

# CAPTEURS

« conditionnement des signaux »

Instrumentation Industrielle

## Généralités

Module Capteur : Licence PRO

Présenté par:

**ANNECCA Gaëtan**

Responsable REGULATION

Papèteries de CLAIREFONTAINE

# Partie 1 : Généralités

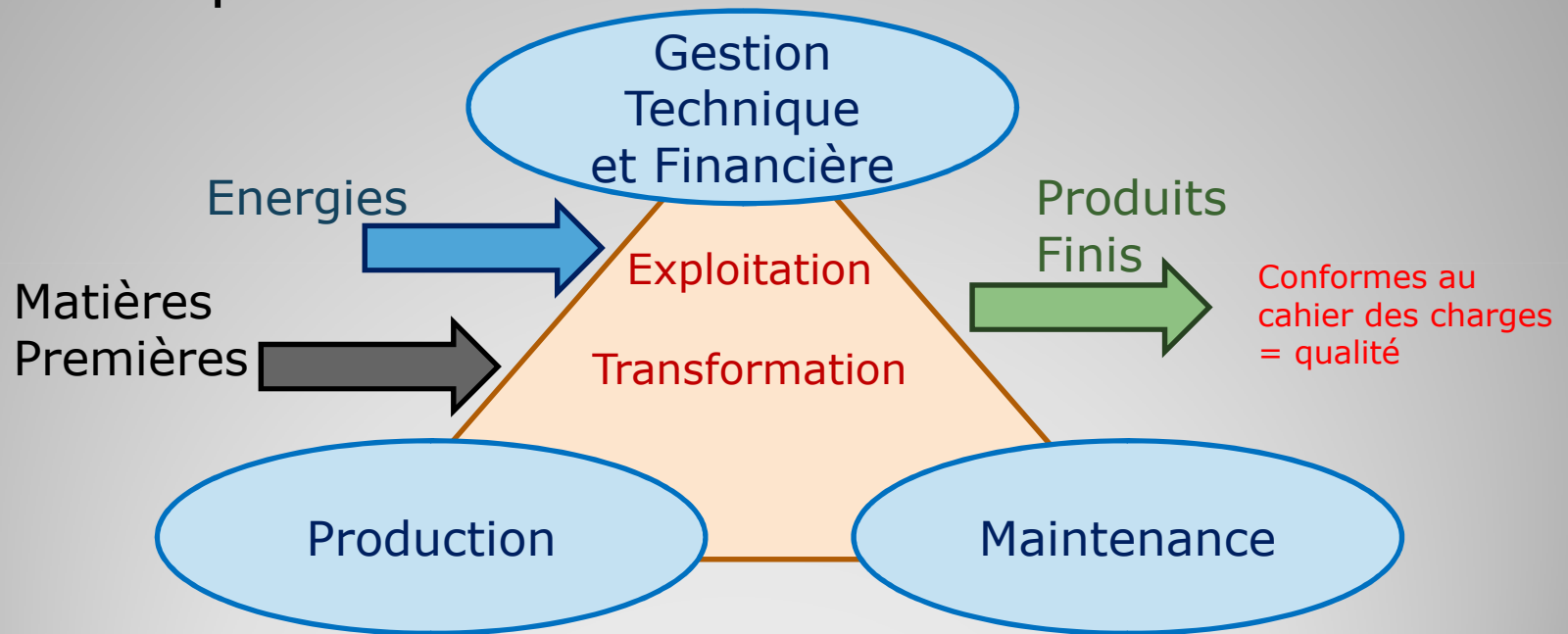
## Métrologie et mesures Industrielles

- Contrôle des procédés industriels
- Hiérarchie des systèmes de contrôle
- Représentations d'un procédé
- Grandeurs physiques et unités
- Métrologie - Chaîne de mesurage – Etalonnage
- Caractéristiques métrologiques des IM (Instruments de mesure)
- Environnement Industriel des IM (Instruments de mesure)

