

9 octobre
2017

Audits énergétiques : quelle instrumentation et quelles méthodes de mesure employer ?

François VIAL – Benoit SAVANIER
CETIAT

SOMMAIRE

1. La mesure, partie intégrante de la démarche d'audit : le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure - BSA
2. Les principes de mesures et les conditions de déploiement de l'instrumentation - BSA
3. Métrologie légale et utilisation sur les sites industriels (usages possibles) – BSA/FVI
4. Approche méthodologique : démarche opérationnelle, utilisation des redondances et des données qualitatives - FVI

La mesure, partie intégrante de la démarche d'audit : le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure

Le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure - Rappels

Qu'est ce que la métrologie ?

Science de la mesure

Qu'est ce qu'un résultat de mesure ?

En pratique, la quantité d'information nécessaire pour documenter un résultat de mesure dépend de l'usage prévu... (extrait du JCGM 100 - GUM)

Poser un diagnostic à l'aide de mesures c'est donc apporter suffisamment d'information pour justifier les choix de l'auditeur

Etalonnage ? Vérification ?

Le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure - Rappels

- 2.39 (6.11)
- étalonnage, m
- *opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication.*
- *NOTE 1 Un étalonnage peut être exprimé sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en une correction additive ou multiplicative de l'indication avec une incertitude de mesure associée.*
- *NOTE 2 Il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage d'un système de mesure, souvent appelé improprement « auto-étalonnage », ni avec la vérification de l'étalonnage.*
- *NOTE 3 La seule première étape dans la définition est souvent perçue comme étant l'étalonnage.*

Le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure - Rappels

P101620/3

Préf (Pa)	Pi (Pa)	Cor(Pa)	Ecartype (Pa)	inc (Pa)
0	0	0	0	0,01
132,941	133,457	-0,516	0,029	0,06
266,917	267,877	-0,96	0,012	0,03
399,971	401,413	-1,442	0,018	0,044
533,068	534,893	-1,825	0,018	0,045
666,995	669,15	-2,155	0,029	0,066
799,976	802,393	-2,417	0,016	0,047
932,983	935,597	-2,614	0,019	0,055
1067,039	1069,78	-2,741	0,057	0,12
1199,98	1202,787	-2,807	0,009	0,05
1333,051	1335,87	-2,819	0,02	0,065
1333,026	1335,833	-2,807	0,009	0,054
1199,954	1202,767	-2,813	0,017	0,058
1067,085	1069,843	-2,758	0,029	0,072
932,996	935,617	-2,621	0,002	0,039
799,99	802,427	-2,437	0,01	0,04
667,109	669,283	-2,174	0,033	0,073
532,988	534,8	-1,812	0,02	0,049
399,986	401,42	-1,434	0,024	0,053
266,962	267,977	-1,015	0,036	0,074
133,044	133,507	-0,463	0,034	0,07
-0,003	0	-0,003	0,02	0,042

9 octobre 2017

Le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure - Rappels

- *vérification, f*
- *fourniture de preuves tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées*
- *EXEMPLE 1 Confirmation qu'un matériau de référence donné est bien, comme déclaré, homogène pour la valeur et la procédure de mesure concernées jusqu'à des prises de mesure de masse 10 mg.*
- *EXEMPLE 2 Confirmation que des propriétés relatives aux performances ou des exigences légales sont satisfaites par un système de mesure.*
- *EXEMPLE 3 Confirmation qu'une incertitude cible peut être atteinte.*
- *NOTE 1 S'il y a lieu, il convient de prendre en compte l'incertitude de mesure.*
- *NOTE 2 L'entité peut être, par exemple, un processus, une procédure de mesure, un matériau, un composé ou un système de mesure.*
- *NOTE 3 Les exigences spécifiées peuvent être, par exemple, les spécifications d'un fabricant.*
- *NOTE 4 La vérification en métrologie légale, comme définie dans le VIML[53], et plus généralement en évaluation de la conformité, comporte l'examen et le marquage et/ou la délivrance d'un certificat de vérification pour un système de mesure.*
- *NOTE 5 Il convient de ne pas confondre la vérification avec l'étalonnage. Toute vérification n'est pas une validation.*
- *NOTE 6 En chimie, la vérification de l'identité d'une entité, ou celle d'une activité, nécessite une description de la structure ou des propriétés de cette entité ou activité.*

Le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure - Rappels

- *Le résultat de l'étalonnage*
- *Un ou des critères d'acceptation (Tolérances) définis par l'utilisateur (VOUS !!) en fonction de son besoin de mesure*
- *Une règle de comparaison au critère*
 - *Exemple 1 : Critère d'acceptation (CA1)*
 - ☞ $E_j \leq CA1$
 - *Exemple 2 : Critère d'acceptation (CA2)*
 - ☞ $E_{j+/-U} \leq CA2$

- *Nota :*
 - *E_j : erreur de justesse*
 - *U incertitude élargie associée*

Le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure - Rappels

Le **but d'une mesure** est d'obtenir de l'information à propos d'une grandeur d'intérêt : Le mesurande. (Température, Concentration....)

