisé pour "exactitude".

3.6. REPETABILITE (DES RESULTATS DE MESURAGE),

étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure.

NOTES :

STAGE METROLOGIE

1. Ces conditions sont appelées **conditions de répétabilité**.
2. Les conditions de répétabilité comprennent :
 - même mode opératoire,
 - même observateur,
 - même instrument de mesure utilisé dans les mêmes conditions,
 - même lieu,
 - répétition durant une courte période de temps.
3. La répétabilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.

3.7. REPRODUCTIBILITE (DES RESULTATS DE MESURAGE),

étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure.

NOTES :

1. Pour qu'une expression de la reproductibilité soit valable, il est nécessaire de spécifier les conditions que l'on fait varier.
2. Les conditions que l'on fait varier peuvent comprendre :
 - principe de mesure,
 - méthode de mesure,
 - observateur,
 - instrument de mesure,
 - étalon de référence,
 - lieu,
 - conditions d'utilisation,
 - temps.
3. La reproductibilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.
4. Les résultats considérés ici sont habituellement les résultats corrigés.

3.8. ECART-TYPE EXPERIMENTAL,

pour une série de n mesurages du même mesurande, grandeur s caractérisant la dispersion des résultats, donnée par la formule :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

STAGE METROLOGIE

x_i étant le résultat du $i^{\text{ème}}$ mesurage et \bar{x} la moyenne arithmétique des n résultats considérés.

NOTES :

1. En considérant la série de n valeurs comme échantillon d'une distribution, \bar{x} est un estimateur sans biais de la moyenne μ , et s^2 est un estimateur sans biais de la variance σ^2 de cette distribution.
2. L'expression s/\sqrt{n} est une estimation de l'écart-type de la distribution de \bar{x} et est appelée **écart-type expérimental de la moyenne**.
3. L'écart-type expérimental de la moyenne est parfois appelé, à tort, **erreur de la moyenne**.

3.9. INCERTITUDE DE MESURE,

paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

NOTES :

1. Le paramètre peut-être, par exemple, un écart-type (ou un multiple de celui-ci) ou la demi-largeur d'un intervalle de niveau de confiance déterminé.
2. L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurages et peuvent être caractérisées par des écart-types expérimentaux. Les autres composantes, qui peuvent aussi être caractérisées par des écart-types, sont évaluées en admettant des distributions de probabilité, d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres informations.
3. Il est entendu que le résultat du mesurage est la meilleure estimation de la valeur du mesurande, et que toutes les composantes de l'incertitude, y compris celles qui proviennent d'effets systématiques, telles que les composantes associées aux corrections et aux étalons de référence, contribuent à la dispersion.

Cette définition est celle du "Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure" où ses bases sont exposées en détail.

3.10. ERREUR (DE MESURE)

résultat d'un mesurage moins une valeur vraie du mesurande.

NOTES :

1. Etant donné qu'une valeur vraie ne peut pas être déterminée, dans la pratique on utilise une valeur conventionnellement vraie (voir 1.19 et 1.20).

STAGE METROLOGIE

2. Lorsqu'il est nécessaire de faire la distinction entre "l'erreur" et "l'erreur relative", la première est parfois appelée "**erreur absolue de mesure**". Il ne faut pas la confondre avec la **valeur absolue de l'erreur**, qui est le module de l'erreur.

3.11. ECART,

valeur moins sa valeur de référence.

3.13. ERREUR ALEATOIRE,

résultat d'un mesurage moins la moyenne d'un nombre infini de mesurages du même mesurande, effectués dans les conditions de répétabilité.

NOTES :

1. L'erreur aléatoire est égale à l'erreur moins l'erreur systématique.
2. Comme on ne peut faire qu'un nombre fini de mesurages, il est seulement possible de déterminer une estimation de l'erreur aléatoire.

3.14. ERREUR SYSTEMATIQUE,

moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurages du même mesurande, effectués dans les conditions de répétabilité, moins une valeur vraie du mesurande.

NOTES :

1. L'erreur systématique est égale à l'erreur moins l'erreur aléatoire.
2. Comme la valeur vraie, l'erreur systématique et ses causes ne peuvent pas être connues complètement.
3. Pour un instrument de mesure, voir "erreur de justesse" (5.25).

3.15. CORRECTION,

valeur ajoutée algébriquement au résultat brut d'un mesurage pour compenser une erreur systématique.

NOTES :

- 1 La correction est égale à l'opposé de l'erreur systématique estimée.

STAGE METROLOGIE

- 2 Puisque l'erreur systématique ne peut pas être connue parfaitement, la compensation ne peut pas être complète.

4- INSTRUMENTS DE MESURE

4.1. INSTRUMENT DE MESURE, APPAREIL DE MESURE,

dispositif destiné à être utilisé pour faire des mesurages, seul ou associé à un ou plusieurs dispositifs annexes.

4.2. MESURE MATERIALISEE,

dispositif destiné à reproduire ou à fournir, d'une façon permanente pendant son emploi, une ou plusieurs valeurs connues d'une grandeur donnée.

EXEMPLES :

- a) Masse marquée ;
- c) Résistance électrique étalon ;
- e) Générateur de signaux étalons.

4.3. TRANSDUCTEUR DE MESURE,

dispositif qui fait correspondre à une grandeur d'entrée une grandeur de sortie selon une loi déterminée.

EXEMPLES :

- a) Thermocouple ;
- b) Transformateur de courant ;
- c) Jauge de contrainte ;
- d) Electrode de pH.

4.4. CHAINE DE MESURE

suite d'éléments d'un appareil de mesure ou d'un système de mesure qui constitue le chemin du signal de mesure depuis l'entrée jusqu'à la sortie.

4.5. SYSTEME DE MESURE,

ensemble complet d'instruments de mesure et autres équipements assemblés pour exécuter des mesurages spécifiés.

STAGE METROLOGIE

EXEMPLES :

- a) Appareillage pour mesurer la conductivité des matériaux semi-conducteurs ;
- b) Appareillage pour l'étalonnage des thermomètres médicaux.

4.14. CAPTEUR,

élément d'un appareil de mesure ou d'une chaîne de mesure qui est directement soumis à l'action du mesurande.

EXEMPLES :

- a) Soudure de mesure d'un thermomètre thermoélectrique ;
- b) Rotor d'un débitmètre à turbine ;
- c) Tube de Bourdon d'un manomètre ;
- d) Flotteur d'un appareil de mesure de niveau ;
- e) Récepteur photoélectrique d'un spectrophotomètre.

4.15. DETECTEUR,

dispositif ou substance qui indique la présence d'un phénomène sans nécessairement fournir une valeur d'une grandeur associée.

EXEMPLES :

- a) Détecteur de fuite à halogène ;
- b) Papier au tournesol.

NOTES :

- 1 On peut n'avoir une indication que si la valeur de la grandeur atteint un seuil donné, parfois appelé **seuil de détection** du détecteur.
- 2 Dans certains domaines, le terme "détecteur" est utilisé pour le concept de "capteur".

4.29. CALIBRAGE (D'UN INSTRUMENT DE MESURE),

positionnement matériel de chaque repère (éventuellement de certains repères principaux seulement) d'un instrument de mesure en fonction de la valeur correspondante du mesurande.

STAGE METROLOGIE

NOTE : Ne pas confondre "calibrage" et "étalonnage".

4.30. AJUSTAGE (D'UN INSTRUMENT DE MESURE),

opération destinée à amener un instrument de mesure à un état de fonctionnement convenant à son utilisation.

NOTE : L'ajustage peut être automatique, semi-automatique ou manuel.

4.31. REGLAGE (D'UN INSTRUMENT DE MESURE),

ajustage utilisant uniquement les moyens mis à la disposition de l'utilisateur.

5- CARACTERISTIQUES DES INSTRUMENTS DE MESURE

5.2. INTERVALLE DE MESURE,

module de la différence entre les deux limites d'une étendue.

EXEMPLE : Pour un calibre de -10 V à +10 V, l'intervalle de mesure est 20 V.

NOTE : Dans certains domaines scientifiques, la différence entre la plus grande et la plus petite valeur est appelée **étendue**.

5.4. ETENDUE DE MESURE,

ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles l'erreur d'un instrument de mesure est supposée comprise entre des limites spécifiées.

NOTES :

- 1 L'erreur est établie par référence à une valeur conventionnellement vraie.
- 2 Voir note de 5.2.

5.5. CONDITIONS ASSIGNEES DE FONCTIONNEMENT,

conditions d'utilisation pour lesquelles les caractéristiques métrologiques spécifiées d'un instrument de mesure sont supposées comprises entre des limites données.

NOTE : Les conditions assignées de fonctionnement spécifient généralement des **valeurs assignées** pour le mesurande et pour les grandeurs d'influence.

5.6. CONDITIONS LIMITES,

conditions extrêmes qu'un instrument de mesure doit pouvoir supporter sans dommage et sans dégradation des caractéristiques métrologiques spécifiées lorsqu'il est ensuite utilisé dans ses conditions assignées de fonctionnement.

NOTES :

- 1 Les conditions limites peuvent être différentes pour le stockage, le transport et le fonctionnement.
- 2 Les conditions limites peuvent comprendre des valeurs limites pour le mesurande et pour les grandeurs d'influence.

STAGE METROLOGIE

5.7. CONDITIONS DE REFERENCE,

conditions d'utilisation prescrites pour les essais de fonctionnement d'un instrument de mesure ou pour l'intercomparaison de résultats de mesures.

NOTE : Les conditions de référence comprennent généralement des **valeurs de référence** ou des **étendues de référence** pour les grandeurs d'influence affectant l'instrument de mesure.

5.9. CARACTERISTIQUE DE TRANSFERT,

relation entre un signal d'entrée et la réponse correspondante, dans des conditions définies.

EXEMPLE : Force électromotrice d'un thermocouple en fonction de la température.

NOTES :

- 1 La relation peut s'exprimer sous la forme d'une équation mathématique, d'une table numérique ou d'un graphe.
- 2 Lorsque le signal d'entrée varie en fonction du temps, la fonction de transfert (quotient de la transformée de Laplace du signal de sortie par la transformée du Laplace du signal d'entrée) est une forme de la caractéristique de transfert.

5.10. SENSIBILITE,

quotient de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement correspondant du signal d'entrée.

NOTE : La valeur de la sensibilité peut dépendre de la valeur du signal d'entrée.

5.14. CONSTANCE,

aptitude d'un instrument de mesure à conserver ses caractéristiques métrologiques constantes au cours du temps.

NOTES :

- 1 Lorsque l'on considère la constance en fonction d'une grandeur autre que le temps, il est nécessaire de la mentionner explicitement.
- 2 La constance peut être exprimée quantitativement de plusieurs façons, par exemple :
 - par la durée au cours de laquelle une caractéristique métrologique évolue d'une quantité donnée, ou
 - par la variation d'une caractéristique au cours d'une durée donnée.

STAGE METROLOGIE

5.15. DISCRETION,

aptitude d'un instrument de mesure à ne pas modifier le mesurande.

EXEMPLES :

- a) Une balance est un instrument discret pour la mesure des masses ;
- b) Un thermomètre à résistance qui chauffe le milieu dont il doit mesurer la température n'est pas discret.

5.16. DERIVE,

variation lente d'une caractéristique métrologique d'un instrument de mesure.

5.17. TEMPS DE REPONSE,

intervalle de temps compris entre le moment où un signal d'entrée subit un changement brusque spécifié et le moment où le signal de sortie atteint, dans des limites spécifiées, sa valeur finale en régime établi et s'y maintient.

5.18. EXACTITUDE D'UN INSTRUMENT DE MESURE,

aptitude d'un instrument de mesure à donner des réponses proches d'une valeur vraie.

NOTE : Le concept d'"exactitude" est qualitatif.

5.20. ERREUR (D'INDICATION) D'UN INSTRUMENT DE MESURE,

indication d'un instrument de mesure moins une valeur vraie de la grandeur d'entrée correspondante.

NOTES :

- 1 Etant donné qu'une valeur vraie ne peut pas être déterminée, on utilise dans la pratique une valeur conventionnellement vraie (voir 1.19 et 1.20).
- 2 Ce concept s'applique principalement lorsqu'on compare l'instrument à un étalon de référence.
- 3 Pour une mesure matérialisée, l'indication est la valeur qui lui est assignée.

STAGE METROLOGIE

5.21. **ERREURS MAXIMALES TOLEREES (D'UN INSTRUMENT DE MESURE), LIMITES D'ERREUR TOLEREES,**

valeurs extrêmes d'une erreur tolérées par les spécifications, règlements, etc., pour un instrument de mesure donné.

5.24. **ERREUR INTRINSEQUE (D'UN INSTRUMENT DE MESURE),**

erreur d'un instrument de mesure déterminée dans les conditions de référence.

5.25. **ERREUR DE JUSTESSE,**

erreur systématique d'indication d'un instrument de mesure.

NOTE : L'erreur de justesse est normalement estimée en prenant la moyenne de l'erreur d'indication sur un nombre approprié d'observations répétées.

5.26. **JUSTESSE (D'UN INSTRUMENT DE MESURE),**

aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique.

5.27. **FIDELITE (D'UN INSTRUMENT DE MESURE),**

Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure.

NOTES :

1 Ces conditions comprennent :

- réduction au minimum des variations dues à l'observateur,
- même mode opératoire de mesure,
- même observateur,
- même équipement de mesure, utilisé dans les mêmes conditions,
- même lieu,
- répétition durant une courte période de temps.

2 La répétabilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des indications.

6- ETALONS

6.1. ETALON,

mesure matérialisée, appareil de mesure, matériau de référence ou système de mesure destiné à définir, réaliser, conserver ou reproduire une unité ou une ou plusieurs valeurs d'une grandeur pour servir de référence.

EXEMPLES :

- a) Etalon de masse de 1 kg ;
- b) Résistance étalon de 100 Ω ;
- c) Ampèremètre étalon ;
- d) Etalon de fréquence à césium.

6.3. ETALON NATIONAL,

étalon reconnu par une décision nationale, dans un pays, pour servir de base à l'attribution de valeurs aux autres étalons de la grandeur concernée.

6.4. ETALON PRIMAIRE,

étalon qui est désigné ou largement reconnu comme présentant les plus hautes qualités métrologiques et dont la valeur est établie sans se référer à d'autres étalons de la même grandeur.

6.6. ETALON DE REFERENCE,

étalon, en général de la plus haute qualité métrologique disponible en un lieu donné ou dans une organisation donnée, dont dérivent les mesurages qui y sont faits.

6.7. ETALON DE TRAVAIL,

étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des mesures matérialisées, des appareils de mesure ou des matériaux de référence.

NOTES :

- 1 Un étalon de travail est habituellement étalonné par rapport à un étalon de référence.
- 2 Un étalon de travail utilisé couramment pour s'assurer que les mesures sont effectuées correctement est appelé **étalon de contrôle**.

6.8. ETALON DE TRANSFERT,

STAGE METROLOGIE

étalon utilisé comme intermédiaire pour comparer entre eux des étalons.

NOTE : Le terme **dispositif de transfert** doit être utilisé lorsque l'intermédiaire n'est pas un étalon.

6.10. TRACABILITE,

propriété du résultat d'un mesurage ou d'un étalon tel qu'il puisse être relié à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux, par l'intermédiaire d'une chaîne ininterrompue de comparaison ayant toutes des incertitudes déterminées.

NOTES :

- 1 Ce concept est souvent exprimé par l'adjectif traçable.
- 2 La chaîne ininterrompue de comparaisons est appelée chaîne de raccordement aux étalons ou chaîne d'étalonnage.
- 3 La manière dont s'effectue la liaison aux étalons est appelée raccordement aux étalons.

6.11. ETALONNAGE,

ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de la grandeur indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure, ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée ou par un matériau de référence, et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisées par des étalons.

NOTES :

- 1 Le résultat d'un étalonnage permet soit d'attribuer aux indications les valeurs correspondantes du mesurande, soit de déterminer les corrections à appliquer aux indications.
- 2 Un étalonnage peut aussi servir à déterminer d'autres propriétés métrologiques telles que les effets de grandeurs d'influence.
- 3 Le résultat d'un étalonnage peut être consigné dans un document parfois appelé **certificat d'étalonnage** ou **rapport d'étalonnage**.

TRAINING MATERIAL ON METROLOGY AND CALIBRATION

STAGE METROLOGIE

1. Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie
2. **Métrologie et statistiques** (*en anglais seulement*)
[PowerPoint \(Bureau of Meteorology, Australia\)](#)
3. Guide théorique à l'estimation des incertitudes de mesure
4. Métrologie des températures
5. Mesure de l'humidité de l'air
6. Instruments de mesure de la pression
7. Infrastructure et instruments d'un laboratoire d'étalonnage : exemple du Laboratoire de Métrologie de Météo-France

Measurement Theory

- ◆ Intro to measurement
- ◆ Discussion of standards & traceability
- ◆ Prac example
- ◆ Uncertainty
- ◆ Examples of measurement
- ◆ Exercises
- ◆ Cautions

Measurement

The process of
determining
the value of
some quantity in
terms of a
standard unit.

Standards

- ◆ There is a hierarchy of standards – that is agreed units
- ◆ Some of these are artifacts ie the kg
- ◆ Some are “realised” eg temperature
- ◆ At the top of the hierarchy are Primary standards
- ◆ RIC currently hold Primary standards for P, T and Radiation

True Temperature Scale

Agreed international scale of temperature – ITS-90

Comprised of points on the scale that are realized – that is made up temporarily using physical systems

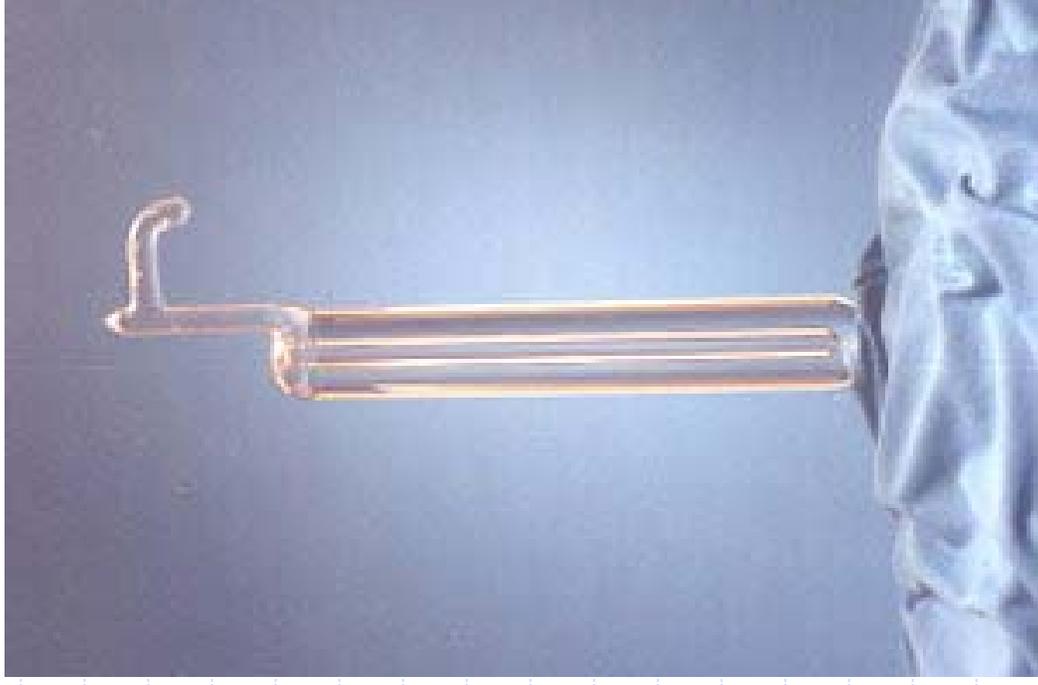
Interpolation between the points is via Pt resistance thermometers

Pt resistance thermometers are approximately linear between points on the true temperature scale

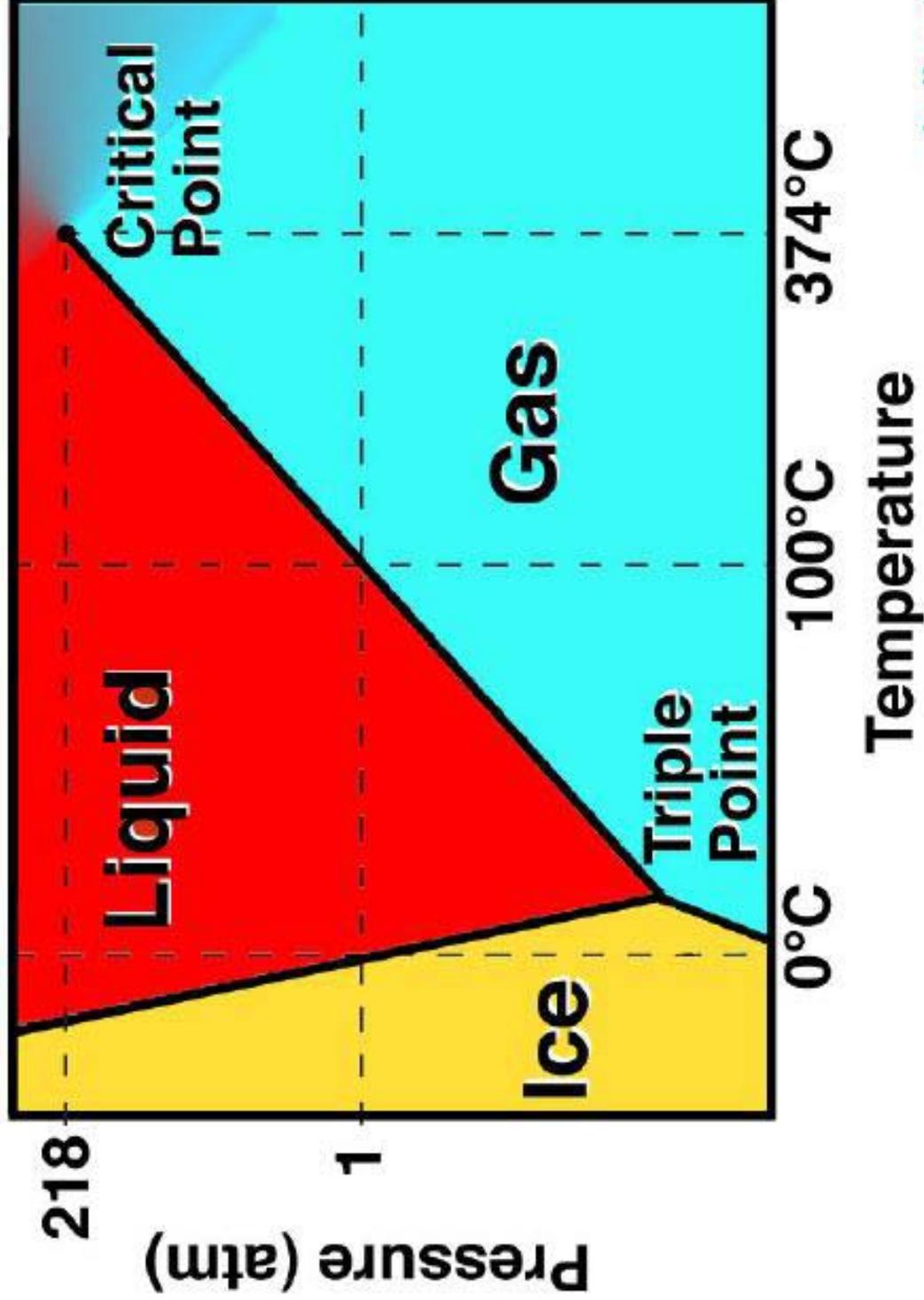
Substance	Temperature K	Temperature °C	State
Mercury, Hg	234.3156	-38.8344	Triple Point
Water, H ₂ O	273.16	0.01	Triple Point
Gallium, Ga	302.9146	29.7646	Melting Point
Indium, In	429.7485	156.5985	Freezing Point
Tin, Sn	505.078	231.928	Freezing Point
Zinc, Zn	629.677	419.527	Freezing Point
Aluminium, Al	933.473	660.323	Freezing Point
Silver, Ag	1234.93	961.78	Freezing

Water Triple Point Cell

- Ultra pure water is sealed under vacuum into a glass vessel
- The apparent air gap above the liquid is entirely composed of water vapour whose pressure is determined by the temperature
- It forms a sealed system at equilibrium

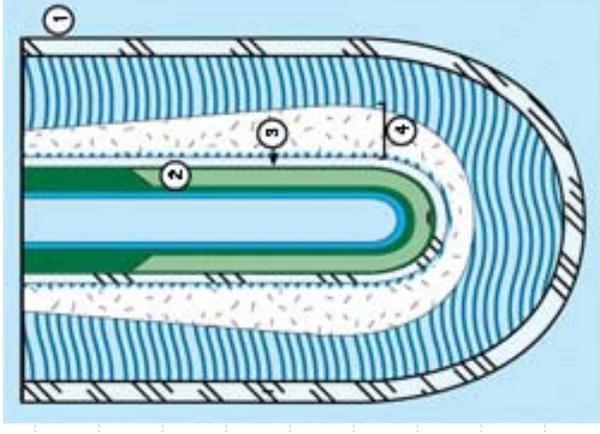


Phase Diagram - Water



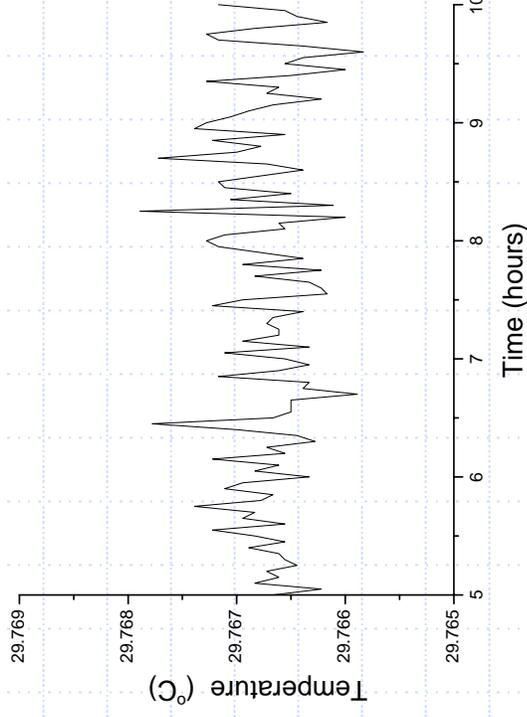
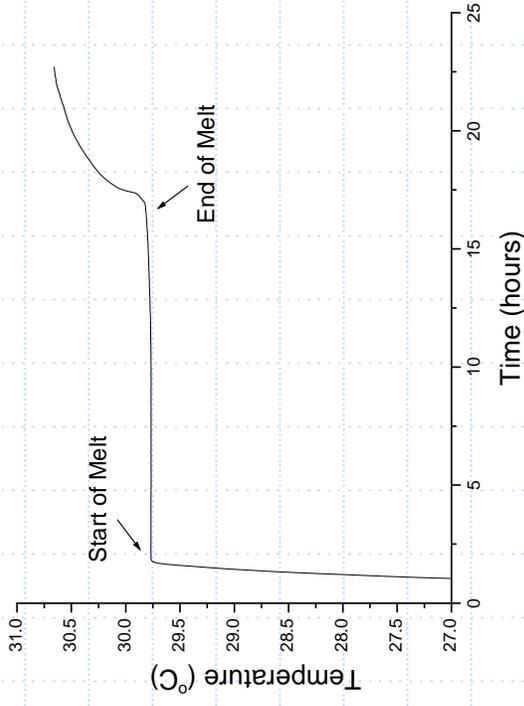
Contd.

- WTP defined to be at 0.01°C
- The ice must be as a moveable mush ie. It must freely rotate in the cell
- The WTP maintenance bath can keep the cell at this temperature for days
- **The kelvin, unit of thermodynamic temperature, is the fraction $1/273.16$ of the thermodynamic temperature of the triple point of water.**



Gallium Melting Point

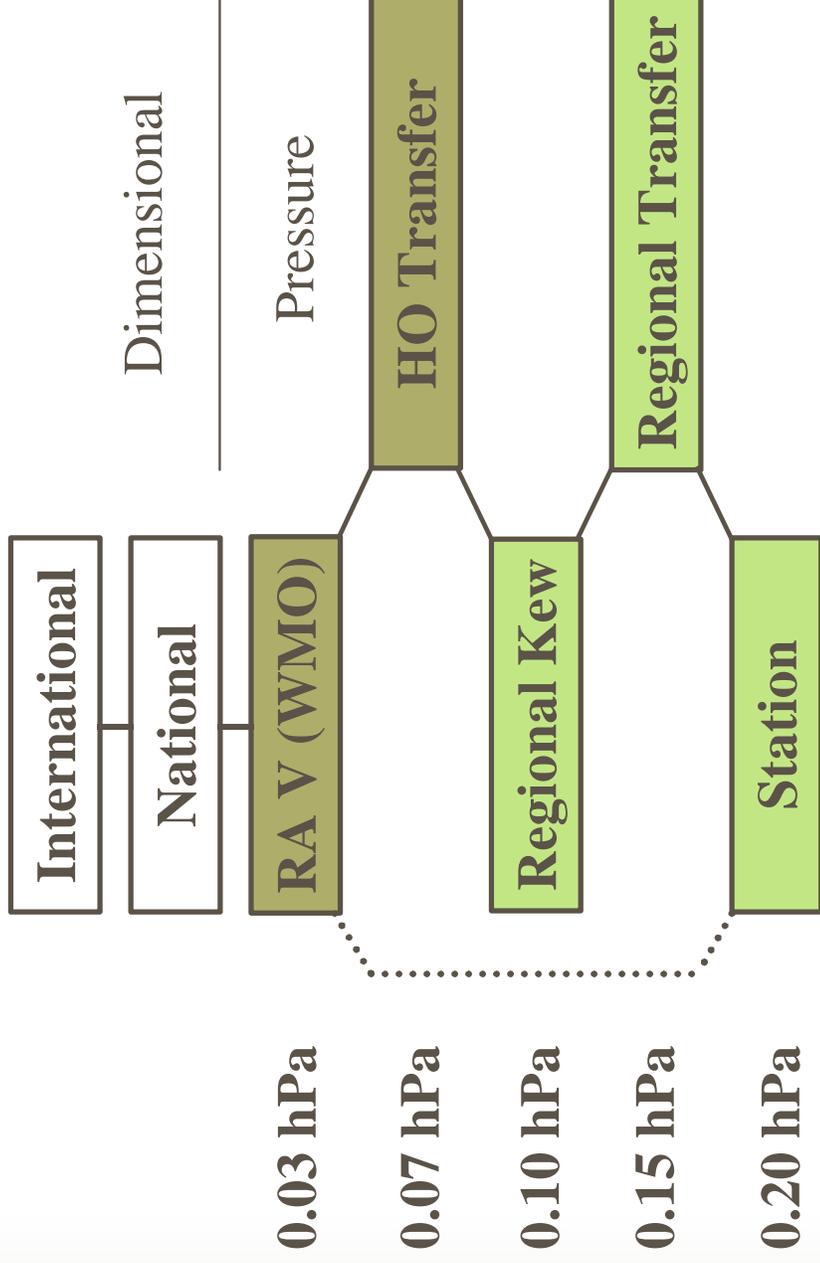
- Defined to be at 29.7646 degrees C
- As can be seen in the graph it is a plateau
- Energy is going into breaking bonds – hence no temperature rise until all of the Ga has melted
- Can be drawn out for about 30 hours



Traceability

- ◆ Traceability is the unbroken chain of calibration/verification from a primary standard to the device in question
- ◆ This chain may have one link or several depending on the device
- ◆ At each stage of must be fully documented

Pressure Traceability



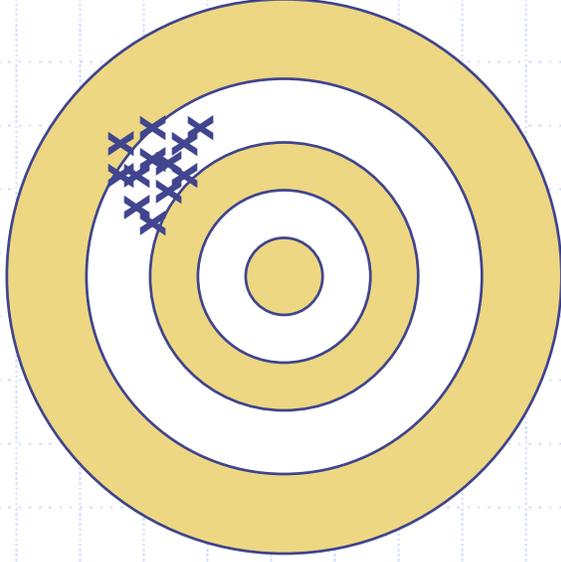
Uncertainty

- The degree of doubt about a measurement!
- Parameter, associated with the result of a measurement, that characterises the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand.