# Métrologie et Mesures Industrielles

# Procédé et processus industriels

- Entreprise Industrielle

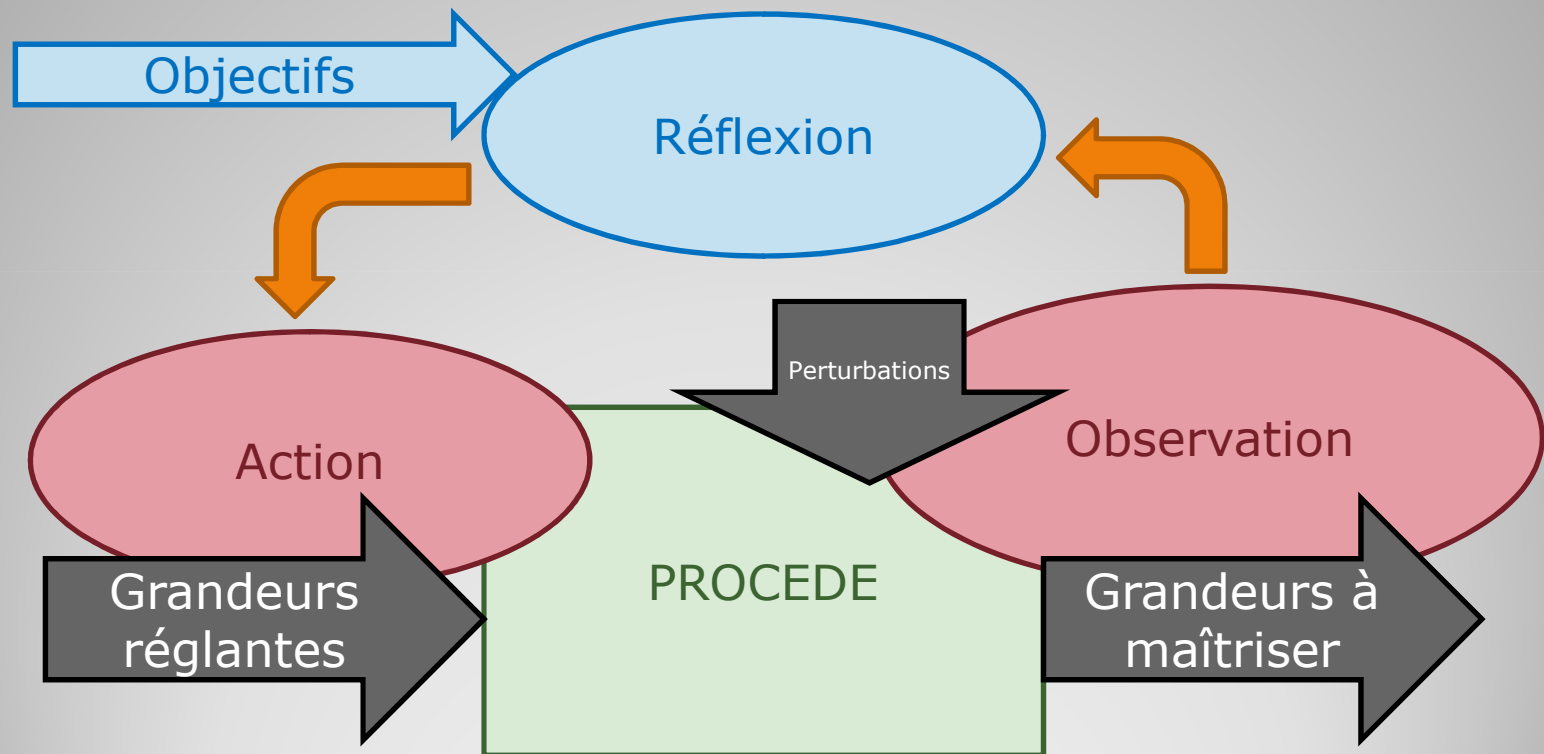


Procédé = méthode à suivre  
Il est continu ou discontinu (batch)