Aucune mesure n'est exacte.

5M (Méthode, Milieu, Main d'œuvre, Matière, Moyens) & résolution de mesure suffisante = des résultats différents pour une même grandeur mesurée à chaque mesure répétée même dans des conditions apparemment identiques.

La moyenne et la dispersion des valeurs indiquées donnent une estimation de la valeur « vraie » mais ne sont pas forcément représentatifs de l'incertitude réelle. Exemple : mauvaise position du capteur – dynamique insuffisante – absence de raccordement

Le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure - Rappels

Un résultat de mesure en résumé c'est :

Un nombre

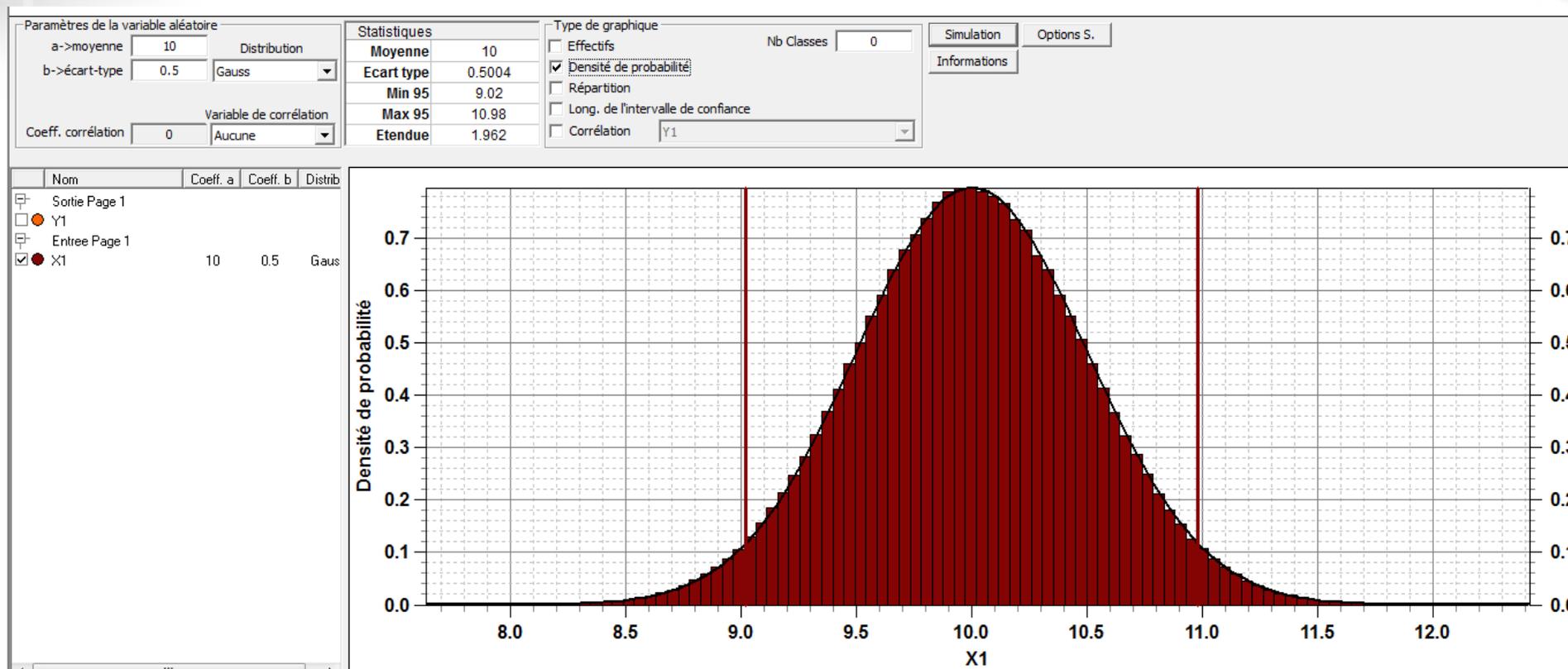
Une unité

Une incertitude associée au résultat de mesure (à deux chiffres significatifs)

Exemple : $P = 10,0 \pm 1,0$ bar ($k=2$) (voir illustration suivante)

$k=2$ veut dire que nous donnons l'incertitude à k écart-types en sous entendant que c'est une distribution gaussienne (normale)