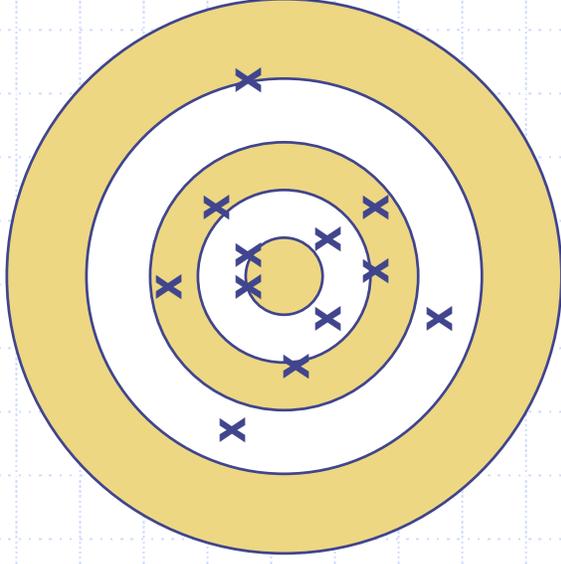
(International Vocabulary of Basic and General Terms of Metrology)

Uncertainty

**Low Accuracy
High Precision**



**Medium Accuracy
Low Precision**



Accuracy

The closeness of the experimental mean value to the true value.

High **accuracy** = Small **systematic** error.

Precision

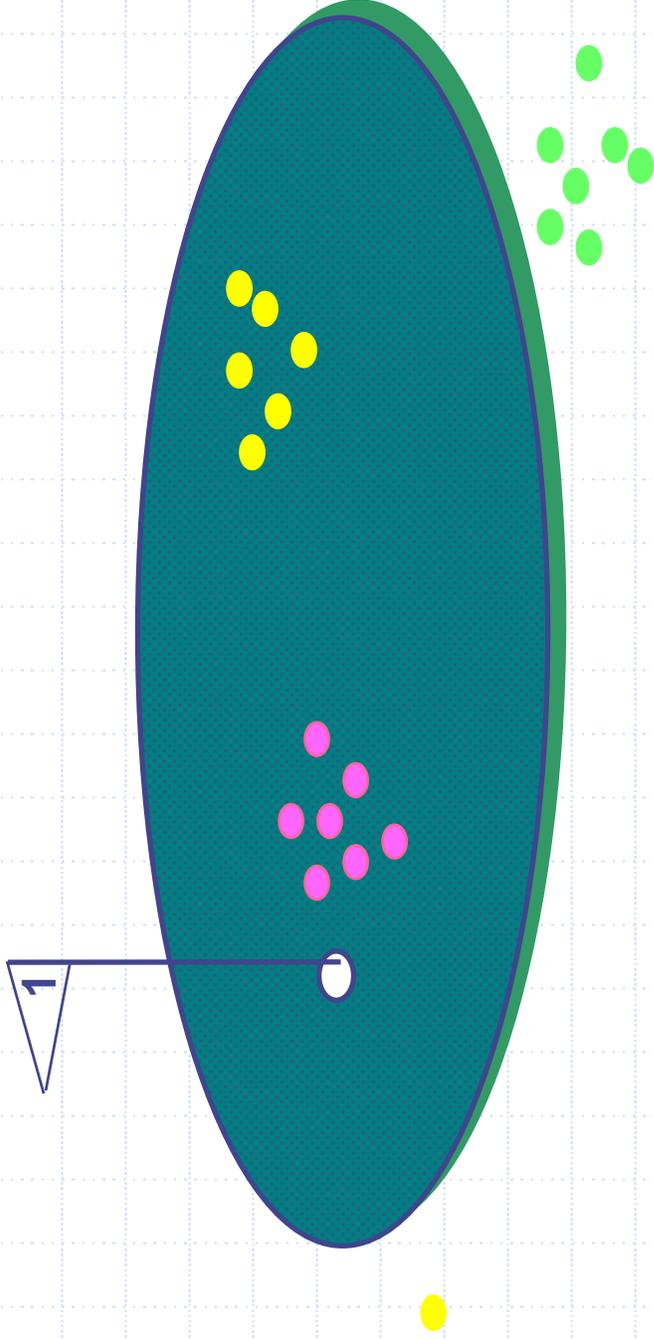
The degree of scatter in the results.

High **precision** = Small **random** error.

Golfer One

High Repeatability / Low Reproducibility

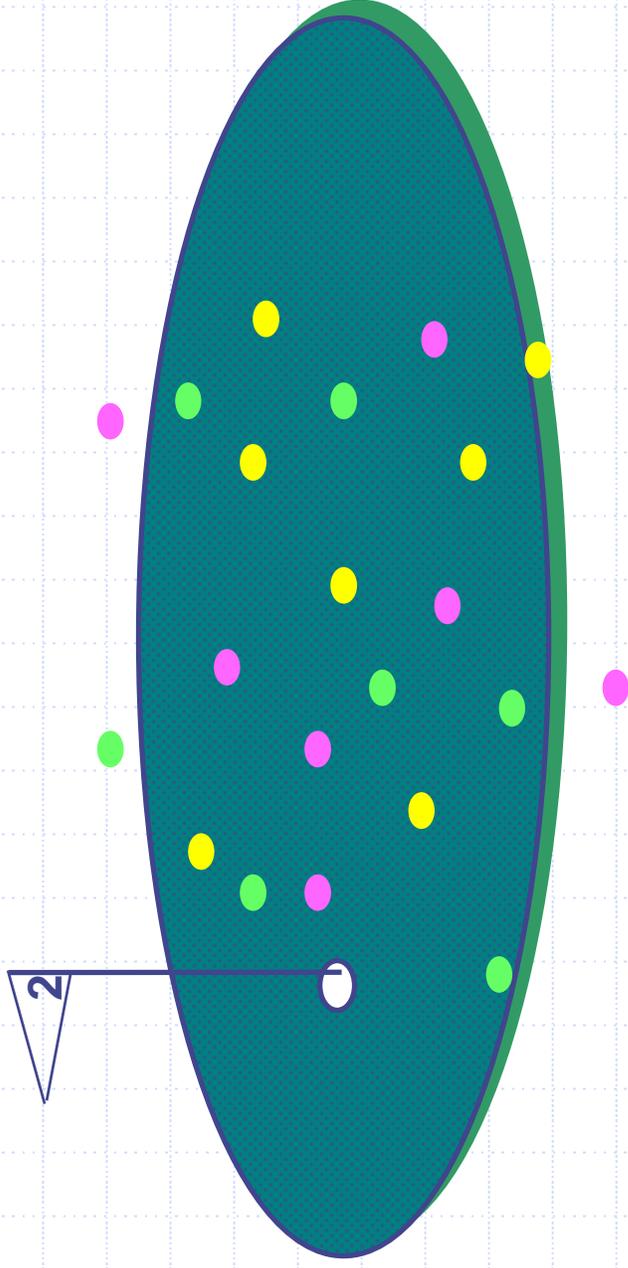
Drift in an instrument



Golfer Two

Low Repeatability / Low Reproducibility

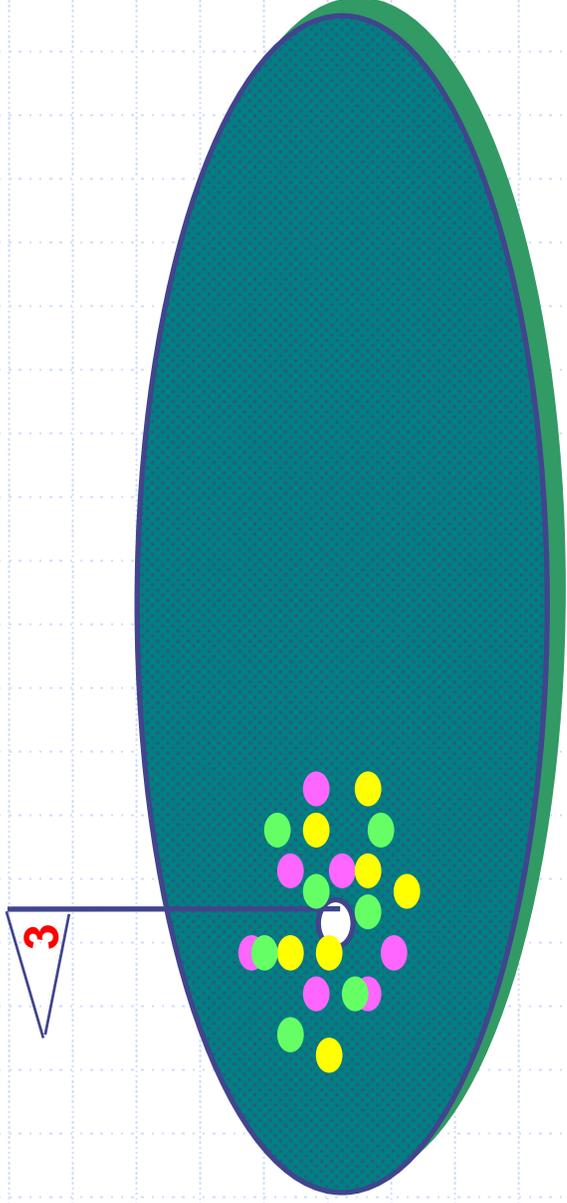
Low Precision



Golfer Three

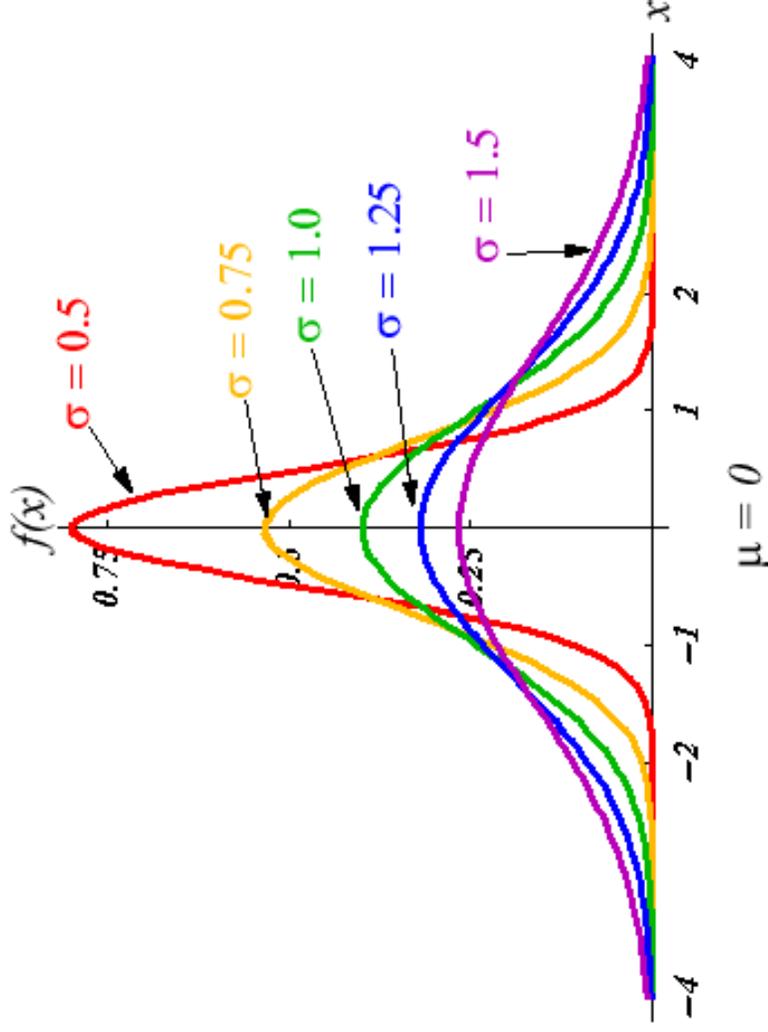
High Repeatability / High Reproducibility

Low Uncertainty

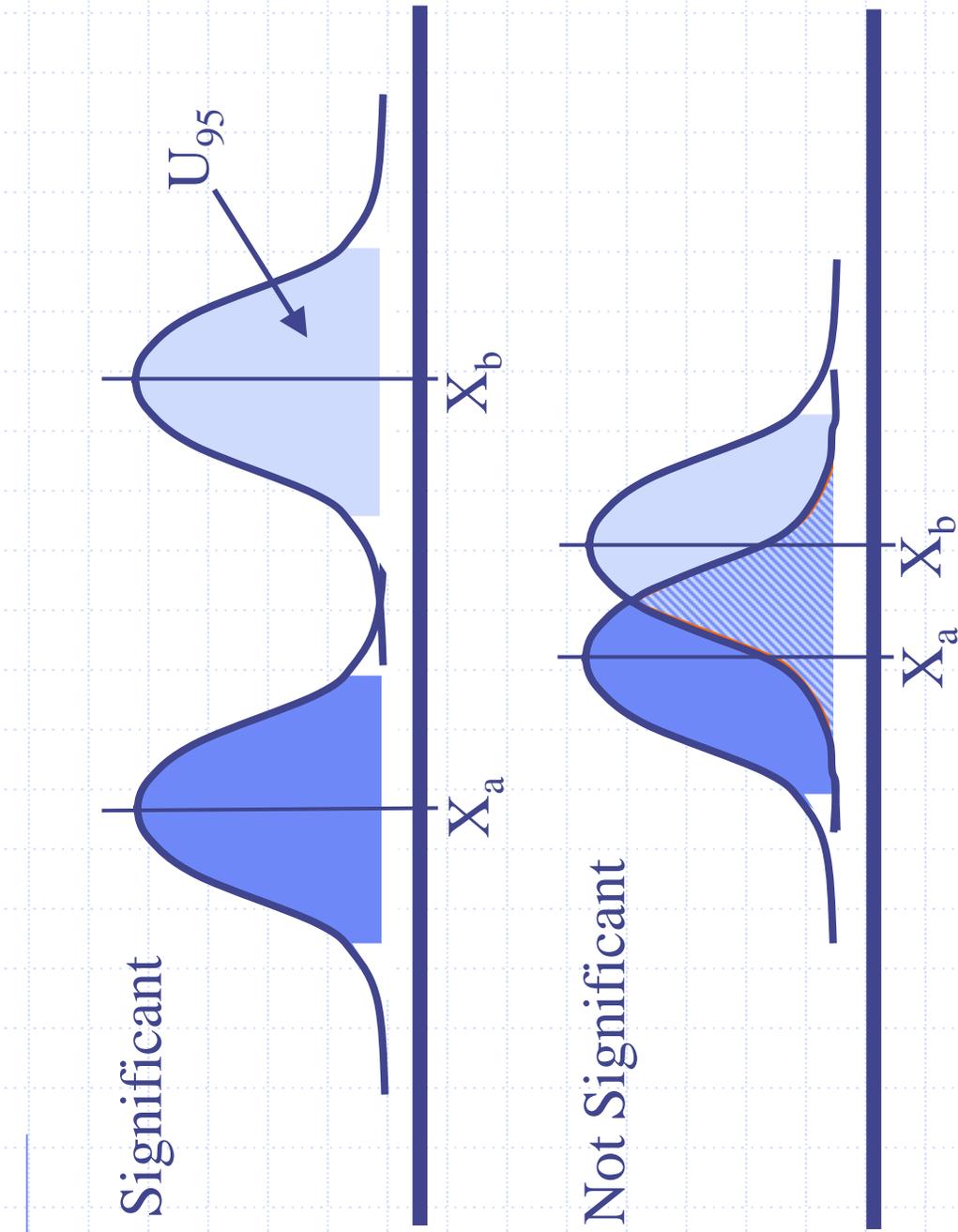


What's Normal?

- ◆ The outcome of most natural processes is normally distributed
- ◆ This results from the central limit theorem

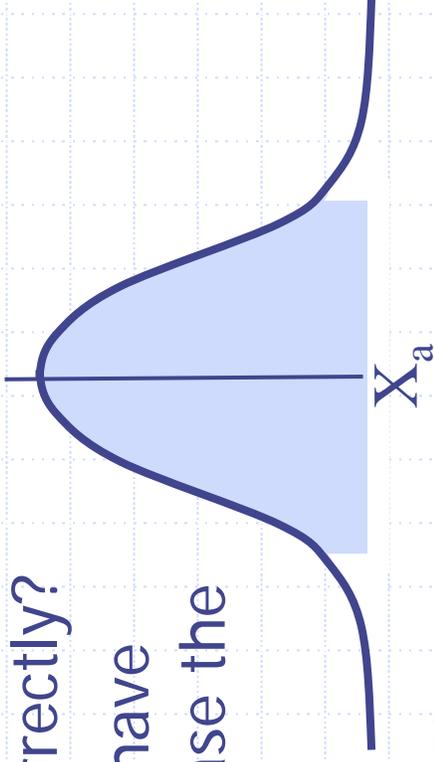


Significance of Differences



Confidence

- ◆ How many samples do you have to take to be “confident” you have estimated the mean value correctly?
- ◆ The mean we determine will have an expected value – in this case the mean of the population and a variance
- ◆ How well we estimate the mean depends on how many samples we take.



Temperature Prac

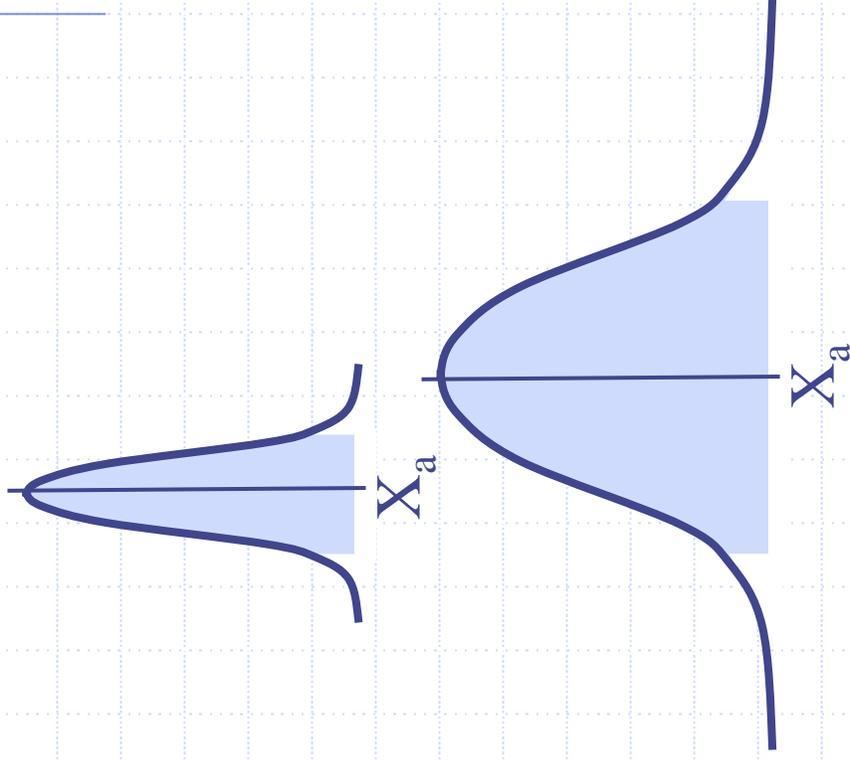
- ◆ Use the two IR thermometers to take the victims temp.
- ◆ Take 7 measurements with each device
- ◆ Form an average
- ◆ Max and Min

Making a measurement

- ◆ Any single measurement is a “selection” from a distribution of possible values
- ◆ More measurements give you greater “confidence” in estimating population parameters
- ◆ Can’t make an infinite amount of measurements because the system being tested may not be stable

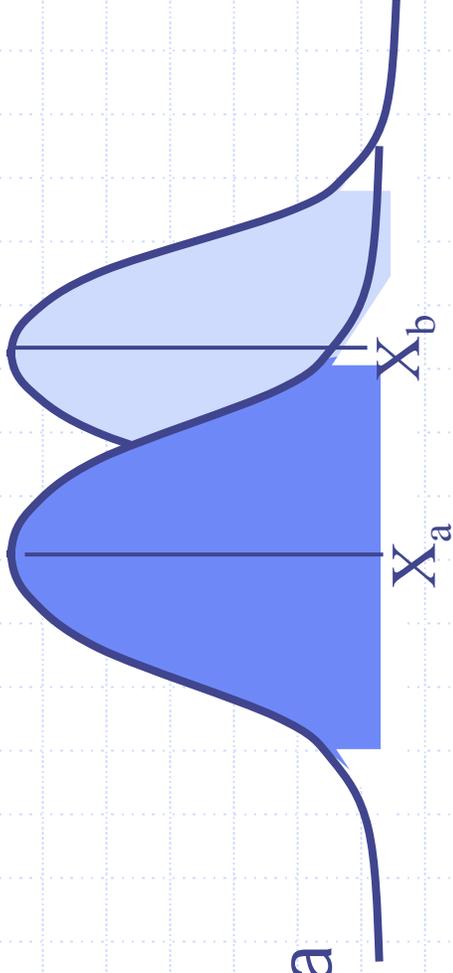
Test Uncertainty Ratio (TUR)

- ◆ It is intuitive that in order to measure something you need to measure it with something more accurate
- ◆ This is the TUR – the ratio of the uncertainty in your reference to the uncertainty of the device under test
- ◆ Usually a TUR value of 4 or better is used



Contd.

- ◆ You can work with TURs less than 4
- ◆ The barometers are calibrated with a TUR of approximately 1!
- ◆ You need to take a lot of samples!

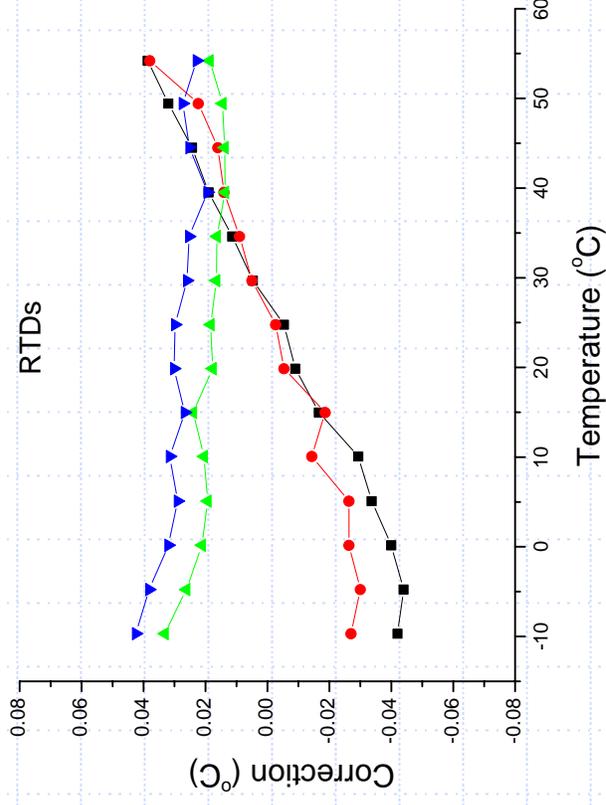


Instrument Properties

- ◆ Linearity – Accuracy of response over measurement range
- ◆ Stability – short and long term (drift)
- ◆ Response time – how fast it responds
- ◆ Precision
- ◆ Hysteresis

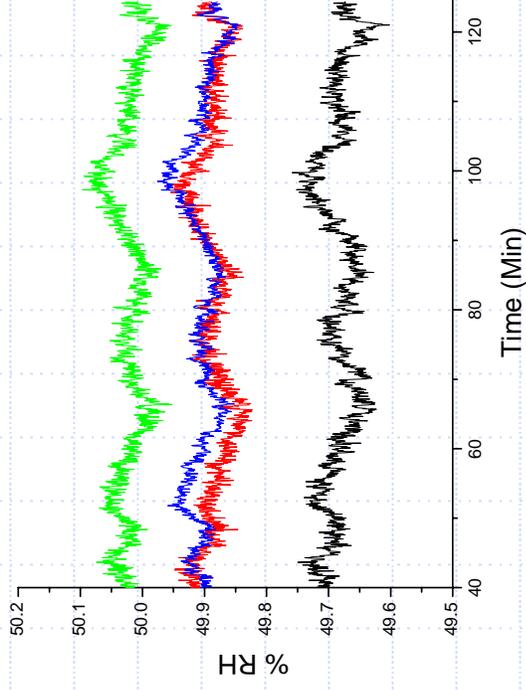
Linearity

- ◆ Opposite are plots of True versus probe temperature for AWS Temp probes
- ◆ Note they are all approximately linear in response
- ◆ They each have a slightly different line

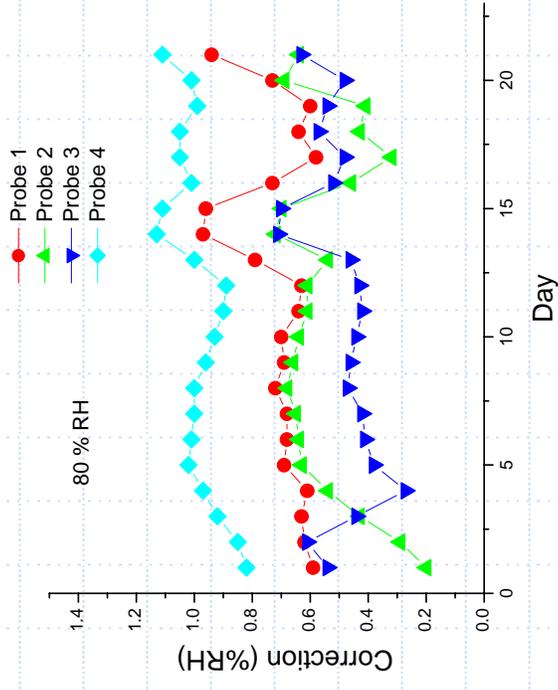


Stability

◆ Humidity probe
short term drift
(2 hrs)

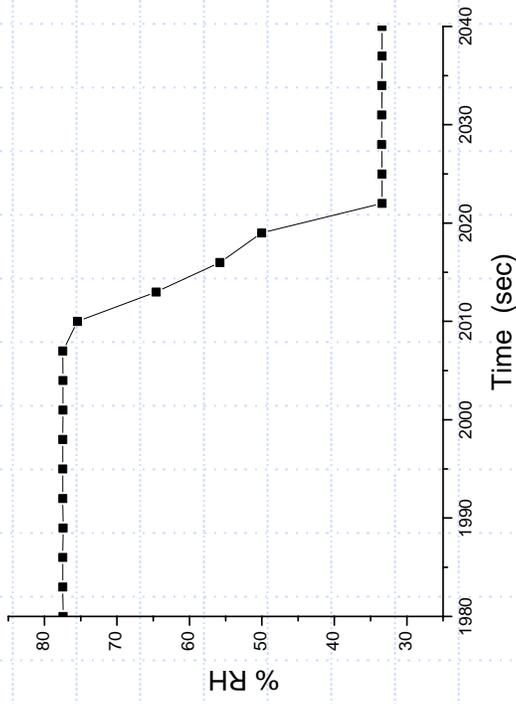
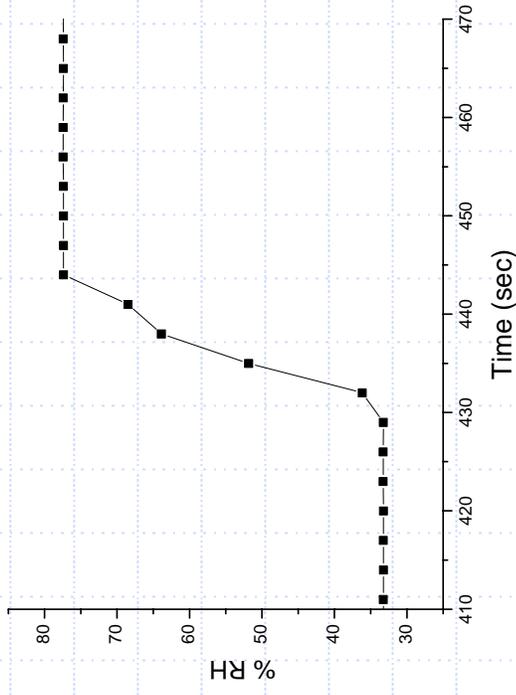


◆ Humidity Probe
medium term
drift (20 days)



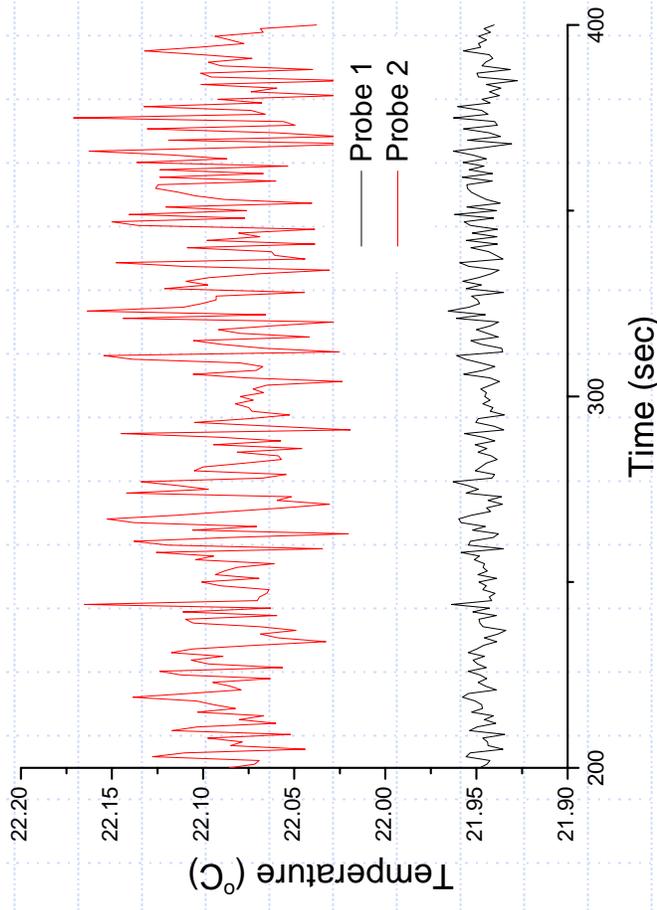
Response Time

- ◆ Opposite are plots of RH versus time for a humidity probe.
- ◆ RH was changed "instantaneously"
- ◆ "Response time" is defined as the time taken for the instrument to read 63% of the step change



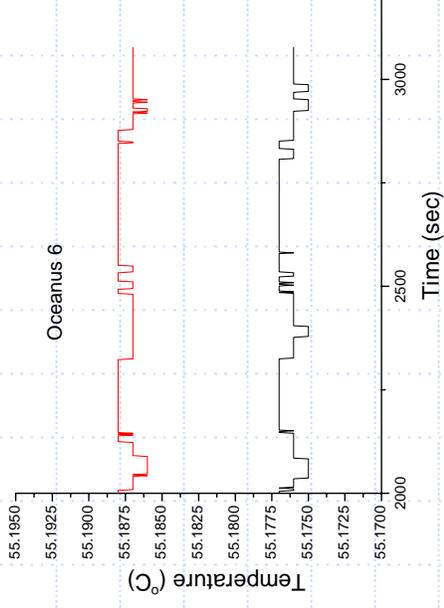
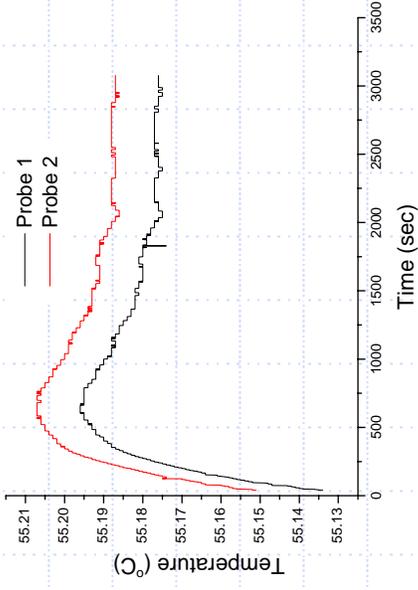
Precision

- ◆ Opposite are the plots Temp versus time for two probes
- ◆ The two probes have differing systematic errors (y axis shift)
- ◆ The two probes have different precisions (y axis spread)



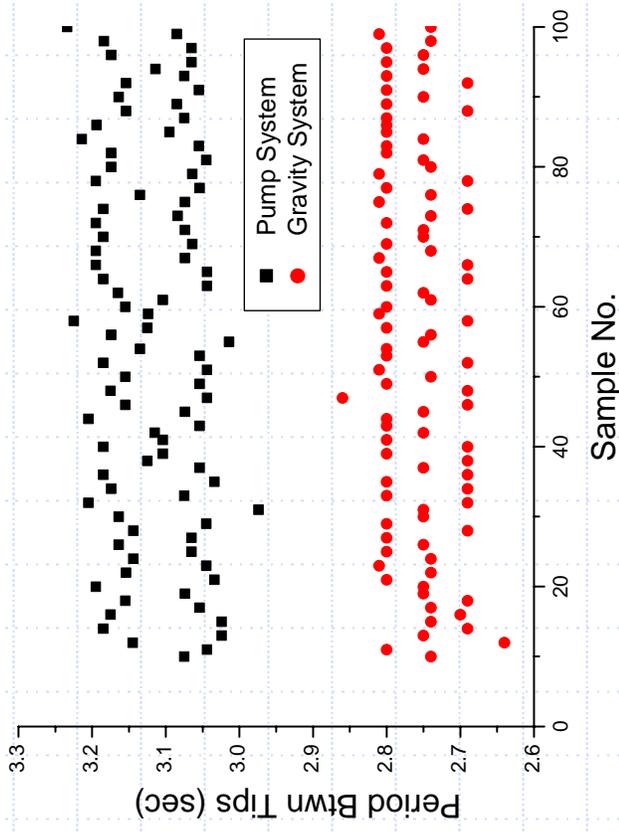
Contd.