Processus = installation + appareils  
+ description fonctionnelle

## Contrôle des procédés industriels

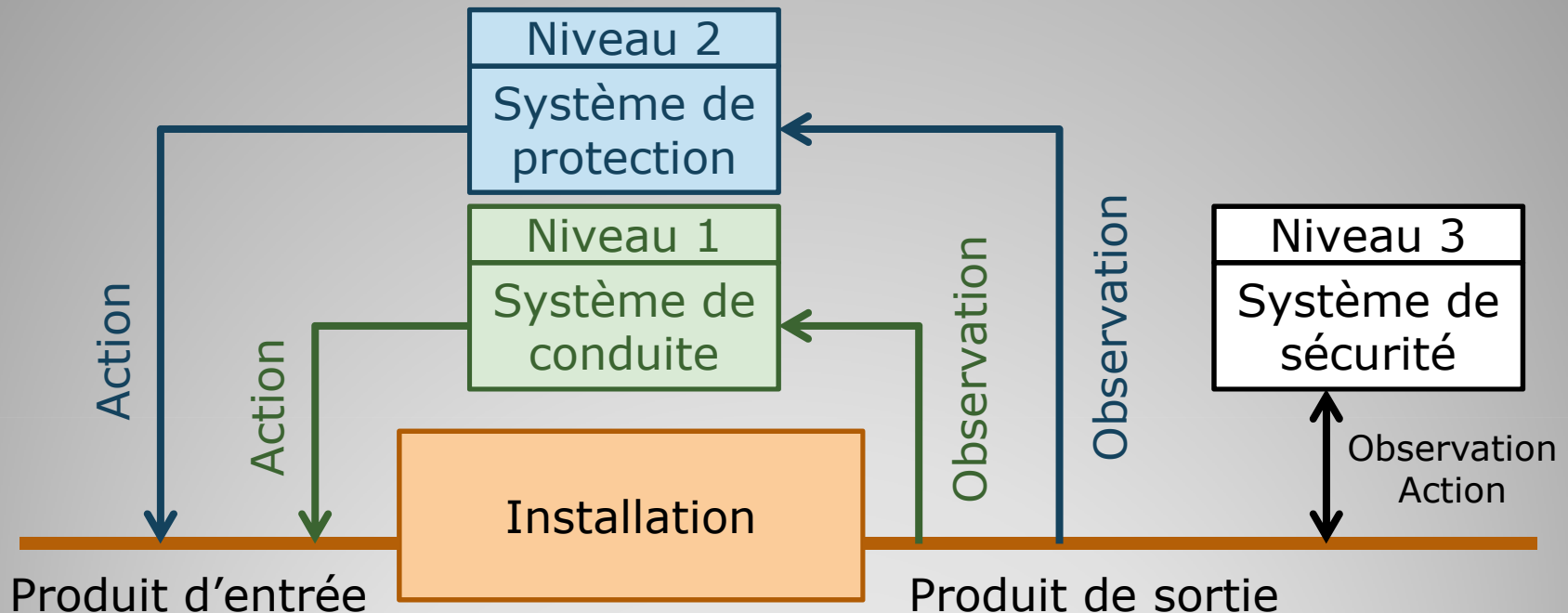
- Contrôle Industriel
  - = domaine de l'instrumentation et de la régulation



# Contrôle des procédés industriels

- Ce qu'il faut comprendre !
  - **Procédé** = méthode à suivre pour élaborer un produit conforme au cahier des charges, il est continu ou batch.
  - **Processus** = installation avec tout le matériel et l'ensemble descriptif de toutes les opérations détaillées.
  - Le terme anglais **process** désigne aussi bien le procédé que le processus.
  - Le Contrôle Industriel englobe les domaines de **l'instrumentation** et de **la régulation**
  - **La régulation sans instrumentation n'est pas envisageable**
  - **L'instrumentation sans régulation est possible**

## Contrôle des procédés industriels



**Niveau 1** : Assure la conduite du processus, continu ou discontinu, en fonctionnement normal et comprend l'instrumentation et la régulation ou l'automatisme.

**Niveau 2** : Assure la protection du processus, à partir d'informations prédéfinies de dépassement de seuils critiques pour le processus, l'instrumentation est indépendante de celle du niveau 1.