Le juste nécessaire appliqué à l'expression du besoin de mesure - Rappels



En résumé

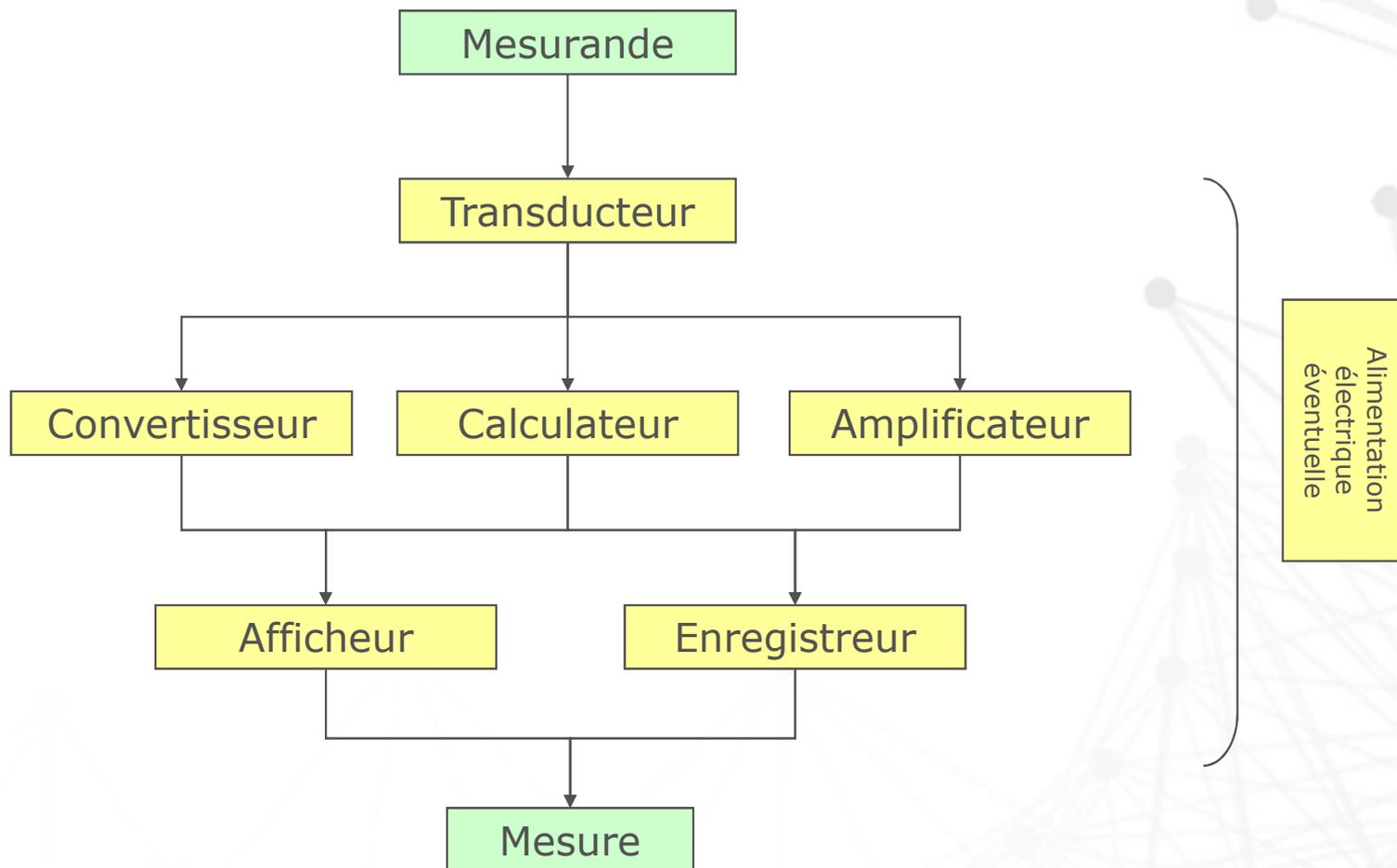
Le juste nécessaire demande :