- ◆ The probes exhibit a systematic error
 - offset or bias
- ◆ Both probes have approximately the same precision

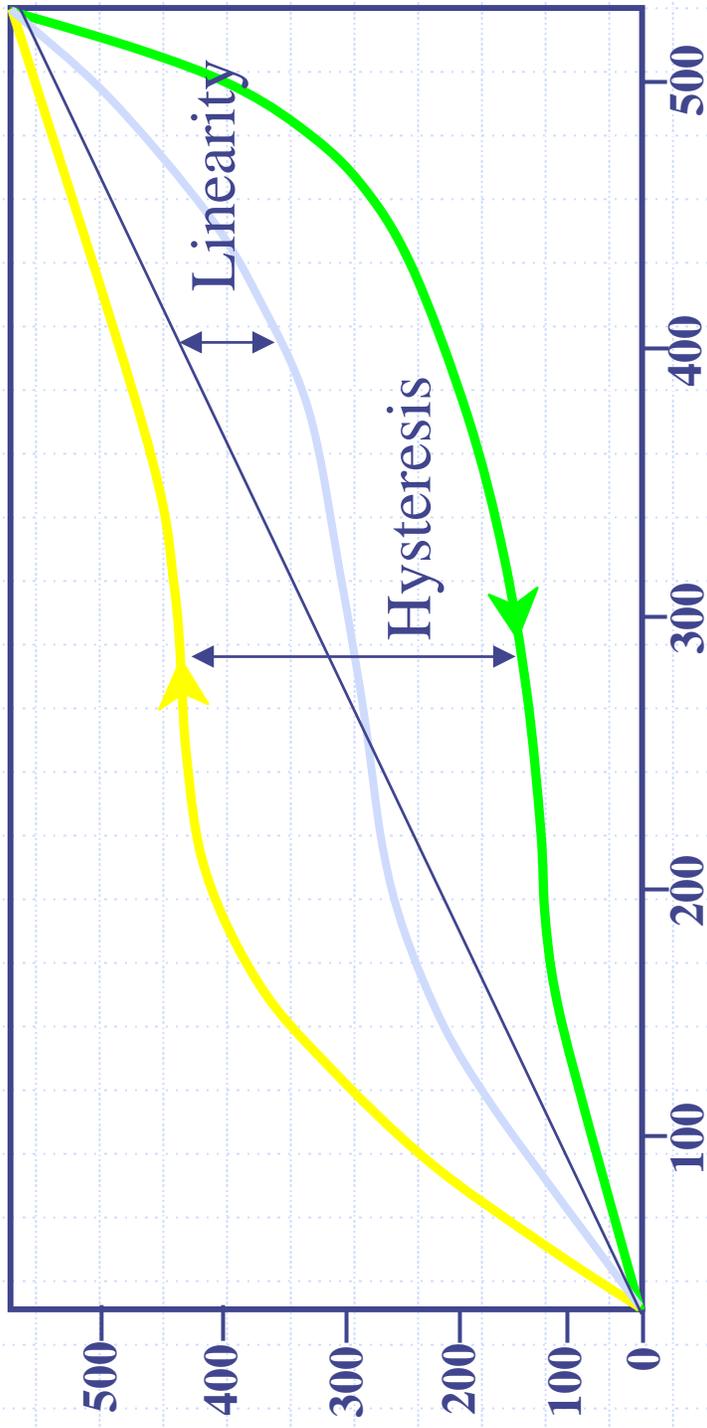


Quantization

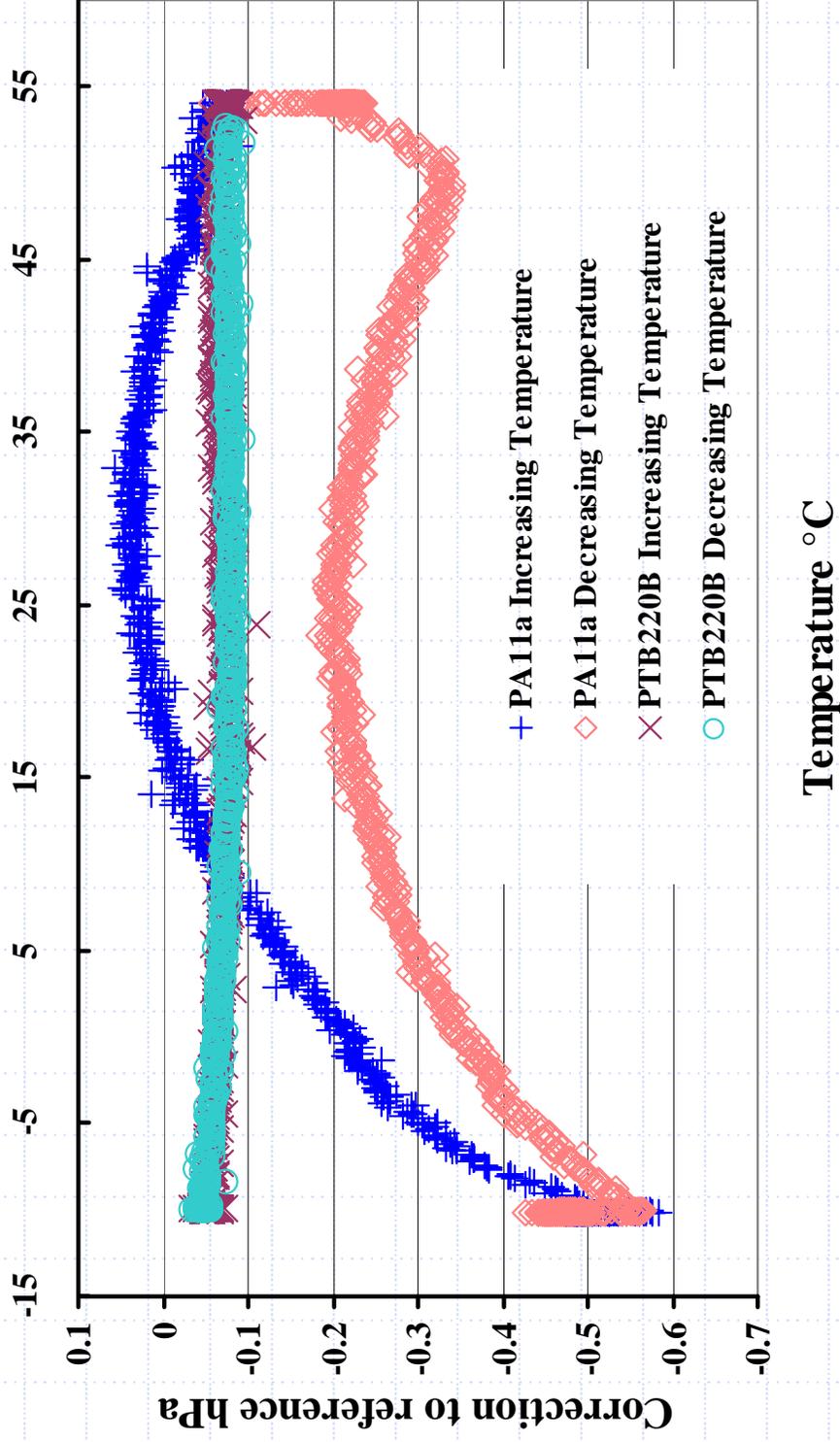
- Quantized measurements take discrete levels
- Important to know how they were quantized
- Were they rounded or truncated?
- No necessarily less accurate than analogue data



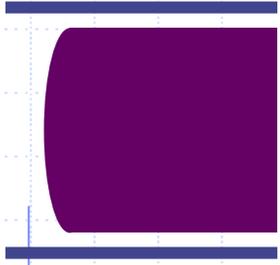
Hysteresis & Linearity



PA11a & PTB220B Hysteresis

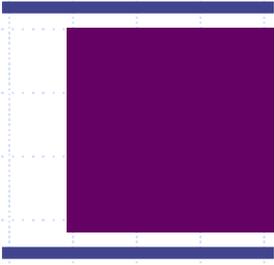


Mercury Barometers



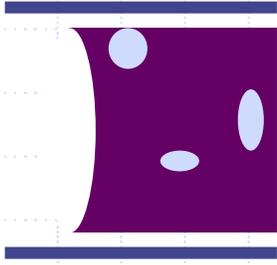
Good

Clean Mercury
Rising Pressure



Bad

Possibly Dirty Mercury
Falling Pressure



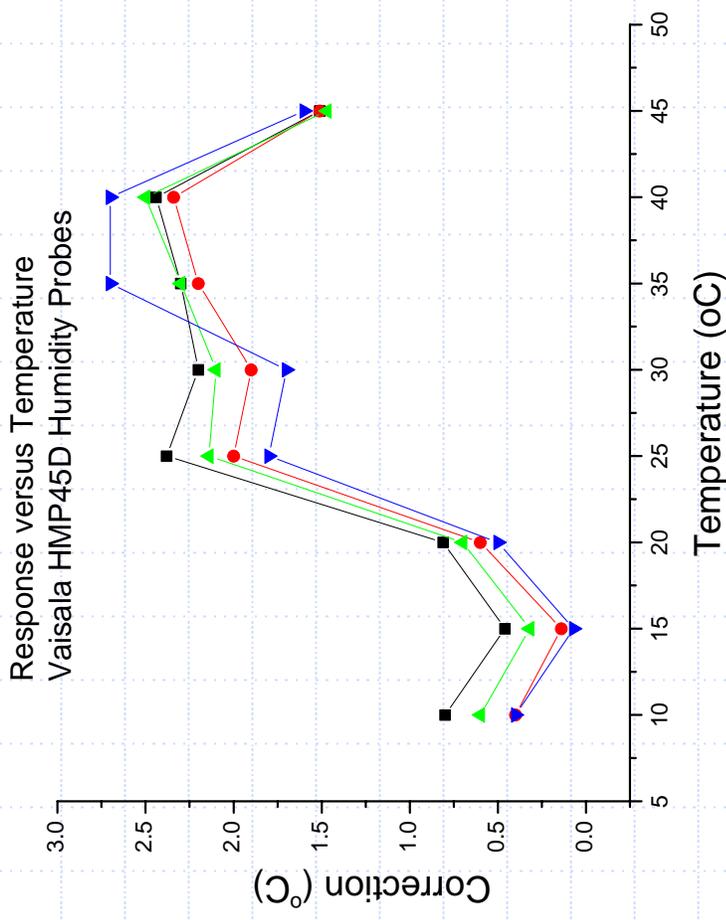
Very Bad

Dirty Mercury
Falling Pressure

Response Versus Temperature

◆ Opposite is a plot of the corrections required for HMP45D probes versus Temp

◆ Note – response is quite consistent – but not linear



Repeatability

Variability on an occasion

With-in run precision.

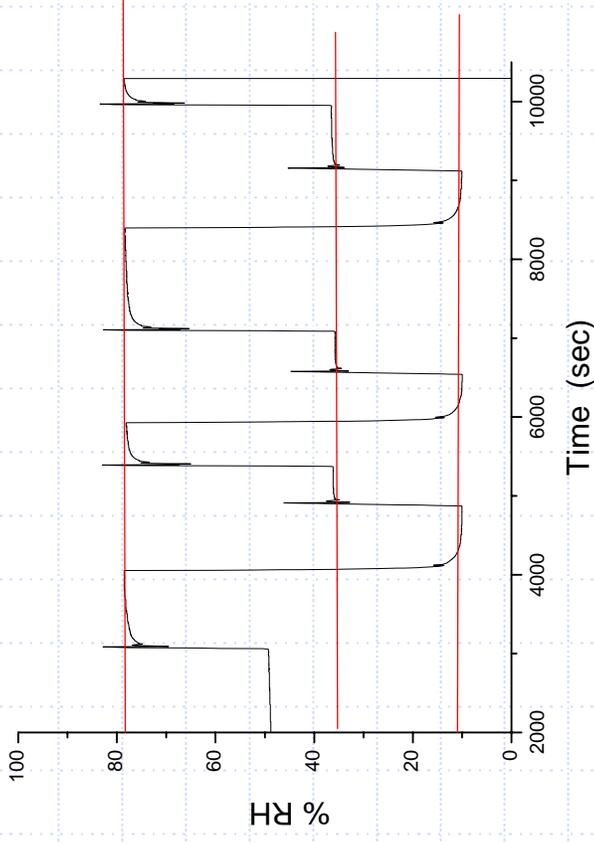
Reproducibility

Variability on different occasions

Between-run precision

Contd.

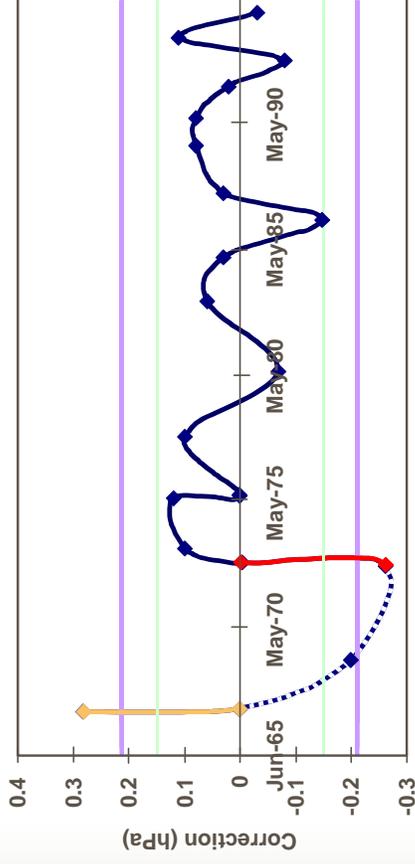
- ◆ Opposite is a plot of the RH reached by the humidity generator versus time
- ◆ System was cycled between 3 RH levels
- ◆ Repeatability is the closeness of the match in RH achieved



Reproducibility

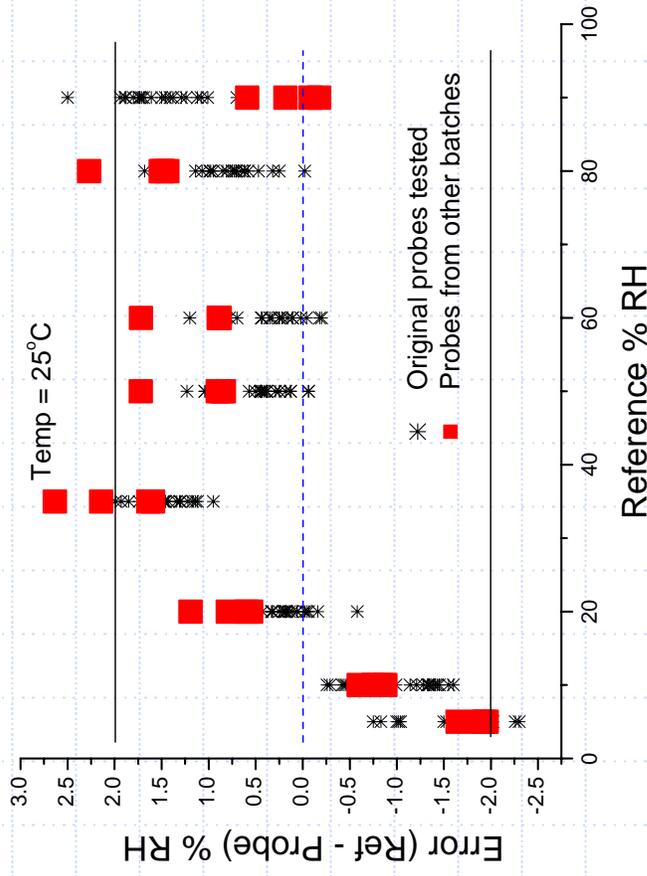
- ◆ Reproducibility is the “between trial” variability
- ◆ Opposite is a plot of the long term error for a barometer

Calibration Errors



Populations

- Opposite is a plot of the offset errors for a batch of humidity probes.
- The error for any particular probe for any measurement will be approximately normally distributed
- The offset or bias of the all probes is also expected to be normally distributed!



Resolution

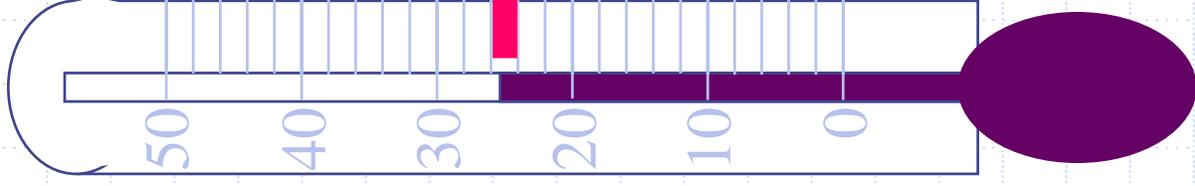
- ◆ Resolution is the smallest increment in value the instrument can return
- ◆ Resolution will affect the precision of the instrument
- ◆ Resolution will not ordinarily affect the accuracy of an instrument



Resolution \neq Uncertainty

The uncertainty of this thermometer is $\pm 2^\circ\text{C}$.

Half of the least significant digit on an analogue instrument



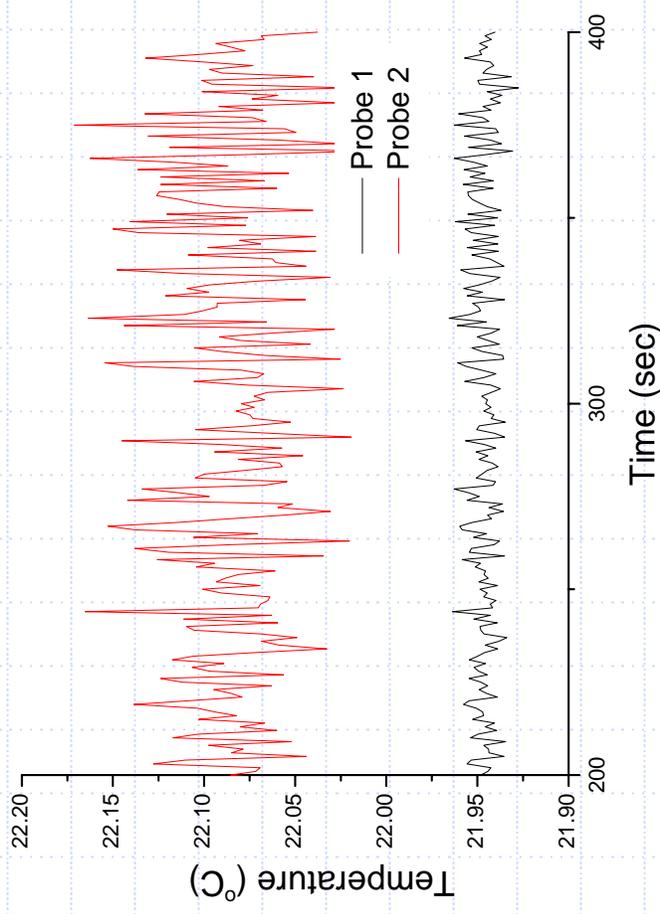
If the scale has 10 $^\circ\text{C}$ divisions
The resolution is 5 $^\circ\text{C}$

If the scale has 2 $^\circ\text{C}$ divisions
The resolution is 1 $^\circ\text{C}$

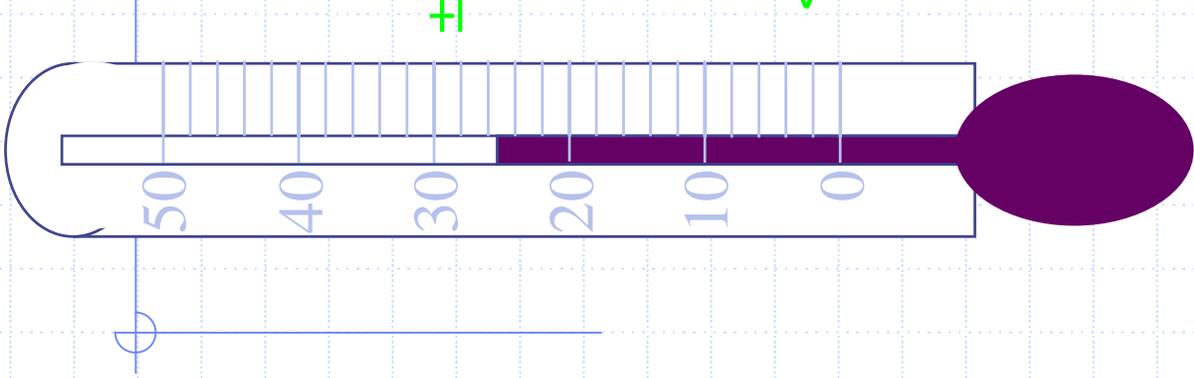
The least significant digit on a digital instrument.

Contd

- ◆ Both probes have the same resolution
- ◆ Red probes has approx four times the uncertainty



Confidence



$\pm 30^\circ\text{C}$

$\pm 10^\circ\text{C}$

$\pm 5^\circ\text{C}$

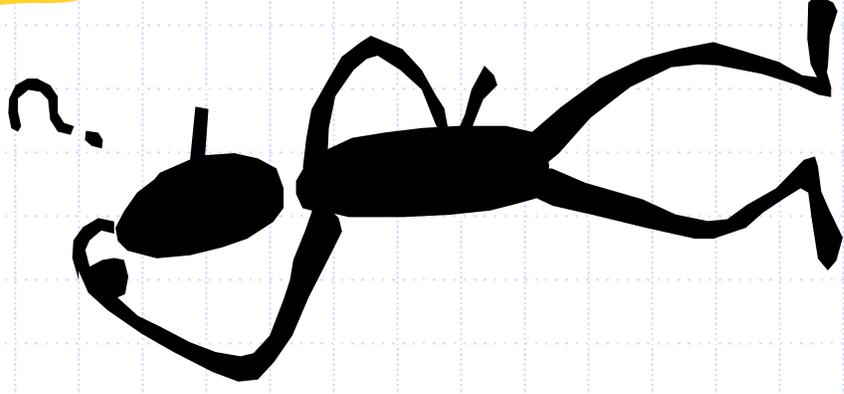
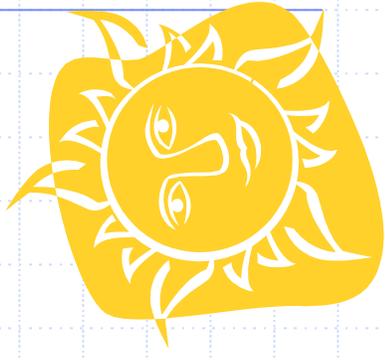
$\pm 0.5^\circ\text{C}$

100%

95%

65%

<1%



Errors Vs Blunders

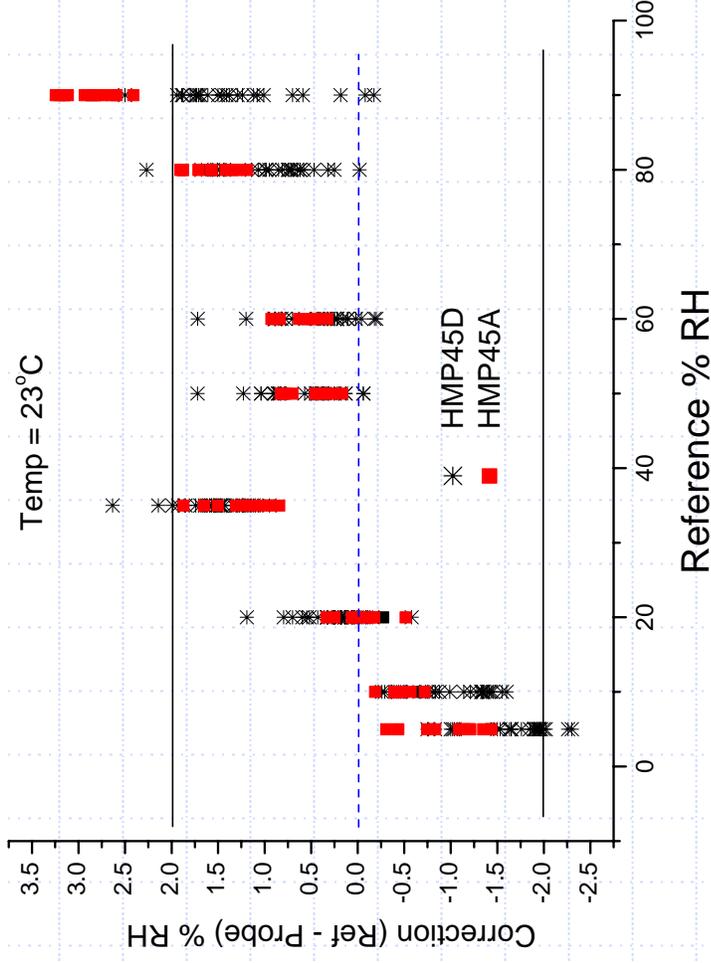
- ◆ By definition most measurements will not be exactly “right” they will be in error to some degree
- ◆ A blunder is when a human is in the loop and produces a mistake
- ◆ I.e. Misreads a thermometer as 35.25°C instead of 25.25°C

Calibration

- ◆ Comparing the reading of an instrument when it is exposed to a known artifact or condition
- ◆ Either the instrument is adjusted to read “correctly” or
- ◆ A table of corrections is produced so that the operator can “correct” the instrument reading to the true reading
- ◆ May need to interpolate

Verification

- ◆ Most of the work of the RIC involves verifying that an instrument/probe etc is in specification
- ◆ This is not a calibration since corrections etc are not supplied
- ◆ Hence equipment sent to the field is within spec but may lie anywhere within the specification - two humidity probes could differ in readings by 4% RH and both could still be in spec