**Niveau 3** : C'est le niveau de sécurité le plus haut en cas de défaillance d'un ou plusieurs éléments du processus. Les dispositifs, indépendants des niveaux 1 et 2, doivent pouvoir se déclencher sans énergie auxiliaire, comme les soupapes de sécurité, les disques de rupture, ou les fusibles thermiques.

## Hiérarchie des systèmes de contrôle

Niveau 1

Système de conduite

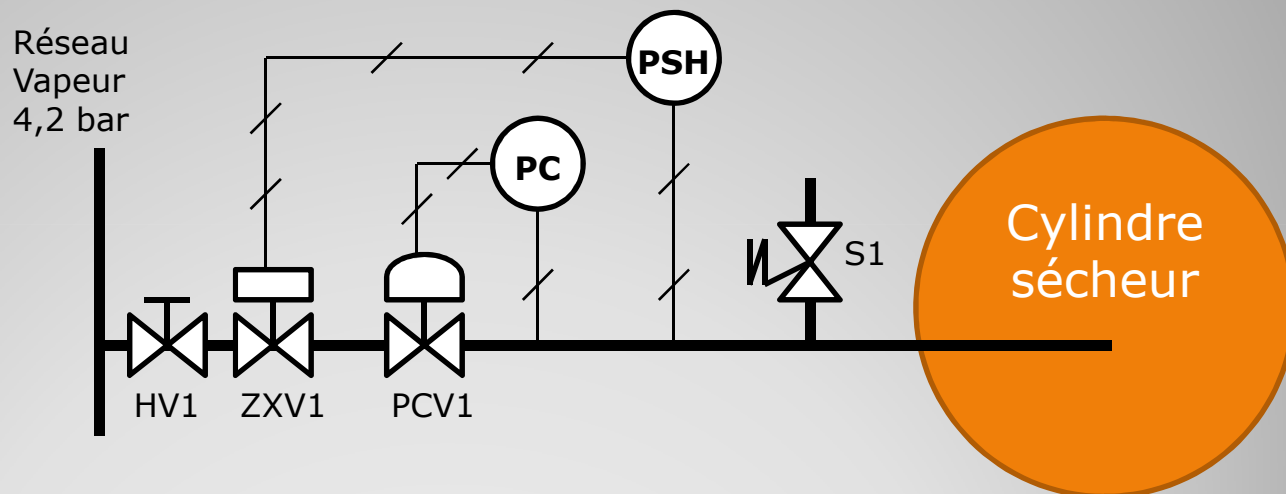
Niveau 2

Système de protection

Niveau 3

Système de sécurité

Exemple : Processus = alimentation vapeur d'un cylindre sécheur  
 Pression maximum 3,95 bar  
 Mise en sécurité de l'installation au seuil de 3,85 bar  
 Consigne de service variant entre 0,5 et 3,75 bar



**Niveau 1 :** PC commande PCV1 en continu pour maintenir la pression du cylindre à une consigne fixée comprise entre 0,5 et 3,75 bar

**Niveau 2 :** PSH ferme ZXV1 si la pression dépasse le seuil de protection de 3,85 bar

**Niveau 3 :** La soupape de sécurité S1 s'ouvre si la pression est supérieure à 3,9 bar

## Hiérarchie des systèmes de contrôle

## Comment reconnaître l'instrumentation industrielle ?

- Représentation normalisée
- Schéma fonctionnel
- Norme de représentation symbolique

Des symboles sont utilisés pour la représentation de l'instrumentation sur les schémas suivants:

- Plan de circulation des fluides (**PCF**) = Process Flow Sheet (PFS)
- Plan de tuyauterie et d'instrumentation (**TI**)  
que l'on nomme également (**PID**) Piping and Instrument Diagram

La représentation de cette norme a été pensée, d'une part pour :

- Répondre à la pratique internationale
- Pouvoir faire le lien avec la normalisation existante ou différente