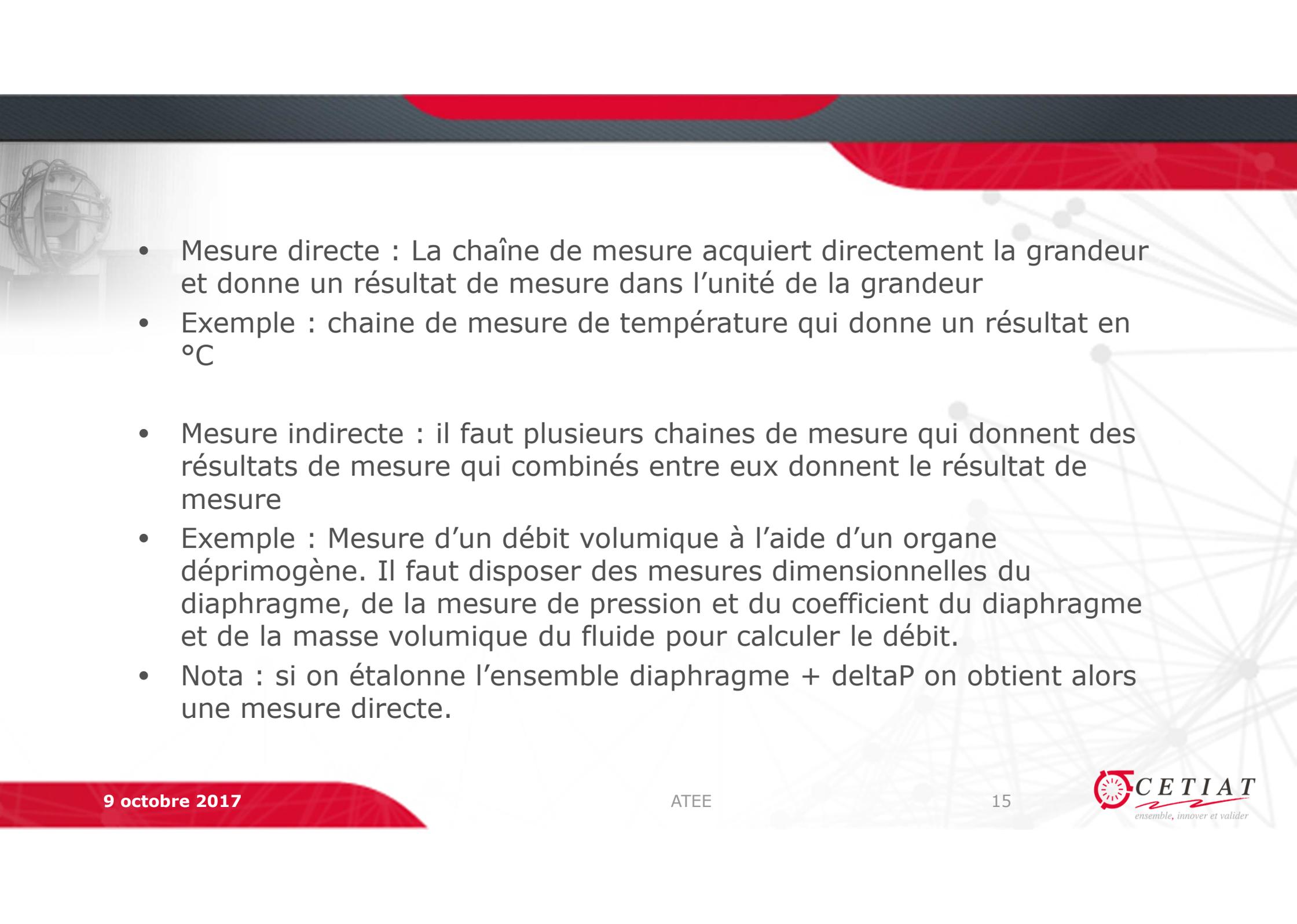
1. De savoir ce que l'on veut mesurer – Pourquoi et comment ?
2. D'avoir un objectif d'incertitudes :
0,01% / 0,1% / 1% / 10% / 100% d'incertitude relative ?
3. De choisir l'instrumentation en fonction des points précédents
Exemple : Multimètre à 2000 / 20.000 / 600.000 / 2.000.000 de points ?
4. D'avoir une idée des limitations des méthodes de mesure employées

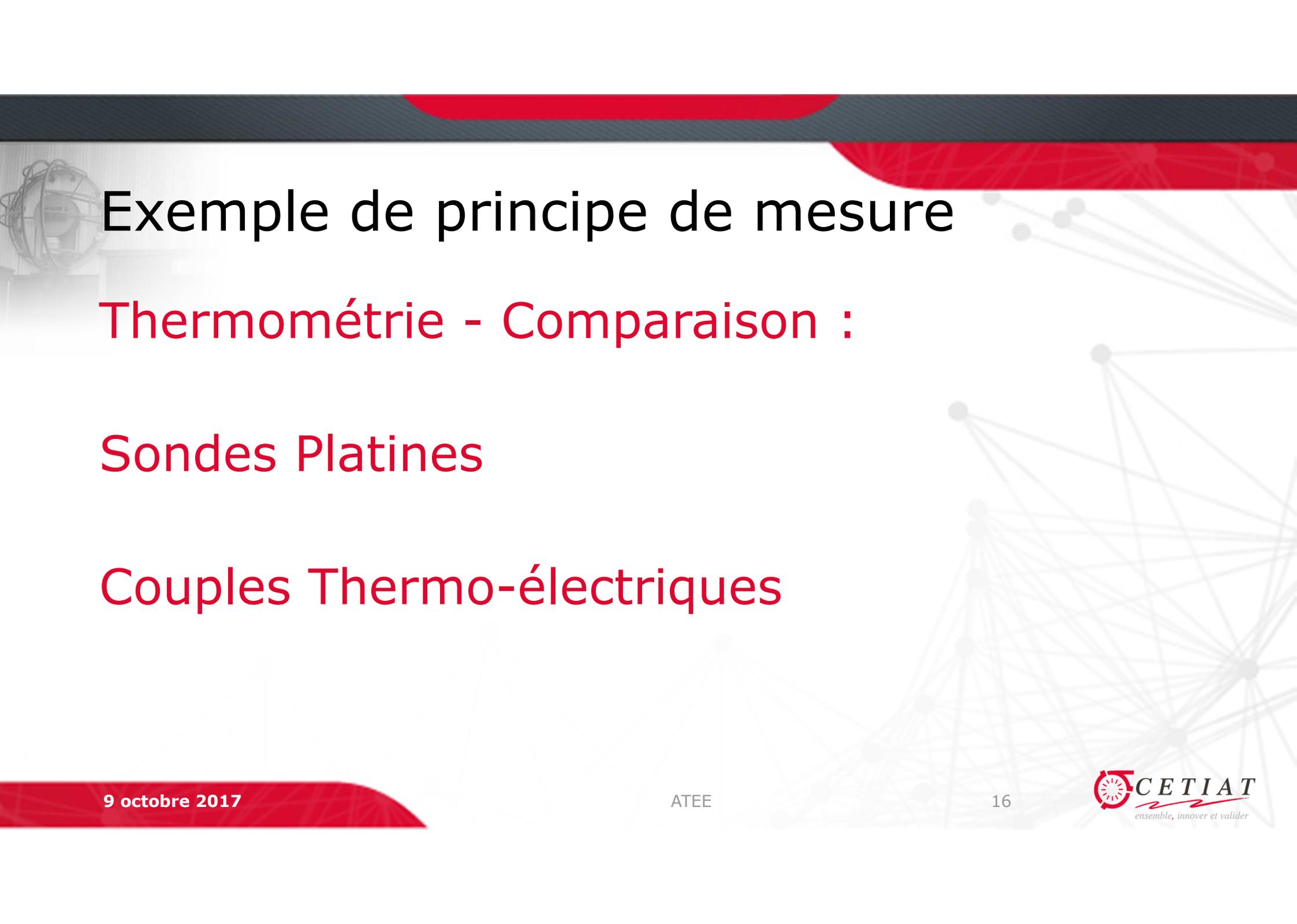
Les principes de mesures et les conditions de déploiement de l'instrumentation