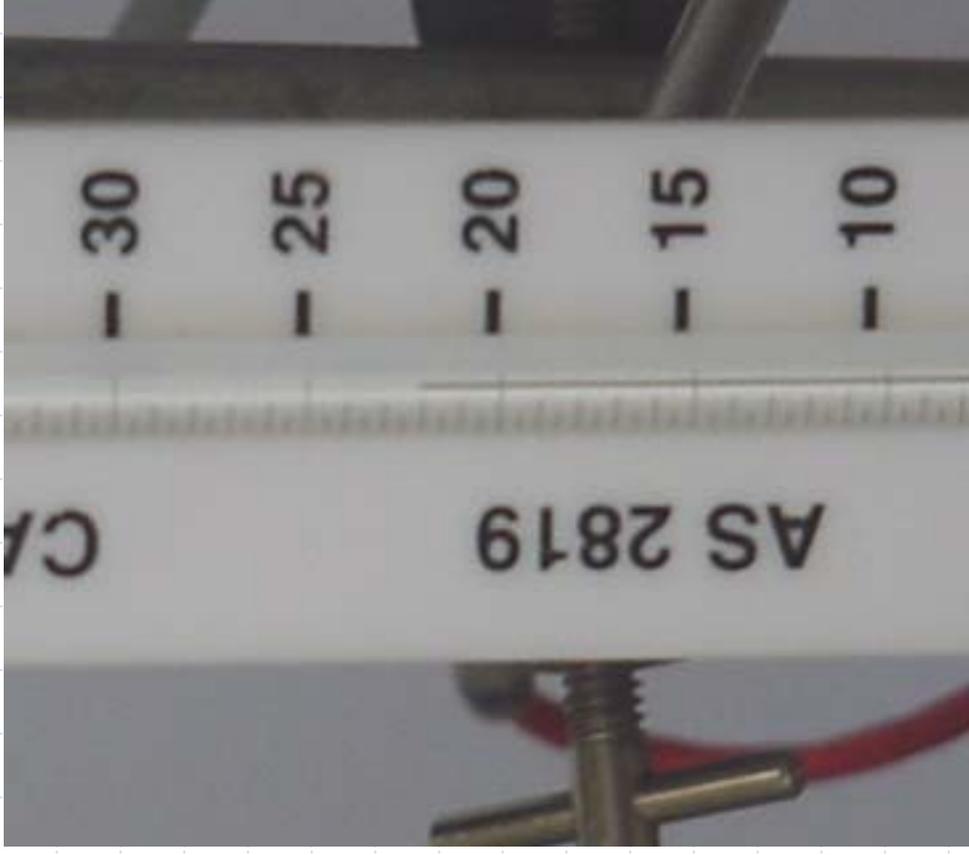


Field Tolerances

Sensor	Comparison Method	Uncertainty	Field Tolerance
Pressure	Standard	0.3hPa	0.5hPa
Temperature	Within Screen Psychrometer	0.3°C 0.4°C	0.5°C 0.6°C
Relative Humidity	Within Screen Psychrometer	4%	5% 6%
Wind Speed	?	10%	N/A
Wind Direction	Compass	5%	10%
Rainfall	With Syphon Without Syphon	3% (<250mm/h) 4% (250 – 350mm/h) 8%	8%

Exercise 1

- ◆ Currently the inspection handbook “checks” an AWS RTD with an Inspection grade Mercury in glass thermometer
- ◆ RTD accurate to 0.2°C – MIG accurate to?
- ◆ Single measurement after 1 hour of stabilisation
- ◆ What is are the flaws in this procedure?
- ◆ Come up with some alternatives alternatives

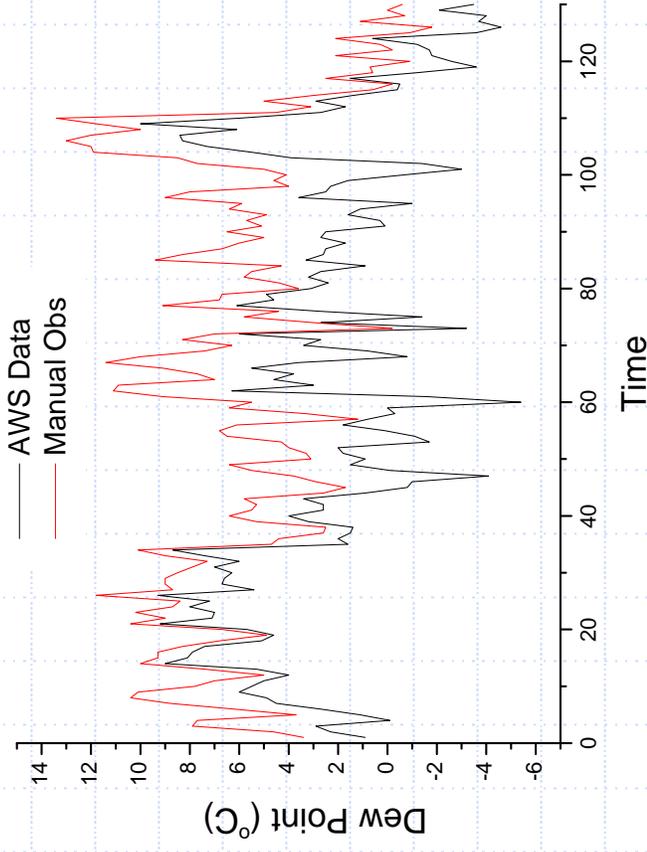


Exercise 2

- ◆ Currently the inspectors check an AWS humidity probe with an wet/dry bulb thermometers
- ◆ One wet/dry measurement after 1 hour of stabilisation
- ◆ What is are the flaws in this procedure
- ◆ Suggest alternatives

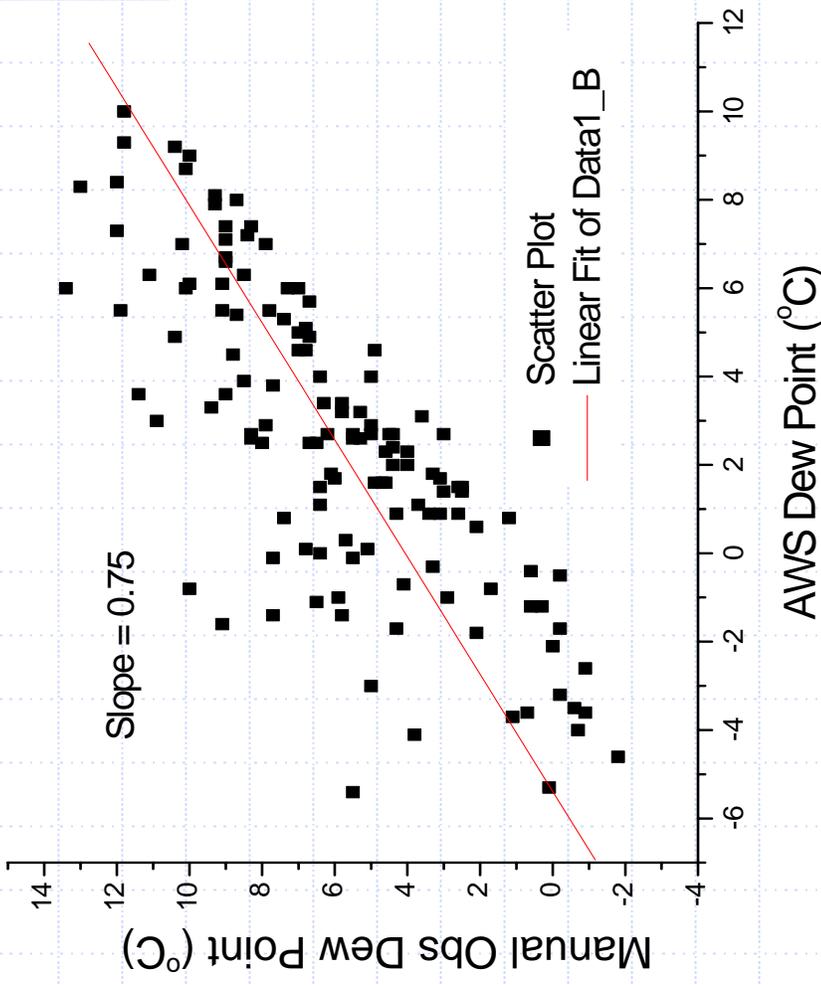
Exercise 3

- ◆ NCC alerted RIC to anomalous readings from manual sites (red) and AWS humidity probes (black)
- ◆ The manual obs (wet/dry bulb) appear to over-estimate the dew point



Contd.

- ◆ Plotted opposite is the DP from manual obs (x-axis) versus the AWS derived DP (y-axis)
- ◆ In a perfect world the data would lie along the line $y = x$
- ◆ Postulate a model as to what has gone wrong
- ◆ Assume humidity probe was checked and found to be in-spec within previous 6 months.



Hypotheses

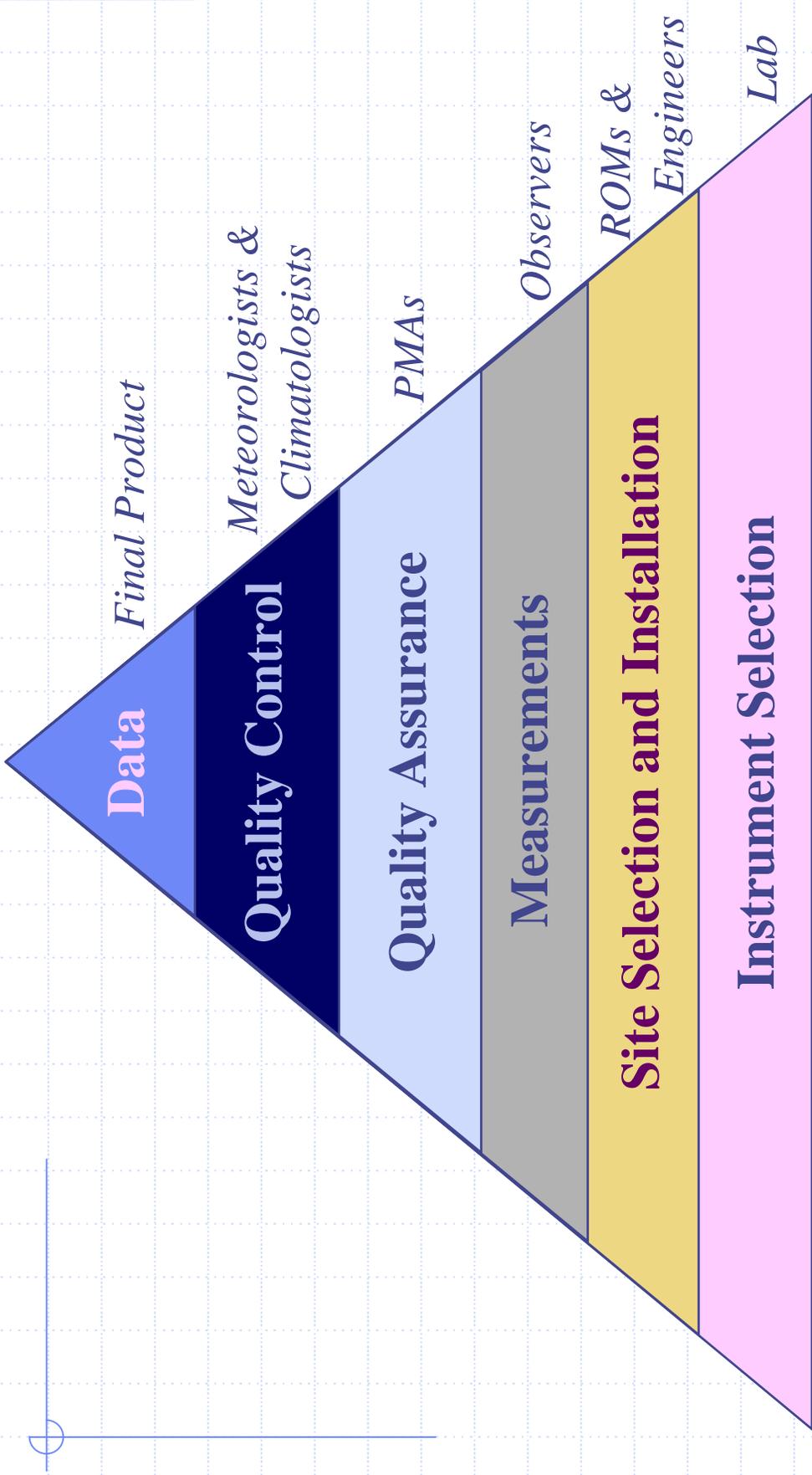
- ◆ 1 – The humidity probe is stuff!
- ◆ 2 – The manual observers were drunk!
- ◆ 3 – Both 1 & 2
- ◆ 4 – Both sets of data are correct!
- ◆ Come up with some others –
- ◆ *Also assume all measurements made were correct!*



Best Guess

- ◆ It is troubling that the line of best fit does not have a slope of 1 and this suggests there may be a problem with the algorithms used to calculate DP.
- ◆ Having said that, it is most likely that both sets of data are essentially “correct”.
- ◆ RH probes (currently in use) measure RH
- ◆ Wet/dry bulb measurements really measure evaporation rate – not really the same thing
- ◆ Wet/dry measurements over-estimate humidity by up to 20% in still air conditions.
- ◆ A useful comparison would be RH from each technique after selecting data obtained when the wind speed was greater than 2 m/s

Data Quality

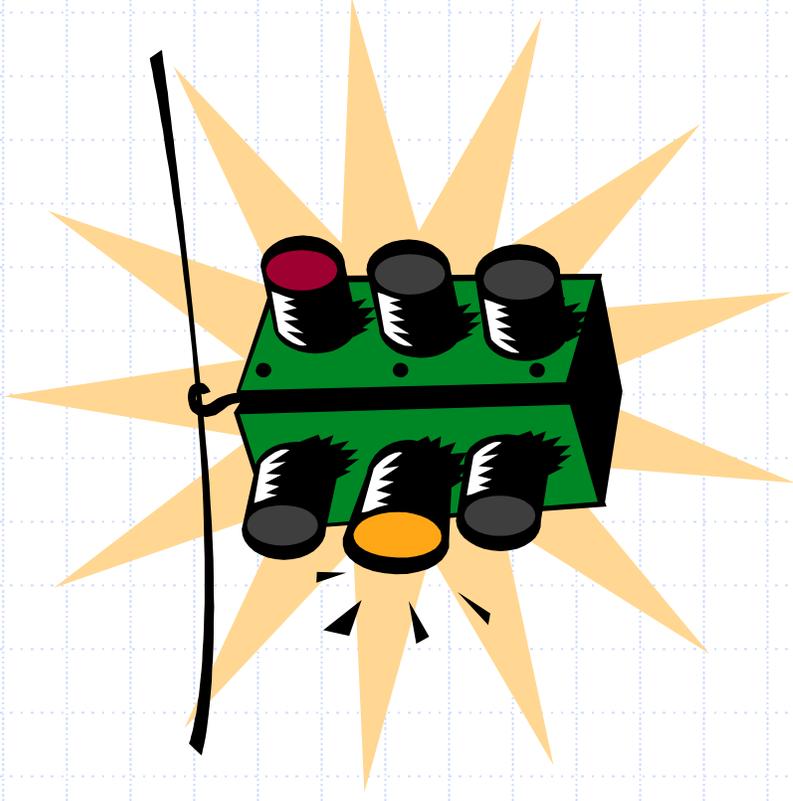


How to improve the Data Quality

- ◆ Training
- ◆ Double check
- ◆ Use Calibrated instruments
- ◆ Minimize the number of variables
- ◆ Use standard test procedures
- ◆ “If it is not broken don’t fix it”
- ◆ Document, document, document

Field Adjustment

- ◆ Don't
- ◆ Just DON'T!
- ◆ An adjustment in the field will remove all traceability
- ◆ If it is out of spec – remove and return



Questions?



TRAINING MATERIAL ON METROLOGY AND CALIBRATION

STAGE METROLOGIE

1. Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie
2. Métrologie et statistiques (*en anglais seulement*)
- 3. Guide théorique à l'estimation des incertitudes de mesure**
4. Métrologie des températures
5. Mesure de l'humidité de l'air
6. Instruments de mesure de la pression
7. Infrastructure et instruments d'un laboratoire d'étalonnage : exemple du Laboratoire de Métrologie de Météo-France

Guide théorique à l'estimation des incertitudes de mesure



1. Concept d'incertitude	2
1.1. Définition	2
1.2. Erreur.....	2
2. Démarche d'estimation des incertitudes	3
2.1. Calculer le résultat de mesure	3
2.2. Déterminer les incertitudes-types.....	4
2.2.1. Méthode de détermination des incertitudes	4
2.2.2. Quelques rappels statistiques	4
2.2.3. Précisions autour des méthodes d'évaluation de type A et B	4
2.3. Déterminer l'incertitude composée	5
2.4. Déterminer l'incertitude élargie	6
2.5. Comparer un résultat de mesure avec une spécification	6
3. Synthèse.....	7

1. Concept d'incertitude

1.1. Définition

L'objectif d'un mesurage consiste à déterminer la valeur du mesurande c'est à dire la valeur de la grandeur particulière à mesurer. Le résultat d'un mesurage n'est qu'une estimation de la valeur du mesurande ([1]). Pour pouvoir estimer la fiabilité d'un résultat, il faut donner une indication quantitative sur la qualité de celui-ci : expression de l'incertitude.

Sans incertitude, les résultats de mesure ne peuvent être comparés ni entre eux ni par rapport à des exigences réglementaires.

Incertain ([2]): paramètre associé au résultat d'un mesurage qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourrait raisonnablement être attribuée au mesurande.

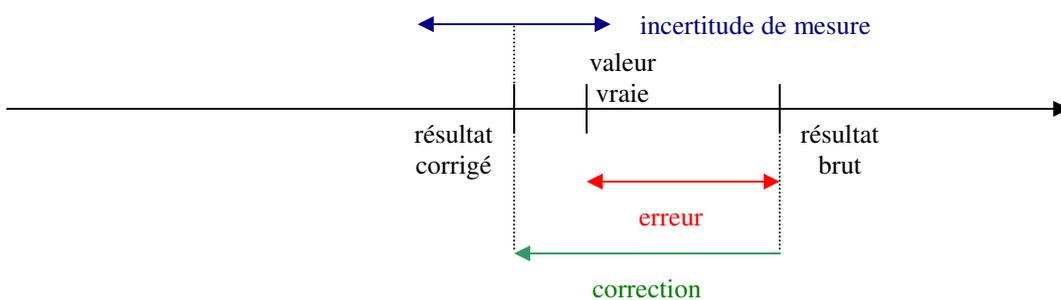


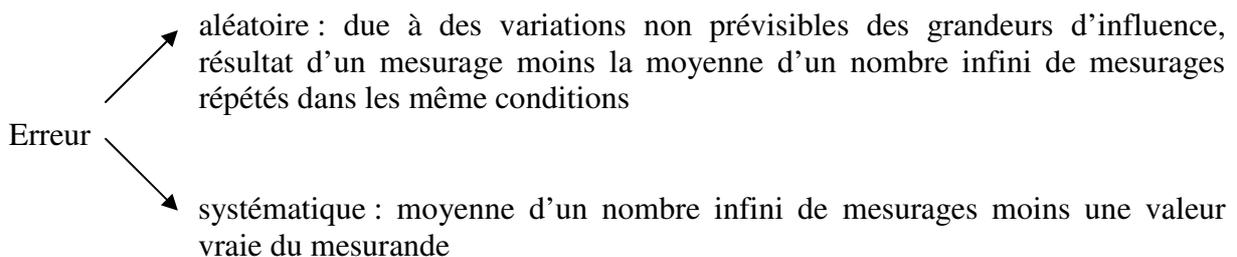
Fig.1 : Concept d'incertitude

Le résultat de mesure s'exprime par le résultat corrigé associé à son incertitude.

1.2. Erreur

Bien souvent, l'opération de mesurage comporte des erreurs, qui ne peuvent être connues exactement puisque la valeur vraie est par définition inconnue.

Erreur ([2]) : résultat d'un mesurage moins la valeur vraie du mesurande



$$\text{résultat} = \text{valeur vraie} + \text{erreur systématique} + \text{erreur aléatoire}$$

Pour diminuer l'erreur aléatoire, il faut augmenter le nombre d'observations et prendre leur moyenne. Pour s'affranchir au mieux de l'erreur systématique, il faut appliquer les corrections.

2. Démarche d'estimation des incertitudes

L'estimation des incertitudes liées à un résultat passe par 4 étapes :

- calculer le résultat de mesure en définissant le mesurande, en analysant le processus de mesure et en montant le modèle mathématique du processus ;
- calculer les incertitudes-types ;
- déterminer l'incertitude composée ;
- enfin, calculer l'incertitude élargie.

2.1. Calculer le résultat de mesure

Mesurande ([2]) : *grandeur particulière soumise à mesurage*

La définition du mesurande doit être la plus précise possible.

Exemple : température dans un abri placé à 1 m au-dessus du sol

L'analyse du processus de mesure conduit à s'intéresser à la façon dont on obtient le résultat : opérateurs, instruments, étalons, méthode de mesure, mode opératoire, environnement, objet mesuré... Cette analyse permet d'identifier les facteurs qui influencent le résultat, soit les causes d'erreur, et d'en dresser une liste exhaustive. Les effets néfastes seront alors maîtrisés en appliquant les corrections et/ou en répétant les mesures.

L'analyse du processus peut se faire selon le schéma dit des 5 M :

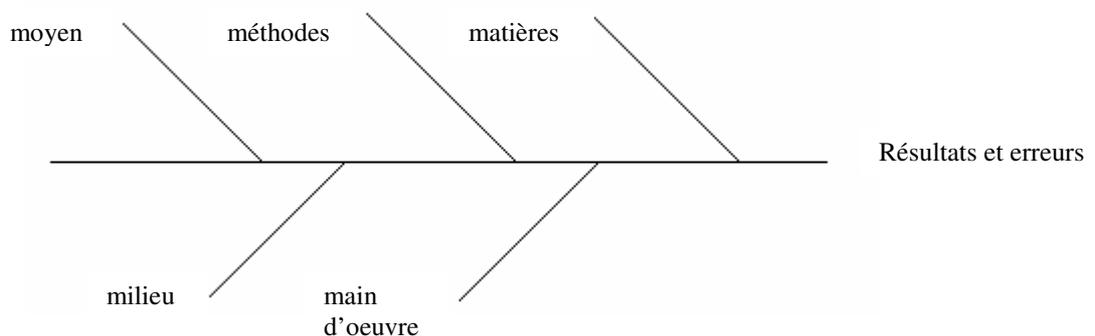
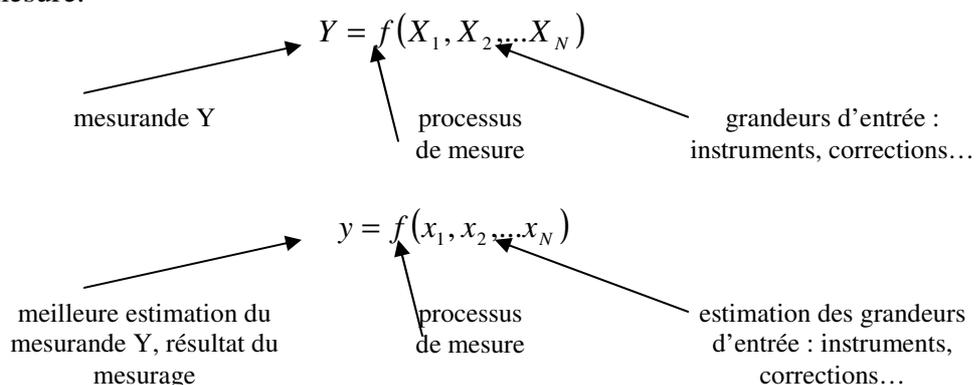


Fig.2 : Schéma des 5 M

L'établissement du modèle mathématique s'appuie sur le mode opératoire, c'est la transcription mathématique de la façon dont les informations ont été utilisées pour calculer le résultat de mesure.



2.2. Déterminer les incertitudes-types

2.2.1. Méthode de détermination des incertitudes

Les doutes sur les grandeurs d'entrée composent l'incertitude sur le résultat final. Pour évaluer une composante d'incertitude, il existe 2 méthodes, fondées sur des lois de probabilité :

- dite de type A, par l'analyse statistique de séries d'observations ;
- dite de type B, par des moyens autres que l'analyse statistique de séries.

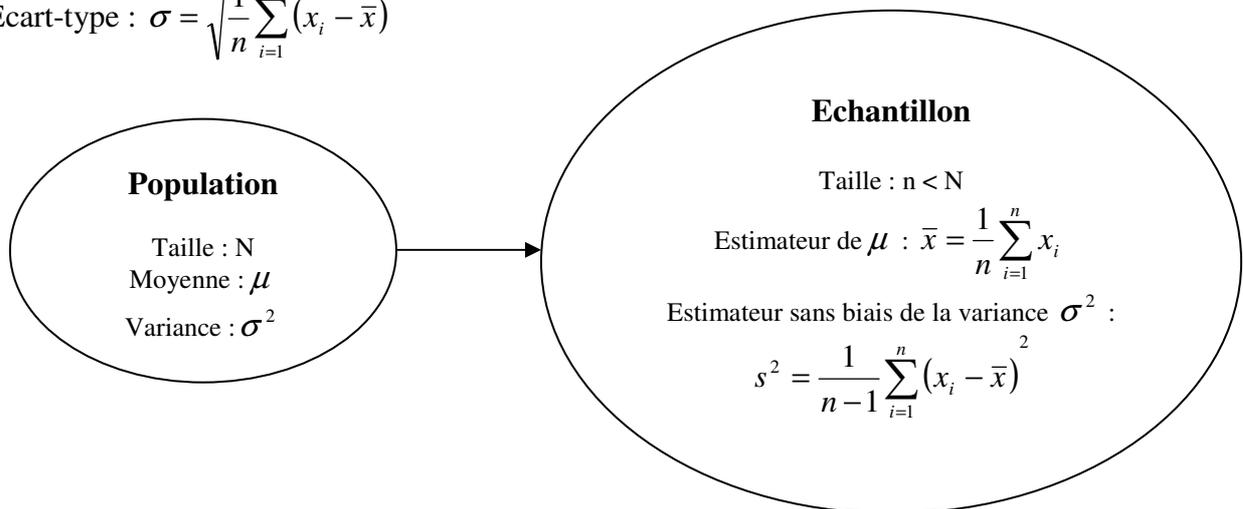
Une composante est dans les 2 cas quantifiée par une variance ou un écart-type, appelée aussi incertitude-type.

2.2.2. Quelques rappels statistiques

$$\text{Moyenne : } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{Variance : } \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$\text{Ecart-type : } \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$



2.2.3. Précisions autour des méthodes d'évaluation de type A et B

L'évaluation d'une composante d'incertitude selon la méthode de type A peut passer par l'évaluation de la répétabilité d'un processus de mesure.

Exemple :

10 observations de température (°C) :

19,9 ; 20,0 ; 20,0 ; 20,1 ; 20,0 ; 19,9 ; 19,9 ; 19,8 ; 19,9 ; 20,0

moyenne : 19,95 °C

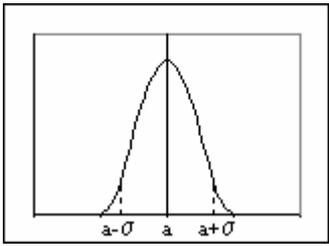
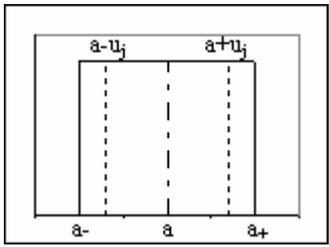
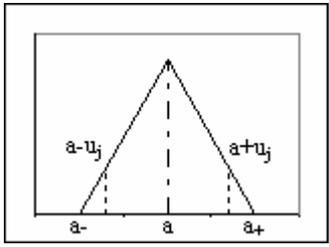
$$\text{écart-type : } s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,085 \text{ °C}$$

Une estimation selon une méthode de type A demande en général du temps et des ressources.

La méthode d'évaluation de type B s'effectue sur un jugement scientifique fondé sur toutes les informations disponibles (expérience, spécifications, étalonnage...). Ceci demande de l'expérience et une bonne connaissance du processus de mesure.

2 points sont à considérer dans ce cas selon la grandeur considérée :

- forme de la distribution de probabilité ;
- étendue de la variation possible.

DISTRIBUTION	HYPOTHESES	INCERTITUDE TYPE
Normale	<p>Limites extrêmes a_+ et a_-. Distribution normale autour de la moyenne $a = \frac{a_+ + a_-}{2}$</p> 	$u_j = \frac{a}{coef}$ <p>coef = 1,64 ; 1,96 ou 2,58 pour un niveau de confiance respectivement à 90 %, 95% ou 99%</p>
Rectangle	<p>Limites extrêmes a_+ et a_-. Distribution uniforme autour de la moyenne $a = \frac{a_+ + a_-}{2}$</p> 	$u_j = \frac{a}{\sqrt{3}}$
Triangulaire	<p>Limites extrêmes a_+ et a_-. Distribution triangulaire autour de la moyenne $a = \frac{a_+ + a_-}{2}$</p> 	$u_j = \frac{a}{\sqrt{6}}$

2.3. Déterminer l'incertitude composée

L'incertitude-type de y , estimation du mesurande, notée $u_c(y)$, est obtenue par la composition des incertitudes-types des estimations d'entrée, x_1, x_2, \dots, x_N .

Selon la loi de propagation des incertitudes ([1]) :

Si $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$

Alors
$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

coefficient de sensibilité \nearrow

variance associée à chaque grandeur d'entrée \uparrow

termes de covariance en cas de dépendance entre les variables $\underbrace{\hspace{10em}}$

Si toutes les grandeurs sont indépendantes :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

De plus si $y = x_1 + x_2 + \dots + x_N$ alors :

$$u_c^2(y) = u^2(x_1) + u^2(x_2) + \dots + u^2(x_N)$$

Si 2 grandeurs sont dépendantes, on peut :

- estimer le coefficient de corrélation et alors $u(x_i, x_j) = u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j)$
- calculer directement la covariance si on dispose de n observations conjointes de x_i

et x_j , alors :
$$u(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)(x_{j,k} - \bar{x}_j).$$

En pratique, on suppose souvent que les variables sont décorrélées.

2.4. Déterminer l'incertitude élargie

L'incertitude élargie U s'obtient en multipliant l'incertitude-type composée $u_c(y)$ par un facteur d'élargissement k soit $U = k \cdot u_c(y)$.

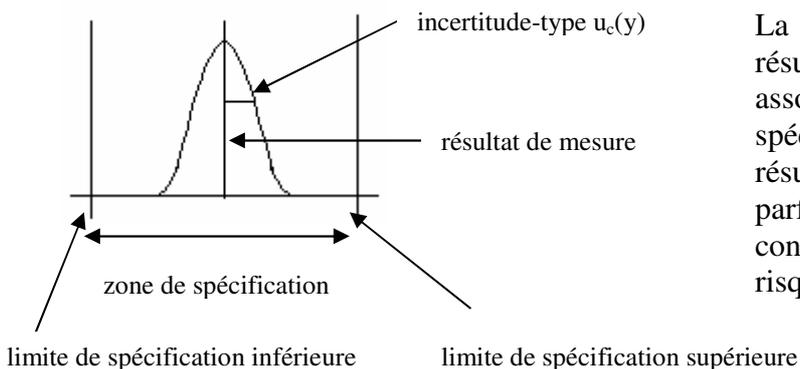
k est choisi selon le niveau de confiance recherché, en général 2.

L'incertitude est exprimée avec autant de chiffres significatifs que le résultat de mesure voire un chiffre de plus.

Exemple :

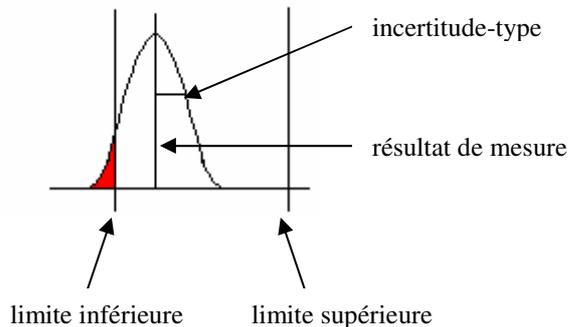
P=1013,15 hPa ± 0,11 hPa

2.5. Comparer un résultat de mesure avec une spécification



La figure présente la position d'un résultat de mesure et de son incertitude associée par rapport à une zone de spécification. Dans ce cas précis, le résultat augmenté de son incertitude est parfaitement compris dans la zone : la conformité peut être déclarée sans risque.