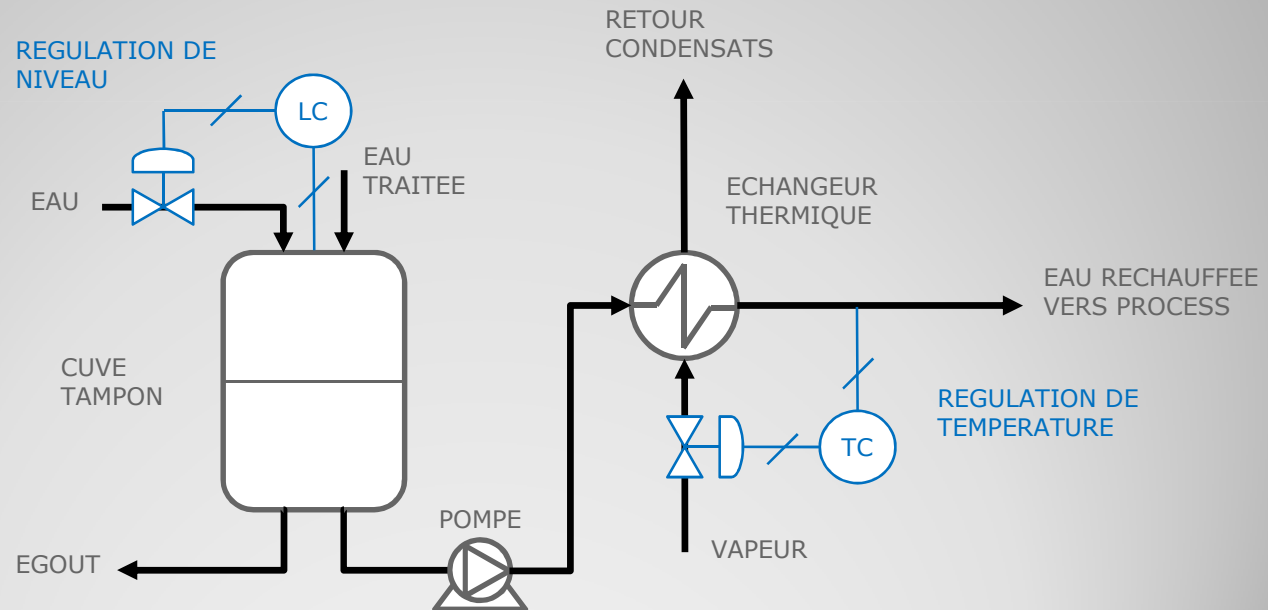
# Représentations d'un procédé



## • Le Plan de circulation des fluides PCF

Est un schéma de représentation symbolique avec:

- Les cuves, les réacteurs chimiques, les échangeurs thermiques, ...
- Les organes de puissance tels que les pompes, agitateurs, résistances de chauffage, ...
- Les conduites représentées par un trait continu épais, la nature, gaz ou liquide et le sens d'écoulement des fluides
- L'indication des grandeurs physiques utiles: débit, pression, niveau, température, ...
- Le plan peut faire apparaître les boucles de régulation mais sans détail des instruments



# Plan de Circulation des Fluides (PCF)

- Le Plan de Tuyauterie et d'Instrumentation (TI)  
*Piping Instrument Diagram (PID)*