Impact – Exemple Thermométrie

Constitution classique d'une chaîne de mesure



- 
- Mesure directe : La chaîne de mesure acquiert directement la grandeur et donne un résultat de mesure dans l'unité de la grandeur
 - Exemple : chaîne de mesure de température qui donne un résultat en °C
 - Mesure indirecte : il faut plusieurs chaînes de mesure qui donnent des résultats de mesure qui combinés entre eux donnent le résultat de mesure
 - Exemple : Mesure d'un débit volumique à l'aide d'un organe déprimogène. Il faut disposer des mesures dimensionnelles du diaphragme, de la mesure de pression et du coefficient du diaphragme et de la masse volumique du fluide pour calculer le débit.
 - Nota : si on étalonne l'ensemble diaphragme + deltaP on obtient alors une mesure directe.



Exemple de principe de mesure

Thermométrie - Comparaison :

Sondes Platines

Couples Thermo-électriques

Sondes Platines

Thermomètres à résistance de platine industriel: TRPI

Principes

- › Variation de résistance électrique d'un conducteur en fonction de la température.
- › La résistance électrique d'un conducteur électrique croît avec la température. Cette variation est parfaitement réversible.
- › On peut donc établir une relation $R=f(T)$ entre la résistance R et la température T et ainsi on détermine la température par des mesures de résistance
- › Condition de déploiement : courant de mesure, 2 fils ou 3 fils ou 4 fils, fuites thermiques et le lieu de déploiement vont impacter les résultats de mesures

Sondes Platines

Thermomètres à résistance de platine industriel: TRPI

- Les classes de tolérances (inter-changeabilité)

Classe de tolérance	Domaine valide de température °C		Valeurs de la tolérance ^a °C
	Résistances bobinées	Résistance à film	
AA	-50 à +250	0 à +150	$\pm (0.1 + 0.0017 t)$
A	-100 à +450	-30 à +300	$\pm (0.15 + 0.002 t)$
B	-196 à +600	-50 à +500	$\pm (0.3 + 0.005 t)$
C	-196 à +600	-50 à +600	$\pm (0.6 + 0.01 t)$

^a | t | = valeur absolue de température en °C sans considération de signe.

Couples Thermoélectriques

Effet Seebeck

Apparition d'une f.e.m. dans un circuit composé de 2 conducteurs différents lorsque les jonctions sont à des températures différentes

Effet Peltier

Dégagement ou absorption de chaleur, autre que l'effet joule, provoqué par le passage d'un courant à travers les jonctions de 2 conducteurs portés à la même température

Effet Thomson

Dégagement ou absorption de chaleur, autre que l'effet joule, provoqué par le passage d'un courant à travers un conducteur homogène dont la température n'est pas uniforme

Couples Thermoélectriques

Point très délicat car à part les tolérances d'interchangeabilité les conditions thermiques de déploiement des sondes de températures ont une influence majeure sur les spécifications. Valable pour les sondes platines également (fuites thermiques).