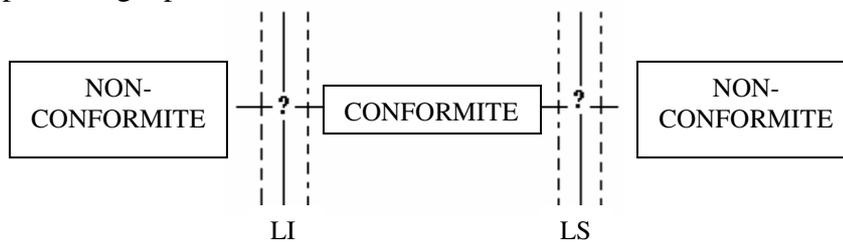
Lorsque le résultat augmenté de son incertitude dépasse cette zone, la conformité comme la non-conformité ne peuvent être déclarées avec certitude.



La figure présente la position d'un résultat de mesure et de son incertitude associée par rapport à une zone de spécification. Dans ce cas précis, le résultat augmenté de son incertitude n'est pas compris dans la zone : la conformité ne peut être déclarée sans risque.

Le risque associé dépend de la probabilité associée à la zone de dépassement et le coût associé.

Il n'existe pas de règle pour déclarer la conformité, chacun doit définir sa méthode.



Il existe un texte international ILAC-G8 :1996 Guidelines on assessment and reporting of compliance with a specification servant de cadre à la déclaration de conformité.

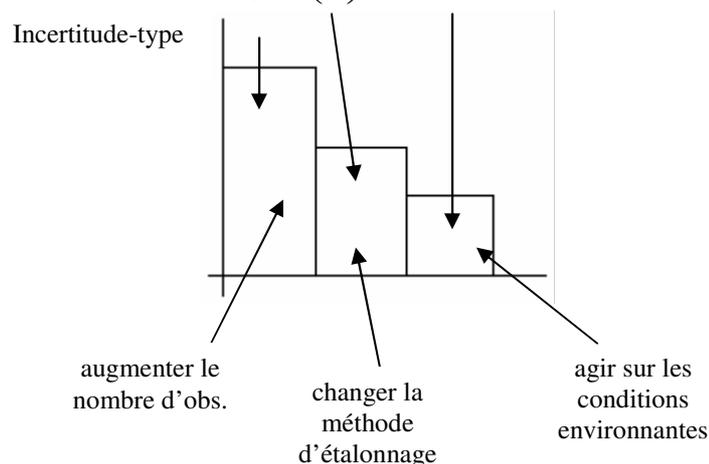
3. Synthèse

L'incertitude est un outil de maîtrise et d'amélioration des processus de mesure. En établissant les incertitudes-types associées à chaque grandeur d'entrée, on peut établir le poids de chacune dans l'incertitude finale et établir ainsi un diagramme de Pareto.

Exemple :

Si $\frac{s^2}{n}$ est l'incertitude-type liée à la répétabilité, $\left(\frac{u}{k}\right)^2$ celle liée à l'étalonnage et $u^2(c_a)$ liée aux conditions ambiantes, on a bien souvent les contributions suivantes :

$$u_c^2(y) = \frac{s^2}{n} + \left(\frac{u}{k}\right)^2 + u^2(c_a)$$



Pour résumer, la démarche de mise en place du bilan des incertitudes lié à un processus de mesure est la suivante :

- définir le mesurande, analyser le processus de mesure, établir le modèle mathématique ;
- calculer les incertitudes-types liées à chaque grandeur d'entrée ;
- propager les incertitudes ;
- exprimer l'incertitude élargie.

S'il se révèle impossible d'appliquer le guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, il faut alors évaluer l'incertitude en se fondant sur la performance de la méthode (cas en chimie notamment). La norme NF ISO 5725 permet de déterminer la fidélité de la méthode d'essai, en pratique, c'est une estimation de la justesse et de la dispersion d'une méthode de mesure par des essais interlaboratoires.

BIBLIOGRAPHIE :

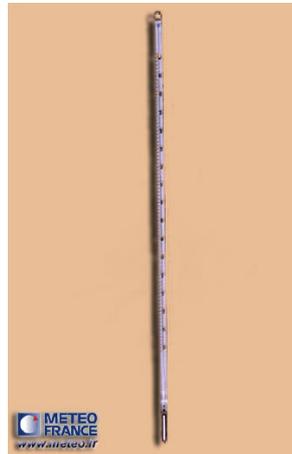
- [1], Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, NF ENV 13005, Août 1999, AFNOR
[2], Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 2^{ème} édition, 1993, Organisation internationale de normalisation (Genève-Suisse)

TRAINING MATERIAL ON METROLOGY AND CALIBRATION

STAGE METROLOGIE

1. Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie
2. Métrologie et statistiques (*en anglais seulement*)
3. Guide théorique à l'estimation des incertitudes de mesure
- 4. Métrologie des températures**
5. Mesure de l'humidité de l'air
6. Instruments de mesure de la pression
7. Infrastructure et instruments d'un laboratoire d'étalonnage : exemple du Laboratoire de Métrologie de Météo-France

Métrologie des températures



1. Paramètre température	2
1.1. Généralités	2
1.2. L'Echelle Internationale de Température (EIT)	2
1.3. Les points fixes de l'EIT 90	3
2. Les différents types de capteurs	4
2.1. Le thermomètre à dilatation de liquide	4
2.2. Le thermomètre à résistance	6
2.3. Le thermocouple	8
2.4. Le thermomètre à bilame.....	9
2.5. Les abris de protection ([1])	9
3. Moyens d'étalonnage.....	9
3.1. Définitions ([2])	9
3.2. Les bains.....	10
3.3. Les fours	10
3.4. Les enceintes climatiques	10
3.5. Utilisation des générateurs	10
4. Procédures d'étalonnage.....	11
4.1. Etalonnage des thermomètres à dilatation.....	11
4.2. Etalonnage des thermomètres à résistance de platine	13
4.3. Etalonnage des thermocouples.....	14

1. Paramètre température

1.1. Généralités

La température de l'air est un des paramètres d'état de l'atmosphère au même titre que la pression et l'humidité.

La température est mesurée :

- en surface ;
- en altitude ;
- dans la mer...

Ces mesures sont nécessaires pour les modèles de prévision numérique, à des fins hydrologiques ou agricoles ou pour les besoins de la climatologie.

La température est une grandeur intensive (la température de 2 corps différents assemblés n'est pas la somme des températures des 2 corps). Elle n'est pas mesurable directement mais repérable.

Le thermomètre primaire ou absolu est un instrument qui permet de relier la température à d'autres grandeurs physiques de base à travers une relation connue, par exemple celle des gaz parfaits ($PV=nRT$). La température ainsi mesurée est dite température thermodynamique, son unité dans le système international est alors le Kelvin (K). Mais la mise en place des thermomètres primaires est lourde, coûteuse et ne recouvre pas toutes les conditions expérimentales. De plus, les mesures sont dispersées. Or, le besoin est de disposer d'instruments très sensibles, reproductibles, cohérents et faciles à mettre en œuvre.

1.2. L'Echelle Internationale de Température (EIT)

Pour relier définition abstraite et réalité physique, une échelle internationale de température appelée EIT 90 a été définie.

Une échelle de température est constituée :

- d'un thermomètre, instrument dont le signal de sortie est fonction de la température ;
- d'une fonction d'interpolation, expression analytique paramétrée reliant le signal de sortie à la température ;
- de points fixes de température, qui permettent de déterminer des couples de valeurs (signal de sortie, température).

L'EIT a été définie en 1927 puis périodiquement revue, de façon à minimiser la différence entre la température absolue et la température définie dans l'échelle ; la dernière version de l'échelle internationale date de 1990, d'où EIT 90. Son point de définition est le point triple de l'eau ($t=0,01^{\circ}\text{C}$).

L'EIT 90 comporte un certain nombre de domaines et sous-domaines et chacun d'entre eux présente une nouvelle définition de T_{90} . Dans les domaines de recouvrement, les définitions coexistent.

$$t(^{\circ}\text{C})=T(\text{K})-273,15$$
$$t_{90}(^{\circ}\text{C})=T_{90}(\text{K})-273,15$$

Les mesures de T_{90} sont faciles, précises et reproductibles au contraire de T.

L'EIT 90 est définie avec un thermomètre à résistance de platine ; les fonctions d'interpolation sont exprimées sous forme de résistance réduite $W(T)$, ramenée à la résistance au point triple de l'eau $R(273,16K)$: $W(T) = \frac{R(T)}{R(273,16K)}$ et en terme d'écart à la fonction de

référence $W(T)=W_r(T)+\Delta W(T)$.

Un certain nombre de points fixes permettent de construire l'EIT 90.

1.3. Les points fixes de l'EIT 90

Le tableau suivant récapitule les points fixes ayant servi à la définition de l'EIT 90, sous la pression atmosphérique normale (à l'exception des points triples) :

NUMERO	TEMPERATURE		CORPS ¹	TYPE DE POINT ²
	T ₉₀ (K)	T ₉₀ (°C)		
1	3 à 5	-270,15 à -268,15	He	V
2	13,8033	-259,3467	e-H ₂	T
3	~17	~-256,15	e-H ₂ ou He	V ou G
4	~20,3	~-252,85	e-H ₂ ou He	V ou G
5	24,5561	-248,5939	Ne	T
6	54,3584	-218,7916	O ₂	T
7	83,8058	-189,3442	Ar	T
8	234,3156	-38,8344	Hg	T
9	273,16	0,01	H₂O	T
10	302,9146	29,7646	Ga	F
11	429,7485	156,5985	In	C
12	505,078	231,928	Sn	C
13	692,677	419,527	Zn	C
14	933,473	660,323	Al	C
15	1234,93	961,78	Ag	C
16	1337,33	1064,18	Au	C
17	1357,77	1084,62	Cu	C

¹ e-H₂ : hydrogène à la composition d'équilibre des variétés moléculaires ortho et para

² V : pression de vapeur saturante

T : point triple d'équilibre entre les 3 phases solide, liquide et vapeur

G : thermomètre à gaz

C,F : point de congélation, fusion

Tab. 1 : points fixes de définition de l'EIT 90

Le domaine qui nous intéresse se situe entre le point triple du mercure et le point de fusion du Gallium.

Entre le point triple de l'hydrogène (13,8033K) et le point de congélation de l'argent (961,78 °C) la T₉₀ est définie par un thermomètre à résistance de platine étalonné à des séries spécifiques de points fixes de définition, en utilisant des formules d'interpolation.

L'interpolation se fait en utilisant la fonction de référence suivante (issue de la norme EN 60751 : 1995) avec t en °C :

- de -200 à 0 °C :

$$R_t = R_0 [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C(t-100) \cdot t^3]$$

- de 0 à 850 °C

$$R_t = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2)$$

A	$3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$
B	$-5,802 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$
C	$-4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ °C}^{-4}$

2. Les différents types de capteurs

Le thermomètre ne donne que sa propre température, il doit donc perturber au minimum le milieu de mesure.

Les capteurs les plus utilisés sont :

METHODE	REPERE	DOMAINE
A dilatation de liquide	Volume du liquide	-200 °C à 650 °C
Résistance de platine	Résistance de l'élément sensible	13 K à 961 °C
Résistance Rhodium/Fer	Résistance de l'élément sensible	0,6K à 273 K
Couple thermoélectrique	FEM	-180 °C à 2500 °C
Thermistances	Résistance	0 °C à 100 °C

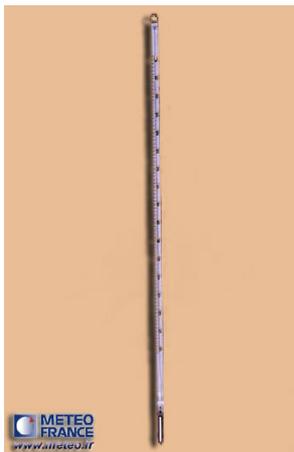
Tab. 2 : Récapitulatif de capteurs utilisés

On trouve aussi des thermomètres à dilatation de gaz, à bilames...

Extrait du Guide des instruments et méthodes d'observation météorologiques ([1]):

Tous les instruments de mesure de la température devraient être accompagnés d'un certificat de conformité aux normes d'exactitude ou de performance appropriée ou d'un certificat d'étalonnage donnant les corrections à appliquer pour obtenir l'exactitude requise.

2.1. Le thermomètre à dilatation de liquide



Ce thermomètre est basé sur le principe de la dilatation d'un liquide sous l'effet de la température. La température est alors repérée par la position du ménisque, par rapport à une graduation portée sur le verre.

La sensibilité du thermomètre est proportionnelle au :

- volume du réservoir ;
- différence entre le coefficient de dilatation du liquide et celui du verre.

Cette sensibilité est inversement proportionnelle à la section du capillaire.

Fig.1 : Thermomètre à dilatation

Voici les liquides usuels :

DOMAINE	LIQUIDE	COEFFICIENT DE CORRECTION DE COLONNE EMERGENTE
-200 à 20 °C	Pentane	0,001
-110 à 100 °C	Alcool éthylique	0,001
-38 à 650 °C	Mercure	0,00016
-56 à 650 °C	Mercure-thalium	0,00016

Tab. 3 : Principaux liquides employés

Les plus utilisés sont ceux à mercure ou alcool, dont voici un tableau récapitulatif des performances :

	MERCURE	ALCOOL
Point de fusion (°C)	-38,9	-117,3
Point d'ébullition (°C)	336,9	78,5
Coefficient de dilatation thermique	182.10^{-6}	1100.10^{-6}
Capacité calorifique (J.K ⁻¹)	0,12	2,43
Conductivité thermique (W.K ⁻¹ .m ⁻¹)	8,361	0,180
Mouillant	non	oui
Stable	oui	non
Dilatation linéaire	oui	non
Transparence	non	oui
Condensation	non	oui
Fractionnement	non	oui

Tab. 4 : performances des liquides employés

L'avantage est donné au mercure, malgré sa dangerosité.

Les verres utilisés sont recuits pour avoir une bonne stabilité, comme le pyrex.

Pour empêcher le fractionnement, l'espace libre est rempli en général avec un gaz neutre (souvent de l'azote).

L'utilisation des thermomètres à dilatation entraîne les erreurs de mesure suivantes :

- erreur de parallaxe : décalage entre la graduation portée sur le verre et le capillaire, il faut viser à la perpendiculaire de la tige ;
- erreur d'interpolation : la lecture demandée est au 1/10^{ème} quand la graduation est plus grossière, ce qui demande une bonne habitude de l'opérateur ;
- non linéarité du déplacement du ménisque : c'est le cas de l'alcool ou en raison de l'irrégularité de la section du capillaire ;
- déplacement du zéro dû à la contraction naturelle du verre vieilli vers les positifs ou abaissement à cause de l'hystérésis ;
- fractionnement de la colonne ;
- effets parasites : courants d'air, souffle...il faut une lecture rapide pour ne pas perturber la mesure ;
- colonne émergente : si la tige n'est pas à la même température que le réservoir, la dilatation n'est pas uniforme pour le liquide comme pour le verre, se pose le problème d'équilibre thermique avec le milieu.

L'utilisation de ce type de thermomètre repose sur les hypothèses suivantes :

- la loi de dilatation est connue ;
- le verre ne se dilate pas ;
- il n'y a pas d'interaction entre le verre et le liquide.

Le thermomètre à dilatation ordinaire est utilisé en météorologie sous un abri pour éviter les erreurs dues au rayonnement et est maintenu en position verticale, réservoir vers le bas, à l'aide d'un support.

Les thermomètres à dilatation de liquide sont aussi employés comme thermomètre maximum ou minimum. Pour le thermomètre maximum, le type recommandé ([1]) est un thermomètre à mercure sous verre dont le tube s'étrangle entre le bulbe et le début de l'échelle. Le thermomètre à maximum devrait être disposé transversalement à un angle d'environ 2° par rapport à l'horizontale, le bulbe du côté le plus bas afin que la colonne de mercure repose sur l'étranglement ([1]). L'étranglement empêche la colonne de mercure de redescendre lorsque la température baisse. Pour le thermomètre à minimum, les plus couramment utilisés sont des thermomètres à alcool avec un index de verre foncé, immergé, dans le tube. Comme le thermomètre à maximum, le thermomètre à minimum s'installe dans une position proche de l'horizontale.

2.2. Le thermomètre à résistance



Ce type de thermomètre est basé sur le fait que la résistance électrique d'un conducteur métallique augmente avec la température, selon une variation parfaitement réversible.

La connaissance de $R = f(T)$ permet de déterminer T avec R . Il existe une multitude de technologies selon les matières d'enrobage et le métal.

Fig. 2 : Thermomètre à résistance de platine

Le choix du métal se fait selon :

- la sensibilité voulue ;
- fidélité ;
- linéarité : sensibilité constante ;
- l'encombrement.

Le platine devient alors le meilleur compromis.

Le repère thermométrique est défini selon :

$$R(T) = \rho(T) \cdot \frac{L}{A} \quad \text{avec } L : \text{longueur du fil}$$

A : section

ρ : résistivité

Selon une loi empirique : $\rho(T) = \rho'(T) + \rho'(Z)$ avec Z impuretés.

Le fonctionnement d'un thermomètre à résistance est basé sur les hypothèses suivantes :

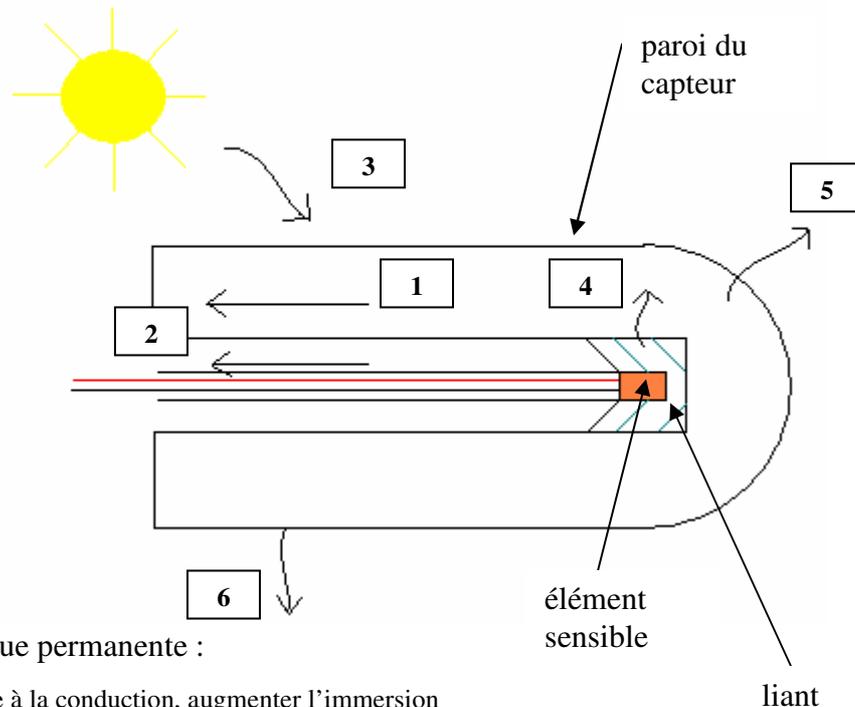
- stabilité de la composition de l'élément sensible ;
- $R(T)$ connue ;
- élément sensible isolé et parfaitement localisé.

La norme DIN 43760 fixe la valeur de la résistance à 100 Ω et donne la loi $R(T)$ ainsi que les tolérances d'interchangeabilité des thermomètres, selon 2 classes de précision :

- classe A : $\Delta T < (0,15 + 0,002|T|)$
- classe B : $\Delta T < (0,3 + 0,005|T|)$

Les erreurs proviennent :

- de la stabilité dans le temps avec l'influence des impuretés, des contraintes mécaniques et thermiques que l'on peut traiter éventuellement par un recuit ou estimer avec plusieurs contrôles à 0 °C, quant à la pollution, ses effets ne se font sentir qu'au delà de 550 °C ;
- hystérésis, dérive liée au matériau qui enchâsse le platine ;
- erreurs d'origine thermique puisque le fil de platine ne donne que sa propre température, ce qui nécessite la mise en place dans un abri :



- Erreur statique permanente :

- 1 due à la conduction, augmenter l'immersion
- 2 due à la conduction, diminuer la section
- 3 due au rayonnement, éviter les sources ou protéger

- Erreur statique d'autoéchauffement, liée au passage d'un courant i de mesure :

- 4 due à la conduction
- 5 due à la convection
- 6 due au rayonnement

Fig.3 : Schéma des fuites thermiques

Pour s'en affranchir, il faut soit diminuer le courant de mesure soit corriger si on connaît le coefficient d'autoéchauffement ou encore faire passer le courant i de mesure en impulsions courtes.

- erreur dynamique due au temps de réponse ;
- erreur de type électrique liée au montage pour mesurer la réponse, montage en 3 ou 4 fils pour éviter les résistances parasites et limiter la longueur de fil.

2.3. Le thermocouple

Le fonctionnement de cette sonde de température est basé sur l'effet Seebeck, il s'agit de confectionner une boucle, à l'aide de 2 conducteurs formés de 2 métaux différents.



Fig. 4 : Schéma d'un thermocouple

Si $T_A > T_B$, un courant parcourt les 2 conducteurs, dépendant de $T_A - T_B$:

$$E = \int_{T_A}^{T_B} \sigma(T) dT \text{ avec } \sigma \text{ coefficient de Seebeck.}$$

Voici un tableau récapitulatif des types de thermocouples :

NOM	COUPLES	SENSIBILITE	DOMAINE	!
S	Pt Rhodié 10 % / Platine	10 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 à 1600 $^\circ\text{C}$	Atmosphères réductrices
B	Platine Rhodié 30 % / platine Rhodié à 6%	9 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	50 à 1750 $^\circ\text{C}$	Atmosphères réductrices
R	Platine Rhodié à 13 % / Platine	12 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 à 1700 $^\circ\text{C}$	Atmosphères réductrices
K	Nickel Chrome / Nickel Aluminium	40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-180 à 1350 $^\circ\text{C}$	Atmosphères réductrices
N	Nickel Chrome Silice / Nickel Silice	40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-270 à 1300 $^\circ\text{C}$	Plus stable que le couple K
E	Nickel Chrome / Cuivre Nickel	80 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0 à 800 $^\circ\text{C}$	Ambiance neutre
J	Fer / Cuivre Nickel	56 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-180 à 750 $^\circ\text{C}$	Atmosphères réductrices
T	Cuivre / Cuivre Nickel	46 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	-250 à 400 $^\circ\text{C}$	Atmosphères oxydantes

Tab. 5 : Types de thermocouples

Les thermocouples sont basés sur les hypothèses suivantes :

- stabilité des matériaux ;
- f.e.m générée selon la température ;
- mesure ponctuelle.

Un thermocouple, avec un voltmètre, mesure une différence de température. Si la température de soudure est connue, la mesure de la différence de potentiel permet de calculer la température de l'autre soudure. Dans l'industrie, c'est très pratique d'autant plus que c'est un moyen économique et peu encombrant.

Les sources d'erreurs sont dues à :

- la dépendance du coefficient de Seebeck au matériau ;
- l'homogénéité du couple ;
- la stabilité dans le temps.

2.4. Le thermomètre à bilame



Fig. 5 : Thermomètre à bilame

Le principe est basé sur 2 lames de 2 métaux différents, soudées entre elles. La dilatation de chaque lame dépendant de T, toute variation de température entraîne une déformation. En reliant un stylet, on obtient un thermographe.

Les erreurs sont dues à :

- l'oxydation ;
- la grande inertie thermique ;
- un défaut de linéarité si le domaine d'élasticité est passé ;
- l'influence des liaisons mécaniques.

2.5. Les abris de protection ([1])

Dans la mesure du possible, un abri ou un écran anti-rayonnement devrait être conçu de manière à constituer une enceinte dont la température soit uniforme et identique à celle de l'extérieur. Le mieux pour cela est de recourir à la ventilation artificielle. Mais la plupart du temps, les abris ont recours à la ventilation naturelle, comme les abris à persiennes. L'écran doit alors être réalisé dans un matériau isolant thermique.

Pour les abris à persiennes, les parois doivent être de préférence à doubles persiennes, le toit, double, avec une bonne circulation d'air. Dans les régions à climat froid, il vaut mieux doubler le plancher pour s'affranchir au mieux de la réflexion de la neige. Il faut éviter les contacts directs entre les éléments sensibles, laisser de la place et le peindre en blanc, avec une peinture non hygroscopique dans la mesure du possible.

3. Moyens d'étalonnage

3.1. Définitions ([2])

Un étalonnage c'est l'ensemble des opérations établissant dans des conditions spécifiées la relation entre les valeurs de la grandeur indiquées par un appareil de mesure et les valeurs correspondantes de la grandeur, réalisées par un étalon.

En température, les étalonnages sont effectués à l'aide de générateurs de température, des systèmes qui permettent de créer le milieu de comparaison.

Il existe 4 types de générateurs :

- cryostats pour les basses températures, réalisés avec des bains d'azote ;
- bains, pour les températures intermédiaires de -80 à 180 °C ;
- fours pour des hautes températures ;
- enceintes climatiques.

3.2. Les bains



Les bains combinent l'utilisation d'un fluide et d'un bloc d'égalisation thermique pour obtenir les meilleures stabilités.

Pour les fluides, selon les domaines recherchés, on utilise de l'alcool, de l'eau ou de l'huile.

On distingue 2 grands types de bains : les bains à débordement et ceux à brassage.

Fig. 6 : Bain d'étalonnage température

3.3. Les fours

Il existe 3 types de fours :

- classiques avec un profil thermique à l'intérieur et la nécessité d'employer un bloc d'égalisation thermique ;
- à caloducs, soit une enceinte thermiquement fermée avec un liquide en équilibre en phase vapeur, la condensation sur les parois du four détermine le palier ;
- spéciaux, avec de la poudre d'alumine.

3.4. Les enceintes climatiques



Elles sont utilisées lorsque le thermomètre à étalonner n'est pas immergeable comme les thermohygromètres, les hygromètres à condensation...On utilise alors une enceinte thermostatée et l'étalonnage se fait alors dans l'air.

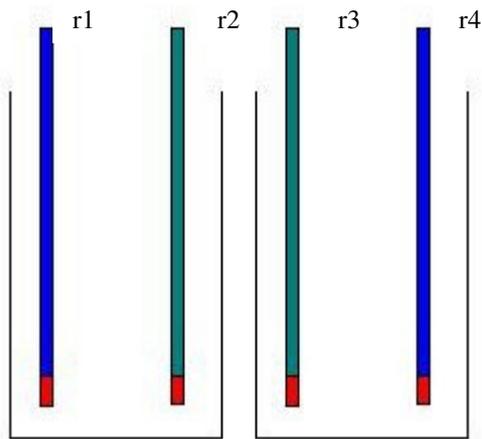
Fig. 7 : Enceinte climatique

3.5. Utilisation des générateurs

L'utilisation d'un générateur de température nécessite une caractérisation pour en connaître le profil en homogénéité, stabilité et la détermination du régime établi.

Des procédures doivent décrire les méthodes de caractérisation.

Exemple de caractérisation d'un ensemble bain+bloc :



Pour calculer l'incertitude due à l'homogénéité horizontale entre 2 thermomètres 1 et 2 :

- soit r1 la mesure de résistance du thermomètre 1 dans L1 ;
- soit r2 la mesure de résistance du thermomètre 2 dans L2 ;
- soit r3 la mesure de résistance de 2 dans L1 ;
- soit r4 la mesure de résistance de 1 dans L2.

Fig. 8 : Double pesée de Gauss

Alors :

- $r_1 = R_1(T)$ et $r_2 = R_2(T + \varepsilon)$
- $r_3 = R_2(T)$ et $r_4 = R_1(T + \varepsilon)$ avec $R_i(T)$ la réponse du thermomètre i placé à la température T .

ε représente l'écart des réponses des thermomètres placés à la même température mais dans des logements différents.

Soit $\rho_1 = \frac{r_1}{r_2}$ et $\rho_2 = \frac{r_3}{r_4}$. Alors $\varepsilon = \frac{R(1 - \rho_1 \rho_2)}{2s}$ avec s la sensibilité du capteur

($s = 0.390744 \Omega / ^\circ C$ pour une Pt100).

L'incertitude élargie sur la mesure de l'écart de température est donnée par la formule

suivante : $U(\varepsilon) = \pm 2 \times \frac{1}{s} u_c(\varepsilon)$ avec $u_c(\varepsilon)$ l'incertitude type sur une mesure de résistance.

L'incertitude élargie est donnée par la formule suivante :

$$U(\varepsilon) = 2 \times \frac{\frac{\Delta\rho}{4} \cdot R(T)}{s}$$

avec $\Delta\rho$ l'étendue des rapports de résistances lors d'un palier (10

mesures par palier typiquement) et $R(T)$ la résistance moyenne.

L'écart ε augmenté de l'incertitude associée est ainsi calculé sur tous les couples de thermomètres, tous les paliers. La plus forte valeur est prise comme homogénéité horizontale du bain.

Exemple de caractérisation d'une enceinte :

Voir la norme NF X 15-140.

4. Procédures d'étalonnage

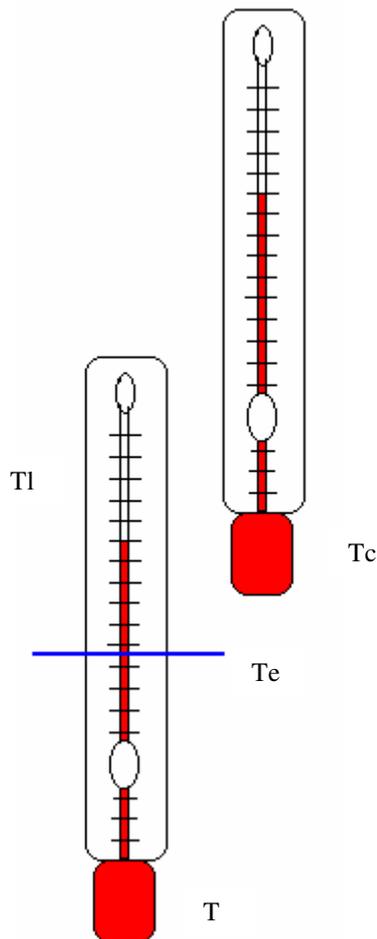
Les étalonnages se font par comparaison à un étalon avec l'aide d'un générateur. Selon le type de capteur, des sources d'erreur rentrent en compte.

4.1. Etalonnage des thermomètres à dilatation

Le générateur est typiquement un bain, à débordement de préférence.

➤ Immersion

Si le thermomètre est totalement immergé et immergé au degré lu, le liquide est à la température du milieu, il n'y a donc pas de correction de colonne émergente. Par contre s'il est immergé à une profondeur spécifiée, il convient d'appliquer une correction puisqu'une partie du liquide est à une température intermédiaire entre celle du milieu et celle de l'air ambiant.