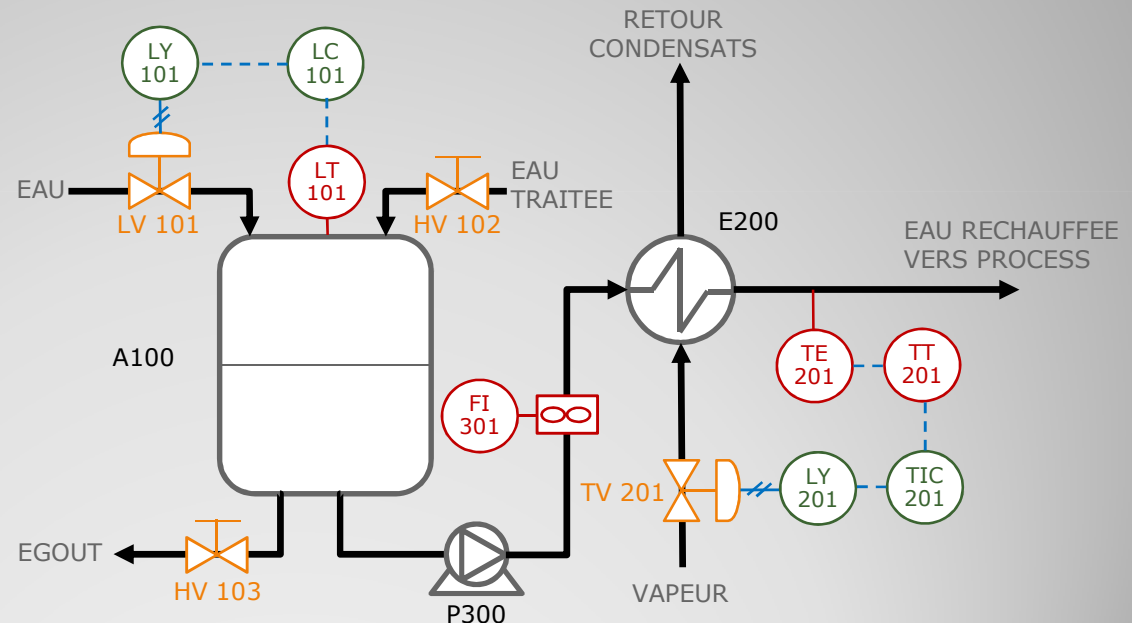
Il complète le Plan de Circulation des Fluides en lui ajoutant:

-les appareils de mesure:  
capteurs, transmetteurs,  
indicateurs

-les appareils de contrôle:  
régulateurs et opérateurs de  
calcul

-Les actionneurs : vannes de  
réglage, vanne de  
sectionnement, volets de  
réglage

-Les liaisons d'information  
entre ces appareils



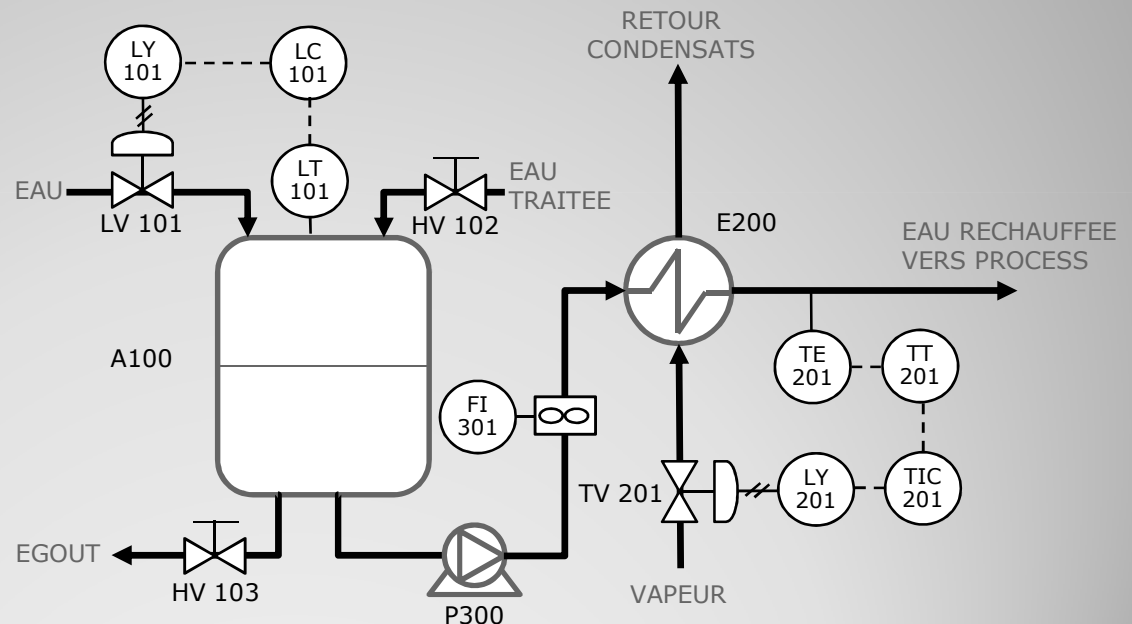
## Plan de Tuyauterie et d'Instrumentation (TI)