Hors effet de déploiement voici quelques spécifications (CEI 60584.1) :

Type	Classe 1	Classe 2	Classe 3
T	-40°C/125°C Tol. 0,5°C 125°C/350°C Tol. 0,004. T	-40°C/133°C Tol. 1,0°C 133°C/350°C Tol. 0,0075. T	-67°C/40°C Tol. 1,0°C -200°C/-67°C Tol. 0,015. T
J	-40°C/375°C Tol. 1,5°C 375°C/750°C Tol. 0,004. T	-40°C/333°C Tol. 2,5°C 333°C/750°C Tol. 0,0075. T	-
E	-40°C/375°C Tol. 1,5°C 375°C/800°C Tol. 0,004. T	-40°C/333°C Tol. 2,5°C 333°C/900°C Tol. 0,0075. T	-

Type	Classe 1	Classe 2	Classe 3
K	-40°C/375°C Tol. 1,5°C 375°C/1000°C Tol. 0,004. T	-40°C/333°C Tol. 2,5°C 333°C/1200°C Tol. 0,0075. T	-167°C/40°C Tol. 2,5°C -200°C/-167°C Tol. 0,015. T
S	0°C/1100°C Tol. 1,0°C 1100°C/1600°C Tol. 1+0,003.(T -1100)°C	0°C/600°C Tol. 1,5°C 600°C/1600°C Tol. 0,0025. T	-
R			
B		600°C/1700°C Tol. 0,0025. T	600°C/800°C Tol. 4,0°C 800°C/1700°C Tol. 0,005. T

Conditions de déploiement des couples Thermoélectriques

Maîtrise de la jonction Froide de référence peut être une source de difficulté dans les mesures réalisées par les couples thermo-électriques

Hétérogénéité des couples thermo-électriques

Théoriquement les conducteurs des couples thermo-électriques sont supposés uniformes

Les principales origines des défauts d'homogénéité sont: oxydation des fils, évaporation de certains constituants, pollution à haute température, écrouissages, ou encore, transformation en phase solide

Les défauts d'hétérogénéité s'expriment lorsqu'ils sont soumis à des gradients de température (déploiement de la sonde)

Métrologie légale et utilisation sur les sites industriels

9 octobre 2017

ATEE

22

Métrologie légale – utilisation en audit

Dans un monde parfait, l'idéal c'est de tout étalonner en fonction de l'usage (cf 17025/ISO 9001)

Les instruments de métrologie légale sont une alternative.

Les modèles sont déposés et les spécifications attendues connues et décrites dans les textes légaux.

Exemple : Compteur Puissance active

- *Arrêté du 01/08/2013*
- *Domaine d'application : le texte et les exigences s'appliquent aux compteurs d'énergie active qui mesurent l'énergie consommée dans un circuit.*
- *Ne s'applique pas aux transformateurs de mesure externes pouvant être associés, ni aux compteurs d'énergie réactive, ni aux systèmes de mesures d'énergie électrique embarqués à bord des engins circulant sur les réseaux ferrés.*
- *S'applique aux compteurs de classe A B C destinés aux usages domestique, commercial ou industriel léger, aux compteurs de classe D, destinés à un usage industriel lourd*

Exemple : Compteur Puissance active

Les compteurs en service respectent les **erreurs maximales tolérées** suivantes :

- pour les compteurs de classe A : $\pm 8,0 \%$;
- pour les compteurs de classe B : $\pm 4,5 \%$;
- pour les compteurs de classe C : $\pm 2,5 \%$;
- pour les compteurs de classe D : $\pm 1,0 \%$.

Ces erreurs maximales tolérées s'appliquent sur la plage de courant **$0,1 \times I_{ref}$ à I_{max}** , lorsque le facteur de puissance varie entre **0,5 (inductif) et 0,8 (capacitif)**, en passant par une valeur égale à 1. Pour les compteurs électromécaniques, sur la plage de courant s'étendant de $0,1 \times I_{ref}$ à $0,5 \times I_{ref}$, ces erreurs s'appliquent uniquement à un facteur de puissance égal à 1.

Les erreurs des compteurs sont déterminées avec des incertitudes de mesurage qui sont inférieures ou égales au **tiers** des erreurs maximales tolérées.

Exemple : Compteur Puissance active

Conditions de validité de la classe

- ❑ Tensions et Courants sinusoïdaux avec distorsion inférieure à 3% pour classe A et 2% pour B, C, D
- ❑ En polyphasé, triphasé direct et tensions et courants équilibrés. Les tensions simples ou composées ne diffèrent pas de la moyenne des tensions correspondantes de plus de 1%
- ❑ Pour les courants 1% Classe D et 2% pour les autres classes
- ❑ Déphasage entre le courant et la tension phase neutre correspondante ne diffèrent pas entre eux de plus de 2° quel que soit le déphasage (angle stable)