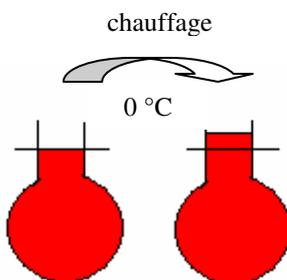


Tl : température lue
 Tc : température moyenne de la colonne émergente
 Te : température à l'interface liquide/air
 T : température du réservoir
 K : sensibilité

$$T = Tl + K (Tl - Te) (Tl - Tc)$$

Fig. 9 : Correction de la colonne émergente

➤ Dilatation du verre



Le chauffage du thermomètre implique un réarrangement cristallin du verre, une variation du volume du réservoir et donc une erreur sur toute l'échelle. Pour mettre en évidence ce phénomène, il faut prévoir plusieurs contrôles à 0 °C avant et après les points d'étalonnage.

Fig. 10 : Déplacement du 0 °C

➤ Interaction entre le liquide et le verre

Pour les thermomètres à mercure à capillaire très fin, la variation de courbure du ménisque de mercure entraîne des variations de pression dans le mercure (tension superficielle) et le liquide monte ou descend par bonds successifs. Il suffit de tapoter le thermomètre entre les lectures pour relaxer les contraintes internes (avec un crayon...).

Pour les thermomètres utilisant un liquide organique comme l'alcool, il faut prendre en compte l'effet de mouillage du capillaire. La procédure d'étalonnage prévoit alors le refroidissement lent du thermomètre.

La colonne de liquide peut également être discontinue en raison de bulle dans le capillaire, dans le réservoir ou dans le bulbe d'expansion. Il faut inspecter le thermomètre auparavant.

4.2. Etalonnage des thermomètres à résistance de platine

L'étalonnage se fait généralement dans un bain.

Exemple : étalonnage de Pt100 au Laboratoire de Métrologie de Météo France

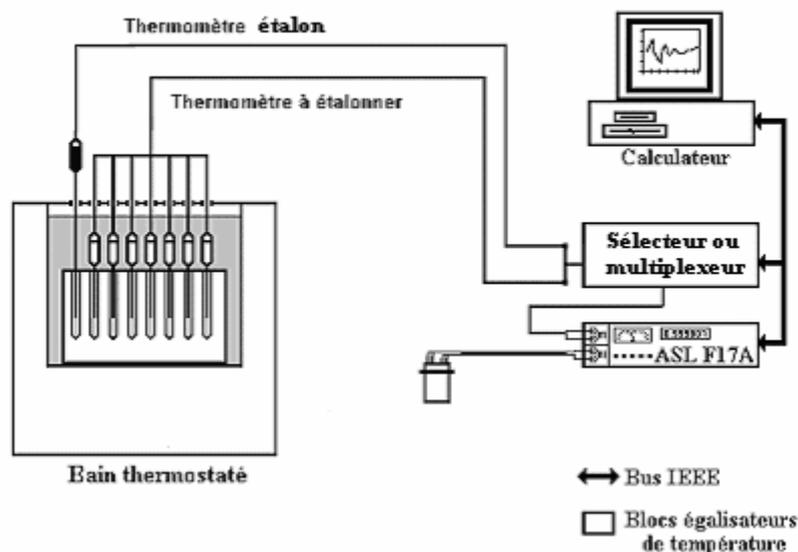


Fig. 11 : Schéma d'étalonnage de Pt100

L'étalonnage standard au laboratoire de Métrologie de Météo France est un étalonnage d'un thermomètre possédant un capteur à résistance de platine Pt100 (ou un capteur à résistance de platine seul, en mesure 4 fils) par comparaison directe à un capteur à résistance de platine Pt100 étalon dans un bloc égalisateur plongé dans un bain thermostaté, dans le domaine $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les cycles de mesure sont, pour chaque palier choisi par le client, une série de dix mesures des couples ($R_{\text{réf}}$, R_{mes}) espacées de 5 secondes. Ces résistances sont mesurées à l'aide d'une chaîne de mesure Pont de résistance – multiplexeur. Le courant traversant les thermomètres est de 1 mA.

Le thermomètre à étalonner est mesuré à $\sqrt{2}$ mA, pour pouvoir extrapoler la résistance du thermomètre à courant nul et en estimer l'auto-échauffement. Avant et après les comparaisons aux paliers dans le bain thermostaté, l'étalon est contrôlé au moyen d'une cellule point fixe de Gallium et du pont ASL.

➤ Stabilité du matériau

Les contraintes sur le fil de platine, l'influence des impuretés modifient la résistance électrique de l'élément sensible. Il faut estimer la stabilité dans le temps en effectuant des cyclages thermiques. Certains constructeurs vieillissent au préalable les sondes mais ce n'est pas obligatoire. La norme CEI 751 fixe les dérives maximales et classe les sondes en classe A ou B.

➤ Loi de dépendance résistance–température connue

La mesure de température implique le passage du courant et donc une part de puissance dissipée par effet Joule selon $P= Ri^2$.

Cette erreur typique des thermomètres à résistance, est fonction des caractéristiques du milieu, des échanges...

Pour s'affranchir de cette erreur, on peut soit en tenir compte en effectuant les mesures à 2 courants pour extrapoler la mesure à courant nul, soit diminuer l'intensité du courant i .

Pour les sondes courantes on admet des courants de l'ordre de 10 mA maximum, les erreurs varient ainsi de 0,05 à 1,5 °C.

➤ Nombre de conducteurs de liaison

Des mesures en 2 ou 3 fils impliquent des résistances parasites qu'il faut corriger. Il vaut mieux privilégier la mesure en 4 fils.

➤ Fuites thermiques

Selon la géométrie du capteur et le milieu de mesure, des fuites thermiques peuvent provoquer des erreurs de mesure. Il faut immerger le capteur dans le milieu de mesure et si possible étudier les fuites thermiques en faisant varier la profondeur d'immersion.

4.3. Etalonnage des thermocouples

➤ Stabilité

La procédure d'étalonnage débutera par la température la plus élevée pour déterminer l'influence de l'oxydation (réaction thermo-active).

Il faut également pratiquer des recuits initiaux pour relaxer les contraintes mécaniques.

➤ Hétérogénéité du couple

Une mesure à plusieurs immersions dans un milieu homogène permettra de mettre en évidence l'hétérogénéité du couple.

Le choix du capteur et de sa procédure d'étalonnage se fait selon les conditions d'utilisation mais certaines caractéristiques influencent également les séquences de la procédure d'étalonnage.

En météorologie, principalement 2 types de capteurs sont utilisés :

- thermomètres à dilatation ;
- thermomètres à résistance de platine Pt100.

Les moyens d'étalonnage mis en œuvre sont principalement des bains et des enceintes climatiques.

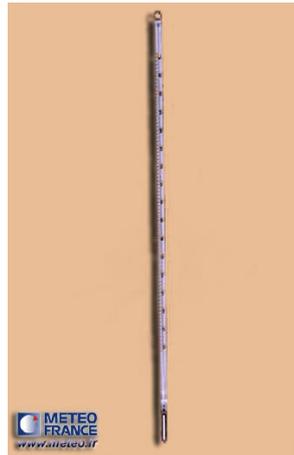
Comme aucune correction n'est possible, l'étalonnage conduit soit au choix soit au rejet du capteur s'il ne respecte pas les exigences requises. A Météo France l'exigence est de disposer de thermomètres de classe A.

BIBLIOGRAPHIE :

[1], Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques, sixième édition, OMM N°8, 1996

[2], Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 2^{ème} édition, 1993, Organisation internationale de normalisation (Genève-Suisse)

Exemple de bilan d'incertitudes :
Étalonnage d'un thermomètre à dilatation



1. Méthode, matériel mis en œuvre et modèle mathématique	2
1.1. Principe.....	2
1.2. Méthode.....	2
1.3. Matériel	2
1.4. Modèle mathématique de mesure.....	2
2. Détermination des incertitudes-types	3
2.1. Détails des corrections	3
2.2. Bilan des incertitudes-types	4
3. Propagation des incertitudes et expression du résultat	4

1. Méthode, matériel mis en œuvre et modèle mathématique

1.1. Principe

L'exemple porte sur l'étalonnage d'un thermomètre à dilatation de liquide gradué tous les 0,1 °C par comparaison à une référence à un palier T de température donné (20 °C).

Le paramètre à déterminer est la correction à appliquer au thermomètre en étalonnage.

1.2. Méthode

Les lectures se font à l'œil nu, l'opérateur interpolant au 1/5^{ème} de division. Les thermomètres sont immergés au degré lu (immersion totale).

Le cycle se compose de 10 lectures de la référence, suivi de 10 lectures du capteur puis 10 lectures de la référence à nouveau.

Entre chaque lecture, l'opérateur prend soin de tapoter avec un crayon les thermomètres pour relaxer les contraintes internes.

Le thermomètre en étalonnage est étalonné au point de glace fondante avant et après pour vérifier l'éventuelle dépression du zéro.

1.3. Matériel

Référence : Thermomètre étalon de référence

Thermomètre à dilatation de liquide gradué à 0,1 °C près et raccordé aux étalons nationaux. L'étalonnage a été réalisé en immersion totale, les lectures, effectuées par un opérateur interpolant au 1/5^{ème} de division.

Milieu : bain liquide thermostaté

Le bain a été caractérisé en homogénéité et stabilité.

1.4. Modèle mathématique de mesure

$$C = Tr - Tc + \delta T_{\text{int er}_r\text{réf}} + \delta T_{\text{étal}_r\text{réf}} + \delta T_{\text{dér}_r\text{réf}} + \delta T_{\text{col}_\text{émer}} + \delta T_{\text{stab}} + \delta T_{\text{hom}} + \delta T_{\text{zéro}} + \delta T_{\text{int er}_c\text{capteur}}$$

C : correction à apporter au thermomètre en étalonnage

Tr : température du thermomètre de référence

Tc : température du thermomètre en étalonnage

$\delta T_{\text{int er}_r\text{réf}}$: correction liée à l'interpolation de la lecture du thermomètre de référence

$\delta T_{\text{étal}_r\text{réf}}$: correction liée à l'étalonnage du thermomètre de référence

$\delta T_{\text{dér}_r\text{réf}}$: correction liée à la dérive du thermomètre de référence (entre 2 étalonnages)

$\delta T_{\text{col}_\text{émer}}$: correction liée à l'influence des conditions ambiantes sur les colonnes émergentes

δT_{stab} : correction liée à la stabilité du bain

δT_{hom} : correction liée à l'homogénéité

$\delta T_{\text{zéro}}$: correction liée à la dépression du zéro du thermomètre en étalonnage

$\delta T_{\text{int er}_c\text{capteur}}$: correction liée à l'interpolation de la lecture du thermomètre en étalonnage

2. Détermination des incertitudes-types

2.1. Détails des corrections

T_r : la température lue est de 20,02 °C (moyenne des 10 lectures) avec une étendue des 10 lectures de 0,02 °C.

En supposant une loi rectangulaire, l'incertitude-type est donc de $\frac{0,02}{2\sqrt{3}} = 0,006^\circ\text{C}$.

T_c : la température lue est de 20,10 °C (moyenne des 10 lectures) avec une étendue des 10 lectures de 0,02 °C.

En supposant une loi rectangulaire, l'incertitude-type est donc de $\frac{0,02}{2\sqrt{3}} = 0,006^\circ\text{C}$.

$\delta T_{\text{int er}_r\text{éf}}$: l'opérateur lit au 1/5^{ème} de division. La correction liée à l'erreur d'interpolation est considérée comme nulle.

En supposant une loi rectangulaire, l'incertitude-type est donc de $\frac{0,1/5}{2\sqrt{3}} = 0,006^\circ\text{C}$.

$\delta T_{\text{étal}_r\text{éf}}$: le certificat précise que la correction à appliquer est de 0,01 °C avec une incertitude élargie (k=2) de 0,2 °C.

$\delta T_{\text{dér}_r\text{éf}}$: l'historique des étalonnages ne met pas en évidence d'évolution des corrections, qui sera donc considérée comme nulle.

L'incertitude-type sera prise comme égale à celle due à l'interpolation : 0,006 °C.

$\delta T_{\text{col}_\text{émer}}$: l'étalonnage se fait en immersion totale, pas de correction à appliquer.

L'incertitude-type sera prise comme égale à celle due à l'interpolation : 0,006 °C.

δT_{stab} : la correction est nulle, a été calculé l'écart-type expérimental des mesures qui est de 0,01 °C. L'incertitude-type est prise comme égale à cet écart.

δT_{hom} : la correction est considérée comme nulle dans la limite de l'écart maximal expérimental observé lors de la caractérisation : 0,04 °C.

En supposant une loi rectangulaire, l'incertitude-type est donc de $\frac{0,04}{2\sqrt{3}} = 0,012^\circ\text{C}$.

$\delta T_{\text{zéro}}$: les mesures faites avant et après au point de glace fondante n'ont pas détecté de déplacement du zéro.

L'incertitude-type sera prise comme égale à celle due à l'interpolation : 0,006 °C.

$\delta T_{\text{int er}_\text{capteur}}$: l'opérateur lit au 1/5^{ème} de division. La correction liée à l'erreur d'interpolation est considérée comme nulle.

En supposant une loi rectangulaire, l'incertitude-type est donc de $\frac{0,1/5}{2\sqrt{3}} = 0,006^\circ\text{C}$.

2.2. Bilan des incertitudes-types

TYPE	ESTIMATION	INCERTITUDE-TYPE	LOI	COEFFICIENT DE SENSIBILITE	CONTRIBUTION
Tr	20,02	0,006	rectangulaire	1	0,006
Tc	20,10	0,006	rectangulaire	1	0,006
$\delta T_{\text{int er}_{\text{réf}}}$	0	0,006	rectangulaire	1	0,006
$\delta T_{\text{étal}_{\text{réf}}}$	-0,02	0,1	normale	1	0,1
$\delta T_{\text{dér}_{\text{réf}}}$	0	0,006	rectangulaire	1	0,006
$\delta T_{\text{col}_{\text{émer}}}$	0	0,006	rectangulaire	1	0,006
δT_{stab}	0	0,01	normale	1	0,01
δT_{hom}	0	0,012	rectangulaire	1	0,012
$\delta T_{\text{zéro}}$	0	0,006	rectangulaire	1	0,006
$\delta T_{\text{int er}_{\text{capteur}}}$	0	0,006	rectangulaire	1	0,006

3. Propagation des incertitudes et expression du résultat

$$C = Tr - Tc + \delta T_{\text{int er}_{\text{réf}}} + \delta T_{\text{étal}_{\text{réf}}} + \delta T_{\text{dér}_{\text{réf}}} + \delta T_{\text{col}_{\text{émer}}} + \delta T_{\text{stab}} + \delta T_{\text{hom}} + \delta T_{\text{zéro}} + \delta T_{\text{int er}_{\text{capteur}}}$$

$$C = 20,02 - 20,10 + 0 - 0,02 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0$$

$$C = -0,10^{\circ}\text{C}$$

Les grandeurs d'entrée sont considérées comme décorrélées.

Selon le modèle de mesure, l'incertitude propagée est la somme quadratique des incertitudes-types calculées auparavant avec des coefficients de sensibilité égaux à 1.

$$u_c^2(y) = 0,006^2 + 0,006^2 + 0,006^2 + 0,1^2 + 0,006^2 + 0,006^2 + 0,01^2 + 0,012^2 + 0,006^2 + 0,006^2$$

$$u_c(y) = 0,103^{\circ}\text{C}$$

La correction à appliquer au thermomètre étalonné est donc de $(-0,10 \pm 0,21)^{\circ}\text{C}$.

BIBLIOGRAPHIE :

[1], Guide technique pour un dossier d'accréditation température, COFRAC, 10 décembre 1999

Exemple de bilan d'incertitudes :
Etalonnage d'une PT-100 Ω



1. Méthode, matériel mis en œuvre et modèle mathématique	2
1.1. Principe.....	2
1.2. Méthode.....	2
1.3. Matériel	2
1.4. Modèle mathématique de mesure.....	2
2. Détermination des incertitudes-types	3
2.1. Incertitudes liées à l'étalon T_r	3
2.2. Incertitudes liées au capteur T_c	3
2.3. Incertitudes liées à la chaîne d'acquisition $\delta T_{chaîne}$	4
2.4. Incertitudes liées au bain thermostaté δT_{bain}	4
2.5. Incertitudes liées à l'utilisation de la cellule de gallium $\delta T_{gallium}$	4
2.6. Bilan des incertitudes-types	5
3. Propagation des incertitudes et expression du résultat	5
4. Conformité à la classe A	5

1. Méthode, matériel mis en œuvre et modèle mathématique

1.1. Principe

L'exemple porte sur l'étalonnage d'un thermomètre à résistance de platine PT-100 Ω du type réseau de Météo France, par comparaison à un thermomètre étalon à résistance de platine. Le paramètre à déterminer est la conformité à la classe A du thermomètre en étalonnage.

1.2. Méthode

La procédure d'étalonnage suit les préconisations de la procédure interne au Laboratoire de Métrologie, soit un étalonnage sur 4 paliers de température, 40 °C, 20 °C, 0 °C et -20 °C, par comparaison à l'étalon de travail du laboratoire. Les paliers sont générés à l'aide d'un bain thermostaté. Les mesures sont faites à 2 courants de mesure (1 et $\sqrt{2}$ mA) pour estimer l'autoéchauffement.

Avant et après l'étalonnage, l'étalon de travail est contrôlé en stabilité à l'aide d'une cellule point fixe de Gallium.

1.3. Matériel

Référence : Thermomètre étalon de référence

Thermomètre PT-100 Ω étalon de référence, raccordé aux étalons nationaux en interne au Laboratoire de Métrologie.

Milieu : bain liquide thermostaté

Le bain a été caractérisé en homogénéité et stabilité et selon la forme du bloc d'égalisation thermique.

Moyens : pont de mesure ASL F 17

1.4. Modèle mathématique de mesure

$$T_c = T_r + \delta T_{chaîne} + \delta T_{bain} + \delta T_{gallium}$$

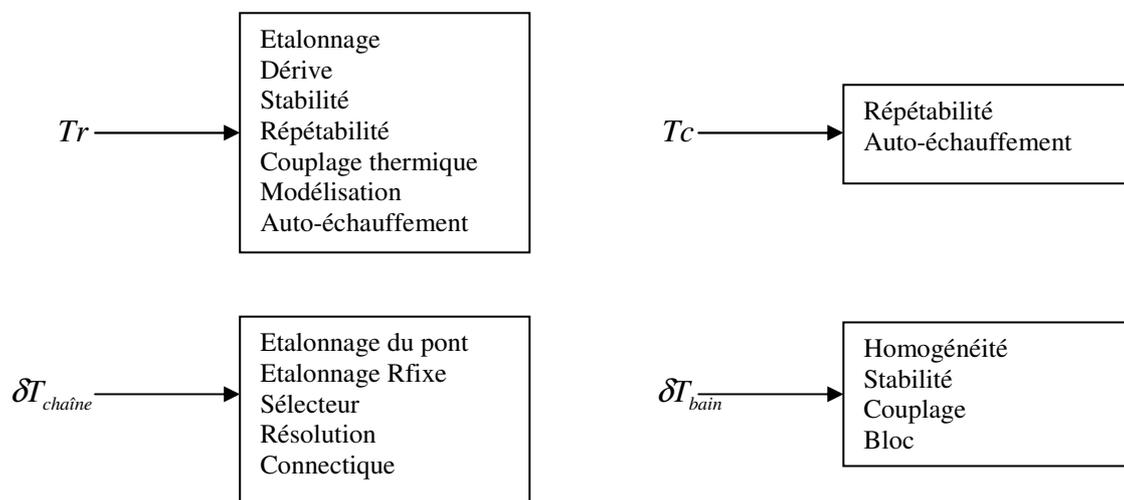
T_r : température du thermomètre de référence

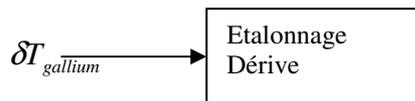
T_c : température du thermomètre en étalonnage

δT_{bain} : correction liée au mode d'acquisition des mesures

δT_{bain} : correction liée au couplage des thermomètres avec le milieu ambiant

$\delta T_{gallium}$: correction liée à l'utilisation de la cellule de Gallium pour contrôler la stabilité de la référence





2. Détermination des incertitudes-types

2.1. Incertitudes liées à l'étalon T_r

Les corrections déterminées lors de l'étalonnage de la référence sont appliquées lors de l'acquisition, par l'intermédiaire du logiciel, en mettant à jour les coefficients de l'interpolation polynomiale de la réponse du thermomètre étalon.

La correction liée à la modélisation n'est pas appliquée, elle est ajoutée linéairement au bilan d'incertitudes.

De même, la correction de l'auto-échauffement n'est pas faite, sa valeur est ajoutée linéairement au bilan final.

$u_{\text{étal}}$: la référence est étalonnée tous les 2 ans en interne. La correction trouvée est appliquée, l'incertitude élargie associée est de $0,029\text{ °C}$ ($k=2$)

$u_{\text{dér}}$: la dérive sur la référence est calculée sur l'historique des étalonnages, l'incertitude-type est calculée en partant de l'écart maximal entre 2 étalonnages successifs et en considérant une loi rectangulaire : $\frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,0058\text{ °C}$.

u_{stab} : la stabilité de l'étalon est estimée par un contrôle avant/après par rapport au point fixe de gallium, le critère est une stabilité à $0,0005\text{ °C}$ près, valeur de l'incertitude-type.

$u_{\text{répet}}$: l'incertitude-type due à la répétabilité de la référence est estimée à partir de l'écart type expérimental maximum calculé sur tous les paliers et sur les séries de 10 mesures effectuées à chaque étalonnage.

u_{couplage} : l'incertitude-type due à l'influence du milieu ambiant sur la référence est estimée en faisant varier la hauteur de l'étalon, l'écart maximal en considérant une loi rectangulaire est alors de : $\frac{0,011}{2\sqrt{3}} = 0,0032\text{ °C}$.

$c_{\text{échauff}}$: la correction due à l'autoéchauffement n'est pas appliquée. Elle est calculée grâce à une extrapolation à courant nul lors de l'étalonnage : $0,009\text{ °C}$.

c_{mod} : la correction due à la modélisation en polynôme n'est pas appliquée. Elle est calculée à partir du maximum des résidus : $0,0002\text{ °C}$.

2.2. Incertitudes liées au capteur T_c

$s_{\text{échauff}}$: l'incertitude-type due à l'auto-échauffement est estimée lors de l'étalonnage, en extrapolant à courant nul à partir des mesures faites à 2 valeurs de courant.

$s_{\text{rép}}$: l'incertitude-type due à la répétabilité de l'instrument est estimée à partir de l'écart-type expérimental trouvé sur la série des 10 mesures.

2.3. Incertitudes liées à la chaîne d'acquisition $\delta T_{chaîne}$

La chaîne d'acquisition est utilisée 3 fois, pour la référence, le thermomètre en étalonnage et le contrôle à la cellule de gallium.

u_{pont} : incertitude-type liée à l'étalonnage et à la mise en œuvre du pont de mesure ASL F 17. L'étalonnage a été réalisé dans un laboratoire accrédité. L'incertitude-type est calculée en considérant une erreur maximale, ce qui donne 0,0013 °C.

u_{Rfixe} : incertitude-type liée à l'étalonnage, dérive et à la mise en œuvre de la résistance fixe utilisée avec le pont de mesure. L'étalonnage a été réalisé dans un laboratoire accrédité. L'incertitude-type est de 0,0009 °C.

u_{slect} : incertitude-type liée à la mise en œuvre du sélecteur de voies, étudiée par une caractérisation interne (cartes de contrôle). L'incertitude est de 0,0002 °C.

$u_{résol}$: incertitude-type liée à la résolution obtenue avec le pont (variation de la plus petite unité du rapport de résistances) soit 0,0001 °C.

u_{connec} : incertitude-type liée à l'influence de la connectique, négligeable.

2.4. Incertitudes liées au bain thermostaté δT_{bain}

L'utilisation du bain et du bloc égalisateur associé comme milieu de mesure conduit à des incertitudes d'homogénéité, stabilité et dues à la forme du bloc.

u_{hom} : incertitude-type liée à l'homogénéité horizontale du bain, étudiée par double pesée lors de la caractérisation du bain, soit 0,0184 °C.

u_{stab_bain} : incertitude-type liée à la stabilité dans le temps du bain, soit au maintien de la consigne, étudiée lors de la caractérisation du bain soit 0,0032 °C.

u_{therm} : incertitude-type liée à l'homogénéité verticale du bain ou l'influence du milieu ambiant, étudiée lors de la caractérisation du bain soit 0,0040 °C.

$u_{couronne}$: incertitude-type liée à la forme du bloc, en 2 couronnes, étudiée lors de la caractérisation du bain soit 0,0015 °C.

2.5. Incertitudes liées à l'utilisation de la cellule de gallium $\delta T_{gallium}$

u_{etal_ga} : incertitude-type liée à l'étalonnage de la cellule de gallium réalisée dans un laboratoire accrédité, 0,0013 avec un coefficient k=2.

u_{der_ga} : incertitude-type liée à la dérive de la cellule de gallium entre 2 étalonnages soit en considérant une loi rectangle : $\frac{0,0001}{\sqrt{3}} = 0,0001^\circ C$.

2.6. Bilan des incertitudes-types

TYPE	LOI	INCERTITUDE TYPE (°C)
u _{étal}	normale	0,0145
u _{dér}	rectangulaire	0,0058
u _{stab}	normale	0,0005
u _{répet}	normale	0,002 au mieux à chaque étalonnage
u _{couplage}	rectangulaire	0,0032
c _{échauff}	/	0,009
c _{mod}	normale	0,0002
u _{pont}	Combinaison normale et rectangulaire	0,0013
u _{Rfixe}	Combinaison normale et rectangulaire	0,0009
u _{sélect}	rectangulaire	0,0002
u _{résol}	rectangulaire	0,0001
u _{connec}	/	négligeable
u _{hom}	rectangulaire	0,0184
u _{stab_bain}	normale	0,0032
u _{therm}	rectangulaire	0,0040
u _{couronne}	couronne	0,0015
u _{étal_ga}	normale	0,0007
u _{dér_ga}	rectangulaire	0,0001
s _{échauff}	rectangulaire	à chaque étalonnage
s _{rép}	normale	à chaque étalonnage

3. Propagation des incertitudes et expression du résultat

$$U_c = \sqrt{u_{\text{étal}}^2 + u_{\text{dér}}^2 + u_{\text{stab}}^2 + u_{\text{couplage}}^2 + u_{\text{répet}}^2 + 3 \cdot (u_{\text{résol}}^2 + u_{\text{pont}}^2 + u_{\text{Rfixe}}^2 + u_{\text{sélect}}^2) + u_{\text{hom}}^2 + u_{\text{stab_bain}}^2 + u_{\text{therm}}^2 + u_{\text{couronne}}^2 + u_{\text{étal_ga}}^2 + u_{\text{dér_ga}}^2 + s_{\text{échauff}}^2 + s_{\text{rép}}^2}$$

$$U = \pm 2 \cdot U_c + c_{\text{échauff}} + u_{\text{mod}} \text{ avec } k = 2$$

Les grandeurs d'entrée sont considérées comme décorrélées.

4. Conformité à la classe A

La classe A est déterminée par le critère suivant : écart maximal toléré (EMT) à $0,15 + 0,002 \cdot |T|$ avec T en °C.

Le thermomètre étalonné et déclaré de classe A si à tous les paliers $|correction| + U < EMT$.

BIBLIOGRAPHIE :

[1], Guide technique pour un dossier d'accréditation température, COFRAC, 10 décembre 1999

TRAINING MATERIAL ON METROLOGY AND CALIBRATION

STAGE METROLOGIE

1. Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie
2. Métrologie et statistiques (*en anglais seulement*)
3. Guide théorique à l'estimation des incertitudes de mesure
4. Métrologie des températures
- 5. Mesure de l'humidité de l'air**
6. Instruments de mesure de la pression
7. Infrastructure et instruments d'un laboratoire d'étalonnage : exemple du Laboratoire de Métrologie de Météo-France

STAGE METROLOGIE

MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR

LES PARAMETRES HYGROMETRIQUES

SOMMAIRE

1 OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION	3
2 DEFINITIONS	3
2.1 L'AIR SEC	3
2.2 L'AIR HUMIDE	3
2.3 LE RAPPORT DE MELANGE (r)	3
2.4 L'HUMIDITE SPECIFIQUE (q)	4
2.5 L'HUMIDITE ABSOLUE (ρ_v)	4
2.6 LA FRACTION VOLUMIQUE (x)	4
2.7 LA FRACTION MOLAIRES DE LA VAPEUR D'EAU D'UN ECHANTILLON D'AIR HUMIDE (x_v)	5
2.8 HYPOTHESE : EQUATION DES GAZ PARFAITS	5
2.8.1 L'humidité absolue (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)	5
2.8.2 Le rapport de mélange (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)	6
2.8.3 L'humidité spécifique (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)	6
2.8.4 La masse volumique de l'air humide (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)	6
2.8.5 La fraction volumique (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)	6
2.9 LA SATURATION	7
2.10 LE RAPPORT DE MELANGE DE SATURATION (EN CONSIDERANT L'HYPOTHESE DU GAZ PARFAIT)	7
2.11 LA FRACTION MOLAIRES DE LA VAPEUR D'EAU DANS L'AIR HUMIDE SATURE PAR RAPPORT A L'EAU OU PAR RAPPORT A LA GLACE.	7
2.12 LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE DE L'AIR HUMIDE	8
2.13 LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE EN PHASE PURE	8
2.14 RELATIONS ENTRE LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE EN PHASE PURE ET CELLE DE L'AIR HUMIDE	9
2.15 TEMPERATURE THERMODYNAMIQUE DU POINT DE ROSEE (T_d)	9
2.16 TEMPERATURE THERMODYNAMIQUE DU POINT DE GELEE (T_f)	10
2.17 RELATIONS ENTRE LES TEMPERATURES THERMODYNAMIQUES DU POINT DE ROSEE OU DU POINT DE GELEE ET LE RAPPORT DE MELANGE	10
2.18 L'HUMIDITE RELATIVE U_w DE L'AIR HUMIDE PAR RAPPORT A L'EAU	10
2.19 L'HUMIDITE RELATIVE U_i DE L'AIR HUMIDE PAR RAPPORT A LA GLACE	11
2.20 LA TEMPERATURE THERMODYNAMIQUE DU THERMOMETRE MOUILLE	11
2.21 LA TEMPERATURE THERMODYNAMIQUE DU THERMOMETRE RECOUVERT DE GLACE	11
2.22 RELATIONS ENTRE LA TEMPERATURE DU THERMOMETRE MOUILLE ET LA TEMPERATURE DE ROSEE	12
3 REFERENCES	13

1 OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

Le présent document a pour objet de définir les principaux termes utilisés pour la mesure de l'humidité de l'air dans les applications suivantes :

- météorologie,
- conditionnement d'air et climatisation,
- régulation et caractérisation des enceintes climatiques, pièces climatisées, séchoirs,
- détection des traces de vapeur d'eau (gaz, micro-électronique, métallurgie...),
- etc....

Il spécifie également les valeurs des grandeurs de référence utilisées pour les différents calculs.

2 DEFINITIONS

2.1 L'AIR SEC

Mélange de gaz contenant principalement de l'azote, de l'oxygène, de l'argon, du gaz carbonique et, en faibles quantités, un certain nombre d'autres gaz (néon, hélium, krypton, hydrogène...). Les proportions de ces différents gaz, tout en variant légèrement en fonction du temps et du lieu, peuvent être considérées en première approximation comme constantes (air de référence).