Conclusion

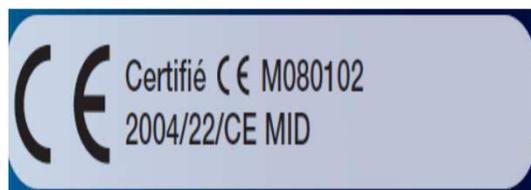
- *Des exigences qui vont au-delà d'une simple spécification métrologique, c'est tout une série d'essais qui intervient pour autoriser l'usage d'un modèle de compteur*
- *Applicable en janvier 2015 pour les classes D*
- *Quid des compteurs d'énergies non déposés ?*
- *Spécifications plus mauvaises que celles de la mesure de puissance sur un même appareil car intègre les erreurs suivantes liées à la taille des impulsions temps*

Erreurs de comptage court terme

Erreurs de comptage long terme

Et non testés selon tout les cas des compteurs dont le type est déposé

Cas d'un compteur thermique



Référence à la directive européenne sur les instruments de mesure

9 octobre 2017

ATEE

28



Approche méthodologique : démarche opérationnelle, utilisation des redondances et des données qualitatives

Audit énergétique d'un four de cuisson

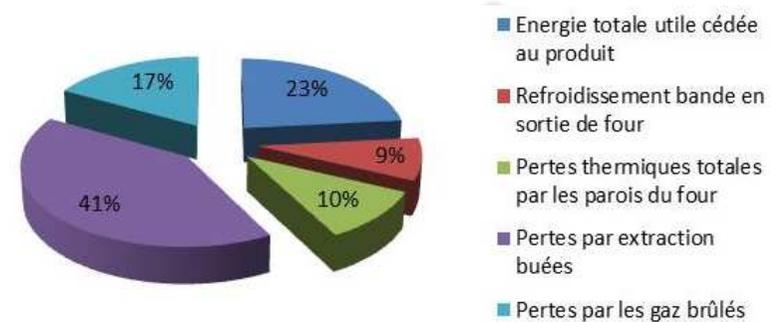
Objet : Economie d'énergie

Méthode : Bilan énergétique (Bilan puissance)

Moyens : utilisation de données

- Métrologie disponible chez l'industriel
- Métrologie déployée par l'auditeur
- Données qualitatives

Le four de cuisson audité



Bilan Thermique

Pertes thermiques par les parois

- Mesures auditeurs
- Capteur : lecteur numérique + sonde de contact type K et sonde d'ambiance
- Mesure des dimensions
- Hypothèse sur le coefficient d'échange
- Calcul : $P = H \cdot S \cdot (T_{\text{surf}} - T_{\text{amb}})$



Bilan Thermique

Pertes thermiques par les extractions

- ▶ Mesures auditeur
- ▶ Deux méthodes
 - ▶ Analyse combustion
 - ▶ Mesure de vitesse : Pitot ou anémométrie
- ▶ Redondance possible
- ▶ Connaissance de l'effluent nécessaire
 - ▶ Hypothèse : assimilable à de l'air



Bilan Thermique

Pertes thermiques par la bande

- Mesures auditeur
 - Température E et S
 - Vitesse bande
- Données industriel
 - Caractéristiques matériaux, laize, e, masse
 - Vitesse bande
- Redondance possible (pour la vitesse)

Bilan Thermique

Puissance utile au produit

- ▶ Mesures auditeur
 - ▶ Température E et S
 - ▶ Cadence, comptage nbre de produits
 - ▶ Pesée E/S, bilan eau
- ▶ Données industriel
 - ▶ Bilan masse, composition produit, débit produit
- ▶ Redondance (pour le débit produit et le bilan eau)



Bilan Thermique

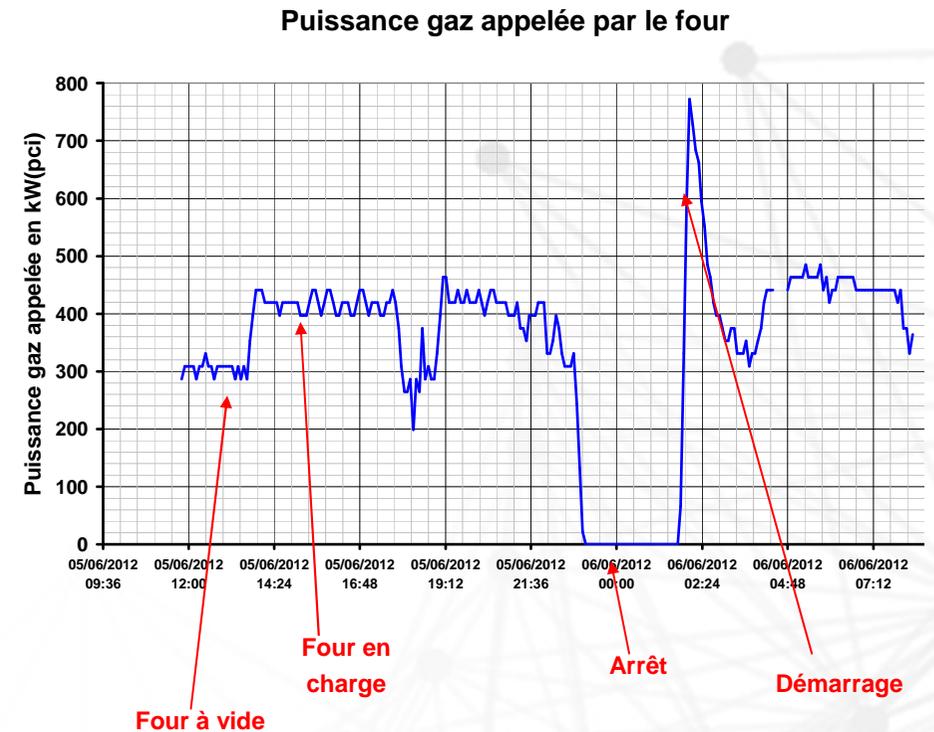
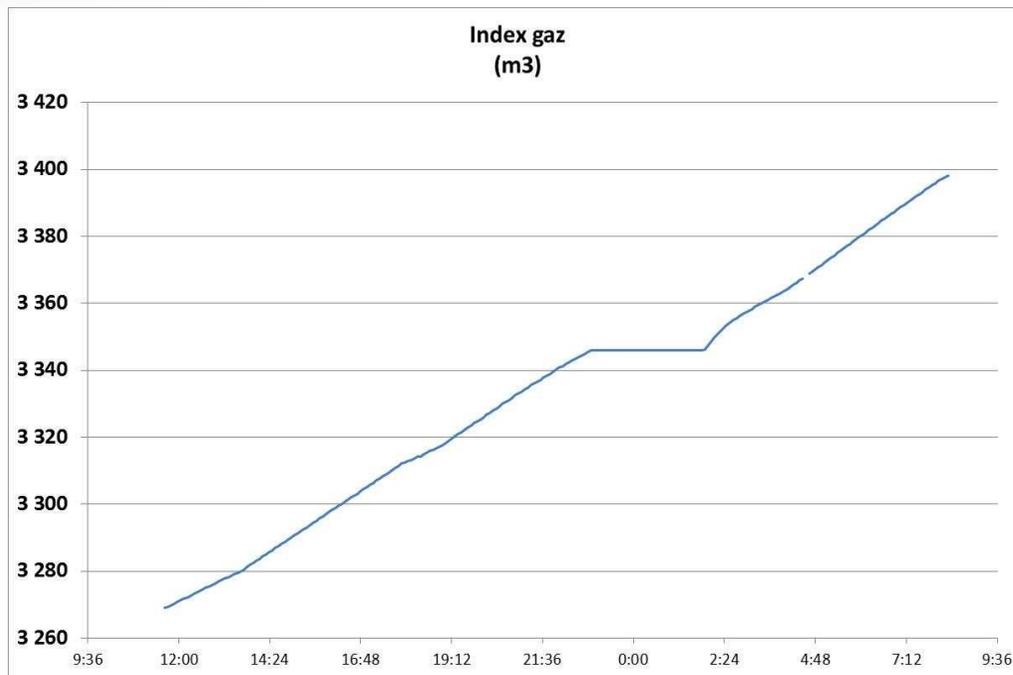
Puissance thermique : Puissance gaz

- ▶ Mesures auditeur
 - ▶ Relevée visuel compteur énergie en place
 - ▶ Température du gaz
 - ▶ Pression du gaz
- ▶ Hypothèse : PCI du gaz



Bilan thermique

Puissance gaz : télérelève



9 octobre 2017

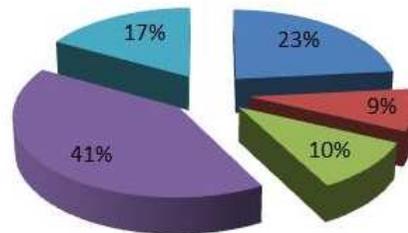
ATEE

37

Bilan Thermique

Puissance thermique : Puissance gaz

- Mesures auditeur
 - › Relevée compteur énergie en place
- Redondance
 - › Bilan thermique
 - › Comparaison actif/passif



Bilan thermique du four

Energie thermiques actives

Consommation horaire de gaz total four	384	kWh
Total	384	kWh

Energie thermiques passives

Energie totale utile cédée au produit	86	kWh
Refroidissement bande en sortie de four	31	kWh
Pertes thermiques totales par les parois du four	38	kWh
Pertes par extraction buées	150	kWh
Pertes par les gaz brûlés	62	kWh
Total	366	kWh

Ecart bilan thermique **-5** **%**

Critères de fiabilisation

Nécessité de continuité de fonctionnement
Relevé sur plusieurs heures (mini 2 heures)
Stabilité de production
Redondance des mesures et des données
Expertise de l'auditeur



**Domaine scientifique de la Doua
25 avenue des Arts – BP 52042
69003 VILLEURBANNE CEDEX - FRANCE**

Mail : information@cetiat.fr

Tél : 04 72 44 49 00

Fax : 04 72 44 49 49