Cf. annexe A

2.2 L'AIR HUMIDE

Mélange en proportion variable d'air sec et de vapeur d'eau.

Remarque : la vapeur d'eau étant de l'eau à l'état gazeux, la présence d'eau sous forme liquide en suspension (brouillard) n'intervient pas dans la notion d'air humide et n'entre pas dans le cadre de ce document.

2.3 LE RAPPORT DE MELANGE (r)

Le rapport de mélange r de l'air humide est le rapport de la masse m_v de vapeur d'eau à la masse m_a de l'air sec avec laquelle la vapeur d'eau est associée :

$$r = \frac{m_v}{m_a}$$

m_a est la masse d'air sec, m_v est la masse de vapeur d'eau,

Ce rapport est un nombre sans dimension.

2.4 L'HUMIDITE SPECIFIQUE (q)

L'humidité spécifique q de l'air humide est le rapport de la masse m_v de vapeur d'eau à la masse $m_v + m_a$ de l'air humide dans laquelle la masse de vapeur d'eau m_a est contenue :

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_a}$$

m_v est la masse de vapeur d'eau, m_a est la masse d'air sec,
 $m_v + m_a$ est la masse d'air humide,

Ce rapport est un nombre sans dimension.

2.5 L'HUMIDITE ABSOLUE (ρ_v)

Dans un mélange de vapeur d'eau et d'air sec, l'humidité absolue ρ_v est définie comme étant le rapport de la masse de vapeur d'eau m_v au volume V occupé par le mélange :

$$\rho_v = \frac{m_v}{V}$$

m_v est la masse de vapeur d'eau (exprimée en kg),
 V est le volume occupé par le mélange (exprimé en m^3),

ρ_v est exprimé en kg/m^3 .

2.6 LA FRACTION VOLUMIQUE (x)

La fraction volumique est le rapport exprimé en pour cent du volume du constituant i d'un mélange gazeux au volume occupé par tous les constituants quand le volume de chaque constituant respectif est mesuré dans les mêmes conditions de température et de pression.

$$x_i = \frac{V_i}{V}$$

Fraction volumique de la vapeur d'eau :

$$x = \frac{v}{V}$$

v est le volume de la vapeur d'eau (exprimé en m^3),
 V est le volume total de l'air humide (exprimé en m^3),

Ce rapport est généralement exprimé en “ parties par million ” (ppm volume), les volumes de chaque constituant étant mesurés dans les mêmes conditions de température et de pression.

2.7 LA FRACTION MOLAIRE DE LA VAPEUR D'EAU D'UN ECHANTILLON D'AIR HUMIDE (x_v)

La fraction molaire x_v de la vapeur d'eau d'un échantillon d'air humide, constitué d'une masse m_a d'air sec et d'une masse m_v de vapeur d'eau, est défini par le rapport du nombre de moles de vapeur d'eau au nombre total de moles de l'échantillon. On a donc :

$$x_v = \frac{n_v}{n_a + n_v} = \frac{m_v / M_v}{m_v / M_v + m_a / M_a} = \frac{r}{r + \frac{M_v}{M_a}}$$

n_v nombre de moles de vapeur d'eau, m_v est la masse de vapeur d'eau,
 n_a nombre de moles d'air sec, m_a est la masse d'air sec,
 M_v = masse molaire de la vapeur d'eau ($18,01528 \times 10^{-3}$ kg / mole),
 M_a = masse molaire de l'air sec ($28,96455 \times 10^{-3}$ kg / mole).

$$x_v = \frac{r}{r + 0,62198}$$

2.8 HYPOTHESE : EQUATION DES GAZ PARFAITS

Les définitions et formules mentionnées ci-dessus sont indépendantes de l'équation d'état du gaz.

Dans le cas où l'on suppose que l'air humide est un gaz parfait on peut appliquer au mélange air sec-vapeur d'eau la loi de Dalton : la somme des pressions partielles des constituants est égale à la pression totale de l'air humide. Si l'on appelle :

p la pression totale de l'air humide,
 p_a la pression partielle de l'air sec $p_a = x_a \times p$
 e la pression partielle de la vapeur d'eau $e = x_v \times p$

alors

$$p = p_a + e$$

2.8.1 L'humidité absolue (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)

La définition $\rho_v = \frac{m_v}{V}$ peut alors s'écrire $v = \frac{e \times M_v}{R \times T}$

e pression partielle de la vapeur d'eau,
 M_v = masse molaire de la vapeur d'eau,
 R constante des gaz parfaits,
 T température thermodynamique du mélange.

2.8.2 Le rapport de mélange (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)

La définition $r = \frac{m_v}{m_a}$ peut alors s'écrire $r = \frac{0.62198 \times e}{P - e}$

2.8.3 L'humidité spécifique (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)

La définition $q = \frac{m_v}{m_v + m_a}$ peut alors s'écrire $q = \frac{0,62198 \times e}{P - 0,37802 \times e}$

2.8.4 La masse volumique de l'air humide (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)

Considérons un échantillon d'air humide à la pression p , à la température thermodynamique T , dont le volume est V et la masse totale m . La masse volumique de l'air humide est égale à $\frac{m}{V}$.

La définition $\rho = \frac{m}{V}$ peut alors s'écrire $\rho = \frac{M_a}{R} \times \frac{(P - 0,37802 \times e)}{T}$

La température virtuelle T_v est définie par l'équation :

$$T_v = \frac{T}{1 - 0,37802 \times \frac{e}{P}}$$

La température virtuelle T_v est définie comme la température que l'air sec devrait avoir à la pression p de telle façon que sa masse volumique soit la même que celle de l'air humide caractérisée par sa pression p , sa température T et son rapport de mélange r .

2.8.5 La fraction volumique (en considérant l'hypothèse du gaz parfait)

La définition de la fraction volumique $x_e = \frac{v_e}{V}$ de la vapeur d'eau peut alors s'écrire :

$$x_e = \frac{e}{P} = \frac{r}{0.62198 + r}$$

La définition de la fraction volumique $x_a = \frac{v_a}{V}$ de l'air sec peut alors s'écrire :

$$x_a = \frac{P - e}{P} = \frac{0,62198}{0,62198 + r}$$

2.9 LA SATURATION

A une température et à une pression données, l'air humide est dit saturé si son rapport de mélange est tel que l'air humide puisse coexister en équilibre indifférent avec une phase condensée associée (liquide ou solide) à la même température et à la même pression, la surface de contact des phases étant plane.

Cela signifie que la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air à une température et à une pression données ne peut excéder une certaine valeur au-delà de laquelle toute quantité d'eau supplémentaire ne peut apparaître que sous forme liquide.

A cette valeur, l'air est dit saturé.

2.10 LE RAPPORT DE MELANGE DE SATURATION (EN CONSIDERANT L'HYPOTHESE DU GAZ PARFAIT)

Le symbole r_w désigne le rapport de mélange de saturation de l'air humide par rapport à une surface plane de la phase liquide associée.

Le symbole r_i désigne le rapport de mélange de saturation de l'air humide par rapport à une surface plane de la phase solide associée.

Remarques : les phases liquides et solides associées en question consistent respectivement en eau presque pure et en glace presque pure, un peu d'air dissous étant présent dans l'une et l'autre.

$$r_w = \frac{0,62198 \times e_w}{p - e_w} \quad r_i = \frac{0,62198 \times e_i}{p - e_i}$$

avec $p > e_w$ et $p > e_i$ à la température T donnée.

2.11 LA FRACTION MOLAIRES DE LA VAPEUR D'EAU DANS L'AIR HUMIDE SATURÉ PAR RAPPORT A L'EAU OU PAR RAPPORT A LA GLACE.

La fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air humide saturé par rapport à l'eau, à la pression p et à la température T , est la fraction x_{vw} de la vapeur d'eau d'un échantillon d'air humide, à la même pression p et à la même température T , en équilibre stable en présence d'une surface plane d'eau contenant la quantité d'air dissous correspondant à l'équilibre. On désignera de

même par x_{vi} la fraction molaire saturant par rapport à une surface plane de glace contenant la quantité d'air dissous correspondant à l'équilibre.

$$x_{vw} = \frac{r_w}{\frac{M_v}{M_a} + r_w} = \frac{r_w}{0,62198 + r_w} \quad x_{vi} = \frac{r_i}{\frac{M_v}{M_a} + r_i} = \frac{r_i}{0,62198 + r_i}$$

Il faut noter que ces équations ont un caractère général et ne sous entendent aucune hypothèse concernant le suivi de l'équation des gaz parfaits par l'air humide considérée.

2.12 LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE DE L'AIR HUMIDE

En fait l'air humide ne se comporte pas exactement comme un gaz parfait et le produit $x_v \times p$ n'est pas égal à la pression de vapeur e .

On introduit donc la pression de vapeur saturante e_w' de l'air humide par rapport à l'eau et la pression de vapeur saturante e_i' de l'air humide par rapport à la glace.

La pression de vapeur saturante relativement à l'eau liquide e_w' de l'air humide à une pression p et à une température T est définie par :

$$e_w' = x_{vw} \times p = \frac{r_w}{0,62198 + r_w} \times p$$

De même, la pression de vapeur saturante relativement à la glace e_i' de l'air humide à une pression p et à une température T est définie par :

$$e_i' = x_{vi} \cdot p = \frac{r_i}{0,62198 + r_i} \times p$$

2.13 LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE EN PHASE PURE

La pression de vapeur saturante e_w de la vapeur d'eau pure par rapport à l'eau liquide est la pression de la vapeur dans un état d'équilibre indifférent avec une surface plane d'eau pure à la même température et à la même pression.

e_w est une fonction de la température seule : $e_w = e_w(T)$

De même, la pression de vapeur saturante e_i de la vapeur d'eau pure par rapport à la glace est la pression de la vapeur dans un état d'équilibre indifférent avec une surface plane de glace à la même température et à la même pression.

e_i est une fonction de la température seule : $e_i = e_i(T)$

On trouvera en annexe B et C les tables de pression de vapeur saturante dans la phase pure respectivement par rapport à l'eau liquide et par rapport à la glace.

Ces tables ont été calculées à l'aide des formules de Sonntag suivantes :

- Pression de vapeur en phase pure au dessus d'une surface plane d'eau :

$$\ln(e_w) = -6096,9385 \times T^{-1} + 16,635794 - 2,711193 \times 10^{-2} \times T + 1,673952 \times 10^{-5} \times T^2 + 2,433502 \ln(T).$$

$$173,15 \leq T \leq 373,15$$

- Pression de vapeur en phase pure au dessus d'une surface plane de glace :

$$\ln(e_i) = -6024,5282 \times T^{-1} + 24,7219 + 1,0613868 \times 10^{-2} \times T - 1,3198825 \times 10^{-5} \times T^2 - 0,49382577 \ln(T).$$

$$173,15 \leq T \leq 273,16$$

T est exprimée dans l'EIT 90, $e_w(T)$ et $e_i(T)$ sont exprimées en hPa.

2.14 RELATIONS ENTRE LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE EN PHASE PURE ET CELLE DE L'AIR HUMIDE

e_w' est une fonction de p et T, e_w est une fonction de T.

De même e_i' est une fonction de p et T, e_i est une fonction de T.

On appelle $f_w(p,T)$ le rapport $\frac{e_w'}{e_w}$ et $f_i(p,T)$ le rapport $\frac{e_i'}{e_i}$

$f_w(p,T)$ et $f_i(p,T)$ sont appelés "facteurs d'augmentation de la pression de vapeur saturante".
Ce sont des grandeurs sans dimension.

Dans les conditions normales de pression et au "voisinage" de 0° C les facteurs f_w et f_i sont peu différents de 1. Cet écart par rapport à l'unité traduit :

- l'effet des gaz dissous sur les propriétés de la phase condensée,
- l'effet de la pression sur les propriétés de la phase condensée,
- l'effet des forces intermoléculaires (gaz réels) sur les propriétés de l'air humide.

On trouvera en annexes D et E les tables permettant de déterminer f_w et f_i pour une pression p et une température T données.

Remarques : dans les limites météorologiques de la pression et de la température, les relations suivantes sont valables à 0,5 pour cent près ou moins :

$$e_w' = e_w$$

$$e_i' = e_i$$

En revanche, aux pressions élevées, la correction due au coefficient f devient vite importante (environ 4 % à 1 MPa et 10 % à 3 MPa).

2.15 TEMPERATURE THERMODYNAMIQUE DU POINT DE ROSEE(Td)

La température thermodynamique du point de rosée T_d de l'air humide à la pression p et avec le rapport de mélange r est la température à laquelle l'air humide, saturé par rapport à l'eau à la pression donnée, a un rapport de mélange de saturation r_w égal au rapport du mélange r donné.

$$r = r_w(p, T_d)$$

2.16 TEMPERATURE THERMODYNAMIQUE DU POINT DE GELEE (T_f)

La température thermodynamique du point de gelée T_f de l'air humide à la pression p et avec le rapport de mélange r est la température à laquelle l'air humide, saturée par rapport à la glace à la pression donnée, a un rapport de mélange de saturation r_i égal au rapport du mélange r donné.

$$r = r_i(p, T_f)$$

2.17 RELATIONS ENTRE LES TEMPERATURES THERMODYNAMIQUES DU POINT DE ROSEE OU DU POINT DE GELEE ET LE RAPPORT DE MELANGE

Les températures thermodynamiques du point de rosée et du point de gelée ainsi définies sont liées au rapport de mélange r et à la pression totale p par les équations suivantes :

$$e'_w(p, T_d) = \frac{r_w}{0,62198 + r_w} \times p = x_{vw} \times p$$

$$e'_w(p, T_d) = f_w(p, T_d) \times e_w(T_d)$$

de même

$$e'_i(p, T_f) = \frac{r_i}{0,62198 + r_i} \times p = x_{vi} \times p$$

$$e'_i(p, T_f) = f_i(p, T_f) \times e_i(T_f)$$

2.18 L'HUMIDITE RELATIVE U_w DE L'AIR HUMIDE PAR RAPPORT A L'EAU

L'humidité relative U_w de l'air humide par rapport à l'eau, à la pression p et à la température T , est le rapport, exprimé en pour cent, entre la fraction molaire x_v de la vapeur d'eau et la fraction molaire de la vapeur d'eau x_{vw} que l'air aurait s'il était saturé par rapport à l'eau, à la même pression p et à la même température T .

$$U_w = 100 \times \left(\frac{x_v}{x_{vw}} \right)_{p,T} = 100 \times \left(\frac{e'}{e'_w} \right)_{p,T} = 100 \times \left(\frac{e'}{f_w \times e_w} \right)_{p,T}$$

$$U_w = 100 \times \frac{f_w(p, T_d) \times e_w(T_d)}{f_w(p, T) \times e_w(T)}$$

U_w est lié au rapport de mélange r par la relation :

$$U_w = 100 \times \frac{r}{r_w} \times \frac{0,62198 + r_w}{0,62198 + r}$$

2.19 L'HUMIDITE RELATIVE U_i DE L'AIR HUMIDE PAR RAPPORT A LA GLACE

L'humidité relative U_i de l'air humide par rapport à la glace, à la pression p et à la température T , est le rapport, exprimé en pour cent, entre le titre molaire de la vapeur d'eau x_v et le titre molaire de la vapeur d'eau saturante x_{vi} que l'air aurait s'il était saturé par rapport à la glace, à la même pression p et à la même température T .

$$U_i = 100 \times \left(\frac{x_v}{x_{vi}} \right)_{p,T} = 100 \times \left(\frac{e'}{e'_i} \right)_{p,T} = 100 \times \left(\frac{e'}{f_i \times e_i} \right)_{p,T}$$

$$U_i = 100 \times \frac{f_i(p, T_f) \times e_i(T_f)}{f_i(p, T) \times e_i(T)}$$

En météorologie l'humidité relative aux températures inférieures à 0 °C doit être calculée relativement à l'eau liquide (la plupart des hygromètres, essentiellement sensibles à l'humidité relative, indiquent l'humidité relative par rapport à l'eau à toutes températures).

2.20 LA TEMPERATURE THERMODYNAMIQUE DU THERMOMETRE MOUILLE

La température thermodynamique du thermomètre mouillé de l'air humide à la pression p , à la température T et ayant le rapport de mélange r , est la température T_w qui est celle de l'air humide après avoir été porté adiabatiquement à saturation, à la pression p , par suite de l'évaporation dans l'air humide de l'eau liquide à la pression p et à la température T_w contenant la quantité d'air dissous correspondant à l'équilibre par rapport à l'air saturé à la même pression et à la même température.

Si l'air sec et la vapeur d'eau sont considérés comme des gaz parfaits dont les chaleurs massiques sont constantes, la température T_w est définie par l'équation :

$$T - T_w = \frac{[r_w(p, T_w) - r] \times L_v(T_w)}{c_p + r \times c_{pv}}$$

$L_v(T_w)$ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température T_w ,

$r_w(p, T_w)$ est le rapport de mélange de l'air saturé à la pression p et à la température T_w ,

c_p est la chaleur massique à pression constante de l'air sec,

c_{pv} est la chaleur massique à pression constante de la vapeur d'eau.

2.21 LA TEMPERATURE THERMODYNAMIQUE DU THERMOMETRE RECOUVERT DE GLACE

La température thermodynamique du thermomètre recouvert de glace de l'air humide à la pression p , à la température T et ayant le rapport de mélange r , est la température T_i à laquelle de la glace pure, à la pression p , doit être évaporée dans cet air, adiabatiquement et à la pression p , jusqu'à la saturation à la température T_i . Il s'agit de saturation par rapport à la glace.

Si l'air sec et la vapeur d'eau sont considérés comme des gaz parfaits dont les chaleurs massiques sont constantes, la température T_w est définie par l'équation :

$$T - T_i = \frac{[r_i(p, T_i) - r] \times L_s(T_i)}{c_p + r \times c_{pv}}$$

$r_i(p, T_i)$ est le rapport de mélange de l'air saturé à la pression p et à la température T_i

$L_s(T_i)$ est la chaleur latente de sublimation de la glace à la température T_i .

2.22 RELATIONS ENTRE LA TEMPERATURE DU THERMOMETRE MOUILLE ET LA TEMPERATURE DE ROSEE

D'après les formules précédentes la température du thermomètre mouillé et la température de rosée sont liées par une relation de la forme :

$$e' = e_w'(p, T_d) = e_w'(p, T_w) - A \times p \times (T - T_w)$$

e' est la pression partielle de vapeur d'eau,

$e_w'(p, T_w)$ est la pression de vapeur saturante à la température du thermomètre mouillé,

T est la température,

T_w est la température du thermomètre mouillé,

A est le coefficient psychrométrique.

3 REFERENCES

Les principales définitions citées dans ce document sont extraites des documents référencés ci-dessous :

- Organisation Météorologique Mondiale
Règlement technique - document de base n° 2 - OMM n° 49
Appendices A et B - Edition 1984
- Fundamental Concepts and Definitions Relating to Humidity
L. P. HARRISON
Humidity and Moisture - ISA
- Vapor Pressure Formulation for Water in Range 0°C to 100°C
A Revision - Arnold WEXLER
JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - A Physics and Chemistry Vol 80A - Nos 5 and 6 - September-December 1976
- Vapor Pressure Formulation for Ice
Arnold WEXLER
JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - A Physics and Chemistry - Vol 81A - No 1 - January-February 1977
- A correlation for the Second Interaction Virial Coefficients and Enhancement Factors for Moist Air
R.W. HYLAND
JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - A Physics and Chemistry - Vol 79A No 4 - July-August 1975
- Mesures des paramètres hygrométriques
Recommandation RM AERO 808 01
Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace

Les tables de référence sont extraites des documents suivants:

Norme NFX15 - 110
Mesure de l'humidité de l'air
Paramètres hygrométriques

Annexe A**COMPOSITION DE L'AIR SEC JUSQU'A ENVIRON 25 km
[Extrait de l'appendice A - Règlement technique OMM n° 49]**

<i>Gaz constituants</i>	<i>Fraction molaire * (pour cent)</i>
Azote	78,09
Oxygène	20,95
Argon	0,93
Anhydride carbonique	0,03
Néon	$1,8 \times 10^{-3}$
Hélium	$5,24 \times 10^{-4}$
Krypton	$1,0 \times 10^{-4}$
Hydrogène	$5,0 \times 10^{-5}$
Xénon	$8,0 \times 10^{-6}$
Ozone	$\times 10^{-6}$
Radon	$6,0 \times 10^{-18}$

* La fraction molaire x_i du composant i d'un mélange gazeux est défini par :

$$x_i = \frac{\frac{m_i}{M_i}}{\sum \frac{m_i}{M_i}}$$

où m_i est la masse du composant i dans un volume ou une masse donnée du mélange et M_i est son poids moléculaire, la somme indiquée se rapportant à tous les composants.

STAGE METROLOGIE

MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR

LES INSTRUMENTS DE MESURE

Octobre 2005

WORKSHOP METROLOGY

SOMMAIRE

1 MESURE DE LA TEMPERATURE DU POINT DE ROSEE OU DU POINT DE GELEE	2
1.1 HYGROMETRE A CONDENSATION	3
1.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	3
1.1.2 DOMAINE D'UTILISATION	3
1.1.3 DESCRIPTIF TECHNIQUE SUCCINCT	3
1.1.4 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES	3
1.1.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS	4
1.2 THERMOSONDE A SORPTION	4
1.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	4
1.2.2 REALISATION TECHNIQUE	4
1.2.3 DOMAINE D'UTILISATION	4
1.2.4 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES	4
1.2.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS	5
2 MESURE DE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR	5
2.1 HYGROMETRE MECANIQUE	5
2.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	5
2.1.2 DOMAINE D'UTILISATION	5
2.1.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS	5
2.2 HYGROMETRE A VARIATION D'IMPEDANCE	6
2.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	6
2.2.2 LES HYGROMETRES CAPACITIFS - DOMAINE D'UTILISATION	6
2.2.3 LES HYGROMETRES CAPACITIFS - CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES	6
2.2.4 LES HYGROMETRES CAPACITIFS - AVANTAGES ET INCONVENIENTS	6
3 AUTRES HYGROMETRES	7
3.1 HYGROMETRE GRAVIMETRIQUE	7
3.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	7
3.1.2 DOMAINE D'UTILISATION	7
3.2 PSYCHROMETRE	7
3.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	7
3.2.2 DOMAINE D'UTILISATION	7
3.2.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS	8
3.3 HYGROMETRE A ABSORPTION IR	8
3.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	8
3.4 HYGROMETRE LYMAN ALPHA	8
5 BIBLIOGRAPHIE	9

1 MESURE DE LA TEMPERATURE DU POINT DE ROSEE OU DU POINT DE GELEE

1.1 HYGROMETRE A CONDENSATION

1.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'air dont on veut mesurer le point de rosée ou de gelée circule dans la tête de mesure de l'hygromètre au voisinage d'une surface (en général un miroir) que l'on refroidit.

Lorsque le refroidissement est suffisant pour faire apparaître un condensât, la température mesurée à cet instant est soit celle du point de rosée, soit celle du point de gelée. Pour certains hygromètres, lorsque les conditions de saturation sont atteintes, on stabilise le refroidissement pour maintenir un état d'équilibre entre la vapeur d'eau contenue dans l'air humide et le dépôt de rosée ou de givre. Pour d'autres types d'hygromètres on réalise une mesure "au vol" de la température.

1.1.2 DOMAINE D'UTILISATION

Les hygromètres à condensation permettent de couvrir une gamme de températures de points de rosée ou de gelée de - 90 °C à + 100 °C.

1.1.3 DESCRIPTIF TECHNIQUE SUCCINCT

Les systèmes actuels sont constitués :

- D'un miroir refroidi par un module à effet Peltier,
- D'un dispositif optoélectronique qui reçoit un faisceau lumineux réfléchi par le miroir qui détecte l'apparition du condensât,
- Eventuellement d'un dispositif de régulation de la température du miroir,
- D'un thermomètre pour la mesure de la température du condensât (en général un thermomètre à résistance de platine),
- Eventuellement d'un dispositif optique grossissant pour définir la nature du condensât.

Ces instruments sont utilisés avec un certain nombre d'accessoires (pompe, débitmètres, boîtier thermostaté...)

Il existe des appareils spécifiques pour les mesures météorologiques.

Cf. annexe 1.

1.1.4 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

- Incertitude de mesure de la température de rosée ou de gelée, pour les instruments de laboratoire : de $\pm 0,1$ °C à $\pm 0,5$ °C,
- Refroidissement du miroir (Δt @ 25 °C) : 45 °C à 95 °C (modèle 4 étages),
- Fidélité : de l'ordre de $\pm 0,05$ °C,
- Température de fonctionnement : en général - 20 °C à + 60 °C.

WORKSHOP METROLOGY

1.1.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

- Mesure directe d'un paramètre hygrométrique fondamental,
- Compte tenu de son incertitude de mesure peut être utilisé comme instrument de référence,
- Relativement robuste,
- Coût relativement élevé,
- Temps de réponse relativement long,
- Sujet à la pollution (poussières, sel),
- Nécessite un certain nombre d'accessoires pour travailler par prélèvement.

1.2 THERMOSONDE A SORPTION

1.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

IL est basé sur les propriétés des solutions salines saturées, à savoir :

- A une température donnée, la pression de vapeur e' qui surmonte une solution saturée de sel hygroscopique est toujours inférieure à la pression de vapeur e au-dessus de l'eau pure.
- Une solution saturée de sel hygroscopique n'est conductrice que si la pression de vapeur e de l'atmosphère qui l'entourne est supérieure à celle de la solution e' (la conductivité électrique d'une solution saline est très nettement supérieure à la conductivité du sel à l'état cristallin). Le passage de l'égalité $e' = e$ se traduit par le passage de l'état conducteur à l'état non conducteur.

1.2.2 REALISATION TECHNIQUE

Le capteur comprend un thermomètre à résistance de platine entouré d'une jupe en laine de verre qui sert de support à la solution saline saturée (en général une solution de chlorure de lithium). Deux électrodes métalliques, constituant le circuit de chauffage, sont enroulées sur la gaine en laine de verre.

Le fonctionnement consiste à provoquer l'évaporation de l'eau par effet joule. La conductivité électrique de la solution décroît avec la tenue en eau, théoriquement jusqu'à la cristallisation du sel qui intervient lors du passage $e' = e$. L'échauffement diminue alors, la solution se réhydrate et tend de nouveau à s'échauffer.

Il se crée un état d'équilibre entre les trois phases (sel cristallisé, solution saline saturée, vapeur d'eau de l'air ambiant) et la température mesurée à cet instant par le thermomètre à résistance de platine est fonction de la température de rosée.

Cf. annexe 2.

1.2.3 DOMAINE D'UTILISATION

Pour les applications météorologiques -20 °C à + 50 °C.

1.2.4 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

- Incertitude de mesure de l'ordre de $\pm 0,5$ °C à $\pm 1,5$ °C,

WORKSHOP METROLOGY

- Temps de réponse de l'ordre de plusieurs minute (utilisation d'un filtre en acétate de cellulose perméable à la vapeur d'eau),
- Fidélité de l'ordre de $\pm 0,2$ °C à $\pm 0,4$ °C.

1.2.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

- Coût peu élevé,
- Bonne interchangeabilité du capteur,
- Nombreux risques de détériorations (alimentation électrique permanente du capteur),
- Régénération périodique fréquente,
- Erreur systématique liée à la vitesse d'écoulement du mélange gazeux,
- Influence de la température ambiante sur la valeur de la température d'équilibre.

2 MESURE DE L'HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR

2.1 HYGROMETRE MECANIQUE

2.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère a pour propriétés de modifier les propriétés mécaniques de certaines substances organiques ou synthétiques. Ainsi la longueur d'une fibre naturelle (cheveu, péritoine de porc) suit une relation non linéaire avec l'humidité relative du milieu ambiant.

Une extrémité de l'élément sensible d'un hygromètre mécanique est maintenue fixe, l'autre extrémité est reliée à un système destiné à amplifier la variation de longueur.

Il existe des hygromètres mécaniques indicateur ou enregistreur (hygrographe).

Cf. annexe 3.

2.1.2 DOMAINE D'UTILISATION

Il permet de mesurer des humidités relatives de 20 % hr à 100 % hr pour des températures ambiantes comprises entre - 10 °C et + 40 °C.

Pour les hygrographes, on utilise soit un enregistrement quotidien soit un enregistrement hebdomadaire.

2.1.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

- Peu onéreux,
- Donne une bonne idée de la tendance.
- Peu précis,
- Temps de réponse relativement long,
- Soumis au dérèglement lors des transports,
- Difficile à étalonner.

2.2 HYGROMETRE A VARIATION D'IMPEDANCE

2.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Certaines substances hygroscopiques qui constituent l'élément sensible de ces hygromètres ont la propriété de se mettre en équilibre hygrométrique avec le milieu environnant. Leur teneur en eau influe sur les caractéristiques électriques (capacité ou résistivité) de l'élément sensible.

Un conditionneur transforme la grandeur électrique en un signal représentatif de l'humidité relative.

Compte tenu du principe de fonctionnement, il est nécessaire de déterminer pour chaque capteur la caractéristique de transfert entre la capacité (ou la résistivité) et l'humidité relative mesurée.

Il existe des hygromètres résistifs et des hygromètres capacitifs.

Les capteurs capacitifs sont de meilleure qualité métrologique que les capteurs résistifs.

2.2.2 LES HYGROMETRES CAPACITIFS - DOMAINE D'UTILISATION

La plage de mesure couvre tout ou une partie du domaine (selon la température) de 5 % hr à 95 % hr voire 100 % hr pour des températures comprises entre -40 °C et + 50 °C.

Ces types de capteurs sont limités par le pouvoir d'absorption de la substance utilisée. Dans la pratique la limite d'utilisation correspond à un rapport de mélange compris, selon les modèles, entre 0,1 et 1,4.

2.2.3 LES HYGROMETRES CAPACITIFS - CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES

- Incertitude de mesure de l'ordre de ± 2 % hr (à température constante) à ± 5 % hr. En général ce type de capteur est sensible à la température, une correction est appliquée ou un système de compensation automatique est introduit au niveau de l'électronique de mesure,
- Temps de réponse de l'ordre d'une dizaine de secondes (en peu plus long si l'on utilise un filtre de protection),
- Dérive à long terme de l'ordre de 1 % hr à 2 % hr par an.

2.2.4 LES HYGROMETRES CAPACITIFS - AVANTAGES ET INCONVENIENTS

- Appareil discret,
- Indique directement l'hygrométrie relative,
- Faible coût de l'hygromètre et de l'élément sensible,
- Peut être portatif,
- Certains appareils dérivent au-delà de 90 % hr,
- Il est nécessaire de prendre quelques précautions pour le stockage :
 - Utilisation de produits dessiccants,

WORKSHOP METROLOGY

- Après stockage en atmosphère sèche ($U < 40 \text{ \% hr}$) certains appareils nécessitent une régénération dans une ambiance humide (au-dessus d'une surface d'eau par exemple),
- Sensibilité à certains polluants.

3 AUTRES HYGROMETRES

3.1 HYGROMETRE GRAVIMETRIQUE

3.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'eau contenue dans un échantillon d'air humide est piégée par un produit dessicant ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ et P_2O_5) et l'on réalise sa pesée. La masse d'air sec est déterminée par les mesures de la pression, de la température de l'air et du volume du cylindre le contenant.

C'est une mesure de référence permettant d'obtenir les incertitudes de mesure minimales.

Cf. annexe 5.

3.1.2 DOMAINE D'UTILISATION

Il existe par le monde quelques systèmes utilisant ce principe.

AU NIST, il permet de réaliser des mesures dans le domaine de points de rosée et de gelée de $- 80 \text{ °C}$ à $+ 80 \text{ °C}$. Dans le domaine de $- 30 \text{ °C}$ à $+ 50 \text{ °C}$ l'incertitude de mesure est inférieure à $\pm 0.03 \text{ °C}$.

Ce matériel est réservé aux laboratoires de métrologie de très haut niveau.

3.2 PSYCHROMETRE

3.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe des psychromètres est basé sur la relation thermodynamique reliant la température sèche et la température humide.

Il est constitué de deux thermomètres placés à proximité dans les mêmes conditions ambiantes, l'un des thermomètres est entouré d'un manchon humidifié.

Soumis à ventilation l'évaporation de l'eau provoque l'abaissement de la température du thermomètre mouillé.

3.2.2 DOMAINE D'UTILISATION

Le domaine d'utilisation des psychromètres s'étend de 0 °C à $+ 60 \text{ °C}$ pour les modèles courants en météorologie.

L'incertitude de mesure sur la température humide est d'environ $\pm 0,2 \text{ °C}$ à $\pm 1 \text{ °C}$.

Il faudrait utiliser exclusivement des hygromètres de type Assmann (ventilation mécanique ou électrique) ou des psychromètres fronde.

WORKSHOP METROLOGY

3.2.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

- Simplicité d'utilisation (mais il faut prendre certaines précautions),
- Fidélité dans le temps,
- Une grande plage d'utilisation (mais attention aux mesures à faible humidité),
- Nécessité d'un étalonnage de l'appareil (étalonnage des thermomètres mais également détermination de la correction permettant de déterminer la pression de vapeur d'eau de l'air humide considéré),
- Entretien du matériel souvent négligé,
- Dégradation de l'incertitude si manque de précautions lors des mesures.

3.3 *HYGROMETRE A ABSORPTION IR*

3.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Absorption du rayonnement infrarouge par les molécules d'eau dans le domaine de 1,4 à 1,9 μm .

Il existe différents modèles (type COSMA, à corrélation par filtre gazeux, mono-faisceau à deux longueurs d'onde, etc.)

Dans certains appareils le faisceau émis passe alternativement dans une cellule de mesure et une cellule de référence. Les deux signaux sont comparés.

Les étendues de mesures sont variables allant de la détection de traces de vapeur d'eau à 0 % hr à 90 % hr.

Appareils destinés en général au laboratoire.

3.4 *HYGROMETRE LYMAN ALPHA*

Absorption du rayonnement ultraviolet (121.6 nm) par les molécules de vapeur d'eau.

Le capteur se compose d'une lampe (lampe hydrogène à décharge) et d'un détecteur UV.

Destiné à des mesures de variations d'humidité, son temps de réponse est d'environ quelques millisecondes.

Pour les mesures absolues il doit être étalonné par rapport à un appareil de référence.

WORKSHOP METROLOGY

5 BIBLIOGRAPHIE

- MESURE DES PARAMETRES HYGROMETRIQUES
Recommandation RM. Aéro 808 01 (1988)
BUREAU DE NORMALISATION DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE
- NORME NFX 15 - 111
MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR
GENERALITES SUR LES INSTRUMENTS DE MESURE
GUIDE DE CHOIX
AFNOR 1993
- NORME NFX 15 - 112
MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR
HYGROMETRES A CONDENSATION
AFNOR
- NORME NFX 15 - 113
MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR
HYGROMETRES A VARIATION D'IMPEDANCE
AFNOR
- GUIDE DES INSTRUMENTS ET DES METHODES D'OBSERVATION
METEOROLOGIQUES
SECRETARIAT DE L'ORGANISATION METEOROLOGIQUE MONDIALE
OMM N°8 - Cinquième édition (1990)
GENEVE -SUISSE
- CIAME
ESSAIS D'EVALUATION DES HYGROMETRES
METHODES ET PROCEDURES
LA DOCUMENTATION FRANCAISE - PARIS 1980

TRAINING MATERIAL ON METROLOGY AND CALIBRATION

STAGE METROLOGIE

1. Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie
2. Métrologie et statistiques (*en anglais seulement*)
3. Guide théorique à l'estimation des incertitudes de mesure
4. Métrologie des températures
5. Mesure de l'humidité de l'air
- 6. Instruments de mesure de la pression**
7. Infrastructure et instruments d'un laboratoire d'étalonnage : exemple du Laboratoire de Métrologie de Météo-France

STAGE METROLOGIE

INSTRUMENTS DE MESURE DE LA PRESSION

OCTOBRE 2005

1 RAPPELS

La pression est une grandeur dérivée du système international d'unités.

Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface :

$$P = \frac{F}{S}$$

Unité de pression : **le pascal (Symbole Pa)** - correspond à une force de 1 newton appliquée sur une surface de 1 m².

Cf. tableau de correspondance des unités de pression.

Cf. représentation schématique des différents types de pression.

2 LES SYSTEMES FONDAMENTAUX DE MESURE DE LA PRESSION

ILS SONT BASES DIRECTEMENT SUR DEUX LOIS DE LA PHYSIQUE :

- **les colonnes de liquide** dont l'élément sensible est une colonne fluide qui équilibre la différence entre la pression de référence et la pression à mesurer suivant la loi :

$$p = \rho \times g \times h$$

- **les balances manométriques** dont l'élément sensible est un piston vertical de surface S soumis à sa base à la pression à mesurer et à son extrémité supérieure à la pression de référence.
L'expression de la pression mesurée découle directement de la définition de la pression :

$$P = \frac{F}{S}$$

La force F est la force gravitationnelle exercée par des masses sur la tête du piston.

2.1 LES MANOMETRES A COLONNE DE LIQUIDE

2.1.1 PRINCIPE

La pression p à mesurer est équilibrée par une colonne de liquide de hauteur h . Si la masse volumique est notée ρ la pression s'exprime par l'expression simple :

$$p = \rho \times g \times h$$

Le liquide utilisé est en général le mercure : $\rho(0\text{ °C}, 101325\text{ Pa}) = 1,359508 \cdot 10^4\text{ kg.m}^{-3}$.

Les deux principaux types de manomètres à colonne sont :

- le tube en U,
- le baromètre à mercure.

Pour les manomètres à colonne plus performants le tube en U est remplacé par un système à deux cuves reliées par un flexible (la correction de capillarité est d'autant plus faible que le diamètre est plus grand).

2.1.2 FONCTIONNEMENT

La pression est directement proportionnelle à la masse volumique du liquide utilisé.

La mesure de h nécessite de réaliser à la fois la détection des deux ménisques et la mesure de la différence d'altitude.

Pour les colonnes courantes : détection visuelle, mesure à l'aide d'une règle graduée.

Pour les colonnes plus performantes : détection effectuée par une méthode capacitive, mesure par interférométrie laser.

2.1.3 EXACTITUDE DES MANOMETRES A COLONNE

- Pour les colonnes de type industriel (pour une étendue de mesure de 20 à 1000 hPa) :
fourchette de 0,02 à 0,3 hPa

(incertitude de la pression de référence du CEV (manobaromètre Schwien)) :

$$\pm (2\text{ Pa} + 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ de la pression affichée})$$

- Pour les appareils plus élaborés de type référence nationale :
incertitude voisine de $5 \cdot 10^{-6} \times P$.

2.2 LES BALANCES MANOMETRIQUES

2.2.1 PRINCIPE

Deux forces principales apparaissent dans le système :

- la force verticale F1 dirigée vers le haut créée par p qui s'applique sur la surface Se :

$$F_1 = p \times Se$$

Se : section effective de l'ensemble piston-cylindre.

- La force verticale dirigée vers le bas F2 engendrée par la masse m des disques placés sur la tête du piston et soumis à l'accélération de la pesanteur :

$$F_2 = m_a \times g$$

g : accélération de la pesanteur au lieu d'utilisation de la balance.

m_a : masse apparente du disque au moment de la mesure.

$$m_a = m \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)$$

La mesure de la pression p revient à équilibrer les deux forces F1 et F2 :

$$p = \frac{m \times g}{Se} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right)$$

2.2.2 FONCTIONNEMENT DES BALANCES MANOMETRIQUES

Toutes les forces parasites internes ou externes au système doivent être éliminées ou minimisées :

- utilisation de matériaux de plus en plus durs (carbure de tungstène), jeux inférieurs au micromètre, régularité des formes excellente,
- mise en rotation du piston sans créer de forces verticales parasites,
- dispositif de détection d'altitude du piston sans créer de forces parasites.

2.2.3 EXACTITUDE DES BALANCES

Pour les balances industrielles entre quelques $\pm 10^{-4} \times P$ et $\pm 5 \cdot 10^{-5} \times P$. (Voire $\pm 2 \cdot 10^{-5} \times P$)

3 LES SYSTEMES DERIVES

3.1 LES SYSTEMES DERIVES DES SYSTEMES FONDAMENTAUX

3.1.1 MANOMETRE NUMERIQUE A PISTON

L'ensemble piston-cylindre d'une balance manométrique est monté sur un dynamomètre électronique à sortie numérique.

Le dynamomètre numérique permet d'équilibrer la masse du piston. Il peut être ajusté en permanence sur le lieu d'utilisation à l'aide d'un jeu de masses.

3.2 LES APPAREILS A DEFORMATION

3.2.1 PRINCIPE DE LA MESURE

La déformation d'un corps soumis à une pression est détectée, amplifiée mécaniquement et mesurée directement.

Les manomètres à déformation sont constitués d'un élément sensible déformable et d'un dispositif de détection et de mesure de la déformation.

3.2.2 ELEMENTS SENSIBLES

3.2.2.1 MEMBRANES

La pression à mesurer est envoyée dans un volume dont une des parois est constituée par une membrane élastique. La déformation dont on mesure le déplacement est fonction de la pression à laquelle est soumis le volume.

La membrane élastique, constituée par un disque métallique ondulé, est un élément de faible inertie, peu sensible aux vibrations mais susceptible aux variations de température.

Applications : baromètre EFFA : membrane au béryllium ou en Inconel X750, capteur miniature silicium.

3.2.2.2 CAPSULE BAROMETRIQUES

Deux membranes accolées puis soudées par leur bord extérieur forment une capsule. La capsule est susceptible aux chocs et aux vibrations.

Applications : baromètres Vaisala PA11, AIR, NAUDET.

3.2.2.3 SOUFFLET

Le soufflet se présente comme un tube de tôle ondulée, d'une seule pièce, muni de deux extrémités rigides.

Les soufflets se déforment axialement sous l'action de la pression à peu près linéairement.

La flèche est proportionnelle au carré du diamètre extérieur et au nombre d'ondulations. Elle est inversement proportionnelle au module d'élasticité et à e^3 (e épaisseur de la paroi).

Certains appareils travaillent en extension en appliquant la pression à l'intérieur du soufflet.

STAGE METROLOGIE

Application : capteur de pression type 51 Sextant Avionique.

3.2.2.4 TUBE DE BOURDON

Le tube de Bourdon est formé par un tube cintré, de section elliptique, dont le grand axe est parallèle à l'axe de cintrage.

Deux types de tubes sont utilisés :

le tube torique cintré,

le tube hélicoïdal enroulé sur plusieurs tours.

Le tube de Bourdon existe en plusieurs matériaux tels que le bronze, l'acier inoxydable, le quartz...

La pression à mesurer est appliquée à l'une des extrémités du tube qui est fixe, l'autre extrémité fermée est libre. Sous l'influence d'une pression interne, la déformation de la section du tube engendre un déplacement de l'extrémité du tube restée libre.

Application : capteur de pression 6000 Ruska.

3.2.3 MESURE DE LA DEFORMATION

3.2.3.1 MECANIQUE

Un système mécanique (engrenage, biellette et aiguille) solidaire de l'élément sensible donne une indication directe fonction de la déformation de ce dernier sous l'effet de la pression à laquelle il est soumis. Ce système de détection équipe les baromètres d'usage courant au fonctionnement autonome.

Applications : baromètres anéroïdes, barographes.

3.2.3.2 POTENTIOMETRIQUE

Un système potentiométrique, solidaire de l'élément sensible, donne une indication électrique proportionnelle à la déformation de ce dernier sous l'effet de la pression à laquelle il est soumis (plus utilisé pour les capteurs météorologiques du fait de ses nombreux inconvénients).

3.2.3.3 PAR VARIATION DE CAPACITE

La déformation engendrée par la pression à mesurer se traduit par une variation de distance entre deux surfaces conductrices isolées, induisant une variation de capacité entre ces deux surfaces.

Cette capacité peut être mesurée par l'intermédiaire :

d'un système modulateur-démodulateur synchrone à fréquence relativement élevée,

d'un circuit oscillant utilisant la capacité de l'élément sensible comme partie du circuit RC.

Avantages : grande sensibilité, traitement des fréquences aisé.

Applications : baromètre Vaisala PA 11.

3.2.3.4 PAR VARIATION D'INDUCTANCE

STAGE METROLOGIE

contrainte appliquée. Les défauts de linéarité de tels systèmes sont négligeables.
Application : baromètre type 44 Crouzet

3.2.3.8 PAR SYSTEME OPTIQUE

La pression exerce une force sur un tube de Bourdon qui se déforme. Cette déformation engendre un déplacement qui est :

- soit transmis de façon optique par un faisceau lumineux réfléchi, au moyen d'un miroir solidaire du tube, sur une cellule photosensible,
- Soit transmis à un cache solidaire du tube de Bourdon et occultant partiellement un faisceau lumineux.

4 BIBLIOGRAPHIE

- La mesure des pressions statiques
J. C. Legras
Monographie du Bureau National de Métrologie
Editions Chiron - 1988
- Les capteurs de mesure
M. Desjardins
La Documentation Française - 1975
- Guide de choix des instruments de mesure de pression
Recommandation RM Aéro 802 01 - Janvier 1989
Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace
Technopolis 54 - 199 rue J. J. Rousseau
92138 Issy les Moulineaux CEDEX
- Guide des Instruments et des Méthodes d'Observation Météorologique (guide CIMO)
OMM n° 8 - 1990
Secrétariat de l'Organisation Météorologique Mondiale
Genève - Suisse
- Bulletin d'information du Bureau National de Métrologie
Spécial « Pressions » n° 28
22 rue Monge
75005 Paris
- Essais d'évaluation des capteurs de pression (2^{ème} édition)
Commission Industrie Administration pour la Mesure
Méthodes et procédures - octobre 1981
La Documentation Française
29 - 31 quai Voltaire
75340 Paris

TRAINING MATERIAL ON METROLOGY AND CALIBRATION

STAGE METROLOGIE

1. Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie
2. Métrologie et statistiques (*en anglais seulement*)
3. Guide théorique à l'estimation des incertitudes de mesure
4. Métrologie des températures
5. Mesure de l'humidité de l'air
6. Instruments de mesure de la pression
- 7. Infrastructure et instruments d'un laboratoire d'étalonnage :
exemple du Laboratoire de Métrologie de
Météo-France**

Infrastructure et instruments d'un laboratoire d'étalonnage :
exemple du Laboratoire de Métrologie de Météo France



1. Présentation générale du Laboratoire de Métrologie de Météo France.....	2
1.1. Contexte	2
1.2. Infrastructures pour les étalonnages en température	2
1.3. Infrastructures pour les étalonnages en pression.....	2
1.4. Infrastructures pour les étalonnages en humidité.....	3
1.4.1. Etalonnage à l'aide des solutions salines	3
1.4.2. Etalonnage à l'aide du banc générateur d'air humide	3
2. Démarche qualité : accréditation, certification	4
2.1. Définitions	4
2.2. Accréditation ([2]).....	4
2.2.1. Définition générale et objectifs	4
2.2.2. Prescriptions liées à l'accréditation.....	5
2.2.3. Précisions autour des méthodes.....	5
2.2.4. Précisions autour de l'équipement	5
2.2.5. Précisions autour des rapports sur les résultats	6
2.3. Certification ([1])	6
3. Organisation de la métrologie à Météo France.....	7
3.1. Organisation générale de Météo France.....	7
3.2. Métrologie selon la DSO.....	8

1. Présentation générale du Laboratoire de Métrologie de Météo France

1.1. Contexte

Le laboratoire de métrologie est considéré comme l'expert de Météo-France en matière de références instrumentales de laboratoire en pression, température et humidité. Il définit les méthodes d'étalonnage dans ces domaines.

Division de la Direction des Systèmes d'Observation, il est composé de 11 personnes, dont 9 s'occupent plus particulièrement des étalonnages. Le laboratoire dispose en plus de bureaux pour le personnel et de 2 salles à conditions ambiantes contrôlées pour ses étalonnages.

1.2. Infrastructures pour les étalonnages en température

Le laboratoire dispose pour étalonner les thermomètres à résistances de 2 bains à brassage, 2 étalons, l'un de référence (Pt25) et l'autre de travail (Pt100), d'une baie d'acquisition avec pont de mesure, PC... Les étalonnages peuvent se faire sur la gamme -20 à 40 °C (en standard) et de -50 à 50 °C.



Fig.1 : Bains d'étalonnage en température

1.3. Infrastructures pour les étalonnages en pression

Le laboratoire dispose de plusieurs étalons, 1 de référence et plusieurs de travail, d'un générateur type PPC 1, d'une baie d'acquisition et d'une enceinte thermostatique pour des essais en température pour des étalonnages dans la gamme de 500 à 1060 hPa.



Fig.2 : Système d'étalonnage en laboratoire pour la pression

Le laboratoire met également à disposition un système d'étalonnage sur site en pression composé d'un générateur portable avec étalon de transfert interne ou externe. Ce système fonctionne avec une acquisition sous PC.



Fig.3 : Système d'étalonnage sur site en pression

Cet équipement, travaillant sur une gamme de 800 à 1060 hPa est utilisé à Météo France pour des contrôles intermédiaires de baromètres.

1.4. Infrastructures pour les étalonnages en humidité

Le laboratoire met en œuvre 2 types de méthodes pour les étalonnages en humidité, l'un à température ambiante à l'aide de solutions salines, l'autre à l'aide d'un banc générateur d'humidité relative.

1.4.1. Etalonnage à l'aide des solutions salines

Il s'agit de 5 solutions salines saturées permettant de créer 5 paliers d'humidité relative, selon les propriétés chimiques de ces solutions (voir document sur l'humidité). Le laboratoire a 2 bacs avec les 5 paliers d'humidité, 4 hygromètres de référence et un multimètre pour acquérir les données d'hygromètres à variation d'impédance ou affichage.



Fig.4 : Système d'étalonnage en humidité solutions salines

1.4.2. Etalonnage à l'aide du banc générateur d'air humide

Il s'agit d'un banc générateur type à 2 températures. La création du palier d'humidité relative se fait dans une chambre d'essai placée dans une enceinte en faisant varier la température sèche, le banc créant de l'air saturé qui circule grâce à une pompe.



Fig.5 : Système d'étalonnage en humidité avec un banc générateur d'humidité

2. Démarche qualité : accréditation, certification

Météo France est en démarche qualité avec pour but de certifier l'ensemble de ses activités à l'exception de celles de la recherche selon la norme ISO 9001.

Les activités du laboratoire sont donc toutes encadrées par un système qualité, excepté les formations dispensées au sein de nos locaux, l'organisation des missions de contrôle de baromètres régionaux et l'expertise technique faite dans le cadre des missions institutionnelles de Météo-France. Le raccordement et la traçabilité des étalons de référence de notre laboratoire sont assurés pour satisfaire aux exigences de l'accréditation NF EN 17025.

2.1. Définitions

La notion de qualité intervient dès qu'il y a échange, selon la norme ISO 9000 version 2000 : *aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences.*

Les objectifs sont de :

- gagner la confiance des clients : les consommateurs, des industriels, l'Etat ;
- favoriser la collaboration entre laboratoires et autres organismes dans le but de contribuer à l'échange d'informations ;
- disposer d'un outil de management performant.

D'après l'ISO 9000 version 2000 ([1]) :

Assurance de la qualité :

Partie du management de la qualité visant à donner confiance en ce que les exigences pour la qualité seront satisfaites

Management de la qualité :

Activités coordonnées permettant d'orienter et de contrôler un organisme en matière de qualité, ce qui inclut généralement l'établissement d'une politique et d'objectifs qualité, une planification, une maîtrise et un processus d'amélioration.

2.2. Accréditation ([2])

2.2.1. Définition générale et objectifs

La norme internationale ISO/CEI 17025 contient les exigences que doivent satisfaire les laboratoires d'essais et d'étalonnage s'ils entendent apporter la preuve qu'ils gèrent un système qualité, sont techniquement compétents et sont capables de produire des résultats techniquement valables, ce que ne garantit pas la certification ISO 9001 ou 9002.

L'acceptation des résultats d'essai d'un pays à l'autre se trouve alors facilitée si les laboratoires se conforment à la norme et s'ils obtiennent l'accréditation.

Une accréditation est une procédure par laquelle un organisme faisant autorité reconnaît formellement qu'un organisme ou un individu est compétent pour effectuer des tâches

spécifiques. En Europe, le système a été mis en place sous l'égide des pouvoirs publics dans le but de délivrer des jugements impartiaux. En France l'organisme accréditeur est le COFRAC.

Le laboratoire de métrologie de Météo France a développé un système qualité désormais accrédité pour les étalonnages en humidité, en température et en pression.

2.2.2. Prescriptions liées à l'accréditation

Les prescriptions se partagent en prescriptions relatives au management et prescriptions techniques.

Les prescriptions relatives au management concernent :

- l'organisation générale du laboratoire et son système qualité ainsi que l'entité dans laquelle il peut s'inscrire ;
- la maîtrise de la documentation et des enregistrements ;
- le traitement des demandes et réclamations, les services à la clientèle ;
- la sous-traitance ;
- les achats ;
- la maîtrise des dysfonctionnements et le mécanisme d'amélioration ;
- les audits internes ;
- les revues de direction.

Les prescriptions techniques traitent :

- du personnel, de sa qualification et du maintien de ses compétences ;
- des installations et conditions ambiantes ;
- des méthodes mises en oeuvre ;
- de l'équipement ;
- de la traçabilité ;
- de la manutention ;
- de la qualité des résultats rendus et de leur forme (rapports).

2.2.3. Précisions autour des méthodes

Il peut se révéler nécessaire de rédiger les méthodes d'étalonnage en précisant :

- le domaine d'application ;
- les paramètres à déterminer ;
- l'équipement utilisé ainsi que les étalons employés ;
- les conditions ambiantes requises ;
- la procédure, avec les marques d'identification, les manutentions, les méthodes d'acquisition/enregistrement des données ;
- les critères d'approbation ou refus ;
- les analyses des données ;
- l'incertitude associée ou la procédure employée pour l'estimer.

Les méthodes non-normalisées doivent être dans la mesure du possible validées (par le biais d'intercomparaisons par exemple).

2.2.4. Précisions autour de l'équipement

L'équipement utilisé doit être identifié et suivi au moyen d'enregistrements qui indiquent :

- identifiant ;
- constructeur ;
- emplacement actuel ;
- vérifications faites ;
- plan de maintenance ;
- réparations éventuelles.

Ceci constitue la fiche de vie d'un matériel.

2.2.5. Précisions autour des rapports sur les résultats

Les rapports sur les résultats fournis ou certificat d'étalonnage comporteront :

- un titre et un numéro d'identification ;
- nom et adresse du laboratoire ayant effectué l'essai ;
- nom et adresse du client ;
- identification de la méthode employée ;
- description de l'objet soumis à essai ;
- date d'exécution ;
- les résultats ;
- une validation avant diffusion ;
- conditions de l'étalonnage
- l'incertitude de mesure.

2.3. Certification ([1])

La norme ISO 9001 version 2000 spécifie les exigences relatives au système de management de la qualité lorsqu'un organisme :

- doit démontrer son aptitude à fournir régulièrement un produit conforme aux exigences des clients et aux exigences réglementaires applicables ;
- vise à accroître la satisfaction de ses clients par l'application efficace du système, y compris les processus pour l'amélioration continue du système et l'assurance de la conformité aux exigences des clients et aux exigences réglementaires applicables.

La certification peut être obtenue auprès d'organismes indépendants, eux-mêmes souvent accrédités. A la différence de l'accréditation, il ne s'agit pas d'organisme unique.

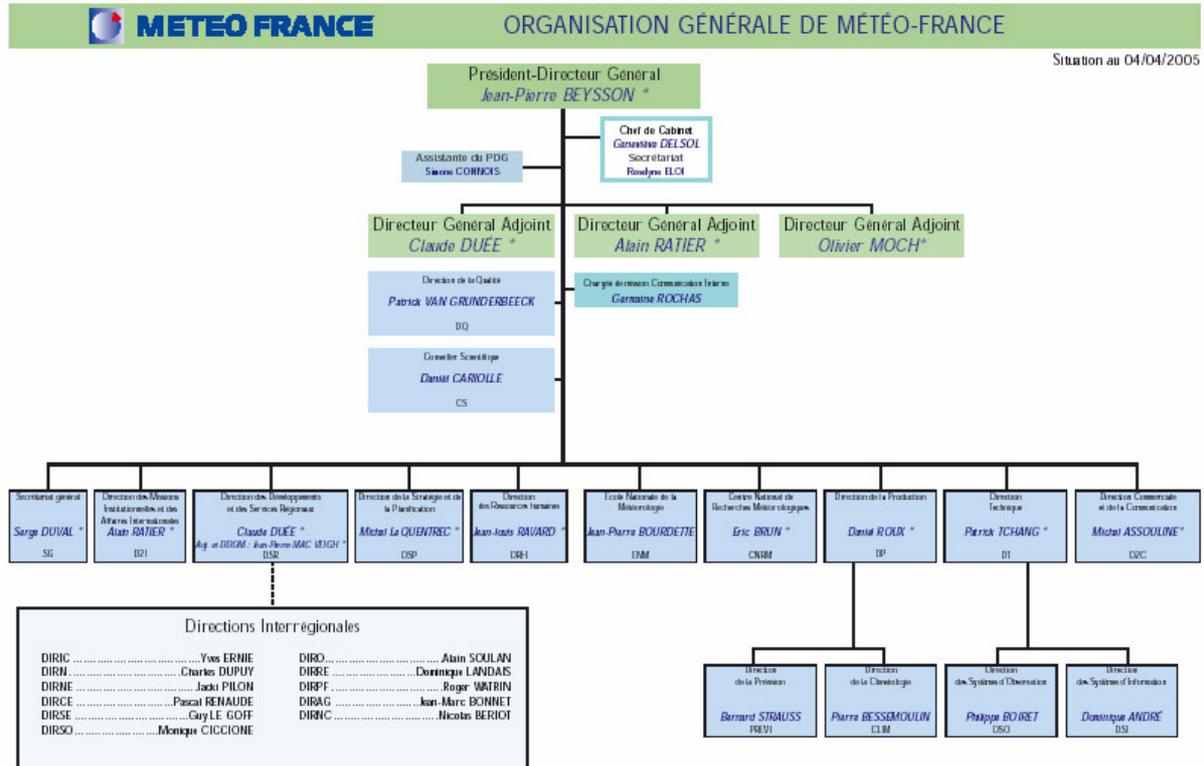
Les prescriptions de la norme concernent :

- l'établissement d'un système de management de la qualité ;
- les responsabilités de la direction ;
- le management des ressources humaines et matériels ;
- la réalisation du produit ;
- l'organisation de la mesure, analyse et amélioration du système.

3. Organisation de la métrologie à Météo France

3.1. Organisation générale de Météo France

Météo France est organisée selon l'organigramme général présenté, en directions thématiques.



* Membres du comité de direction générale
Fig. 6 : Organigramme général de Météo France

La Direction des Systèmes d'Observation, partie de la Direction Technique, anime la fonction Observation à Météo France, depuis la conception des systèmes d'observation jusqu'à la fourniture opérationnelle de l'information brute ou élaborée déposée dans les bases de données gérées par la Direction des Systèmes d'Information ([3])

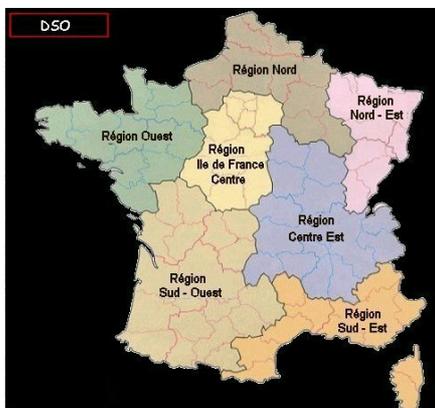


Fig. 7 : Découpage de la maintenance française

La DSO, pour mener à bien ses missions s'appuie sur un certain nombre de prestataires comme la DSI ou les Directions Interrégionales (DIR) (voir carte et DIR de la France métropolitaine).

Un tableau d'exigences croisées a été établi entre les DIR et la DSO afin de préciser les conditions et modalités des prestations, tableau régulièrement revu au cours de réunions organisées par la DSO avec les différents acteurs.

De même, un document d'exigences a été établi avec la DSI, suivi régulièrement par la Direction Technique qui propose et conduit la politique de l'établissement en matière d'observation, télécom et traitement de l'information.

3.2. Métrologie selon la DSO

La maîtrise de la métrologie est faite à la DSO au sein d'un processus métrologie conformément au fonctionnement selon un système certifié ISO 9001. Ce processus a pour objectifs :

- assurer la cohérence de la métrologie des équipements d'observation ;
- assurer la cohérence de la maîtrise des dispositifs de contrôle ;
- réaliser des étalonnages.

Pour cela, le processus MET a décrit pour chaque paramètre les périodicités de contrôle à respecter pour garantir la qualité de la mesure.

Exemples de périodicité pour les vérifications au laboratoire :

Hygromètres à variation d'impédance : de 12 à 15 mois

Baromètres : 24 à 30 mois plus contrôle intermédiaire tous les ans

Radiosondes : recette par échantillonnage, calage à chaque lâcher

Pluviomètres : contrôle tous les 6 à 8 mois

Anémomètres, Girouettes : contrôle tous les 12 à 15 mois

Ces contrôles sont soit effectués à la DSO ou directement en stations quand cela est possible.

Cette périodicité définie, si les contrôles nécessitent un passage au Laboratoire de Métrologie, le service Département de l'Observation de Surface est chargé de la rotation de ces capteurs : il fournit à l'avance un capteur de remplacement étalonné et procède au rapatriement de celui démonté. Cette gestion est faite grâce à un logiciel de maintenance assisté par ordinateur mais aussi grâce aux propres fichiers du service.

La DSO gère donc les stocks des systèmes d'observation de Météo France.



Fig. 7 : Schéma des échanges

BIBLIOGRAPHIE :

[1] NF EN ISO 9001, AFNOR, décembre 2000

[2] NF EN ISO 17025, AFNOR, mai 2000

[3] Manuel qualité de la DSO, DSO, version 3 du 25 janvier 2005