- Le Plan de Tuyauterie et d'Instrumentation (TI)  
*Piping Instrument Diagram (PID)*

-les instruments 101 forment une boucle de régulation de niveau

-les instruments 201 forment une boucle de régulation de température

-l'instruments 301 est un indicateur de débit



## Plan de Tuyauterie et d'Instrumentation (TI)

## ● Codets d'instrumentation

Extrait du tableau de la norme

TE  
201

Codet	Signifiant		Signifiant suivant	
	Variable mesurée ou Variable initiale	Complément	Affichage	Action
1	2	3	4	
<b>A</b>	Analyse	Différence	Alarme Etat	Régulation
<b>B</b>	Combustion			
<b>C</b>	Conductivité	Proportion	Elément primaire	Haut, Très haut
<b>D</b>	Masse volumique			
<b>E</b>	Tension	Sécurité	Indication	Bas, Très bas
<b>F</b>	Débit			
<b>H</b>	Commande manuelle	Coordonnée	Point d'essai	Commutation Transmission Actionneur
<b>I</b>	Courant			
<b>L</b>	Niveau			
<b>M</b>	Humidité			
<b>P</b>	Pression			
<b>S</b>	Vitesse			
<b>T</b>	Température			
<b>Z</b>	Position, longueur			

Exemple : **TE** = élément primaire de température ou sonde de température

## Plan de Tuyauterie et d'Instrumentation (TI)

- Grandeurs physiques et unités  
Vocabulaire international

La norme NF X 02-001 est à la base des définitions suivantes :

- **Unité de mesure**

Dans un ensemble de grandeurs, on appelle **unité de mesure**, une grandeur particulière choisie comme grandeur de référence.

Le symbole d'une unité est écrit en caractère droit, par exemple :  
pour le mètre **m**.

- **Grandeurs de base ou fondamentales**

Les grandeurs physiques sont liées entre elles par des équations exprimant des lois physiques. Certaines grandeurs sont considérées comme indépendantes les unes des autres, ce sont les **grandeurs de base** ou **fondamentales** à partir desquelles on peut définir d'autres grandeurs au moyen d'équation.

La norme précise qu'il existe **7** grandeurs de base : **Longueur - Masse - Temps - Température - Courant électrique - Quantité de matière - Intensité lumineuse**

- **Grandeur dérivée**

Une **grandeur dérivée** est une grandeur définie, dans un système de grandeurs, par une équation en fonction des grandeurs de base.

Exemple : Le débit-volume  $Q_v$  est une grandeur dérivée définie comme le quotient du volume  $v$  par le temps  $t$ .

Le volume  $v$  est aussi une grandeur dérivée puisqu'il s'exprime en  $m^3$ .

L'unité du débit-volume  $Q_v$  est donc des  $m^3/s$

# Grandeurs physiques et unités

# • Système International d'unités

Tableau des 7 grandeurs de base ou fondamentales

Grandeur Physique	Unité de base	Symbole de l'unité	Dimension de base
Longueur	mètre	m	L
Masse	kilogramme	kg	M
Temps	seconde	s	T
Courant électrique	ampère	A	I
Température thermodynamique	kelvin	K	$\theta$
Quantité de matière	mole	mol	N
Intensité lumineuse	candela	cd	J

## Grandeurs physiques et unités

**La métrologie**, science des mesures, est l'ensemble des techniques et des savoir-faire qui permettent d'effectuer des mesures et d'avoir une confiance suffisante dans leurs résultats.

La **mesure** est nécessaire à toute **connaissance**, à toute **prise de décision** et à toute **action**.

## ● Chaîne de mesurage

La grandeur physique = **MESURANDE**  
(pression, température, niveau, ...)

MESURAGE : ensemble des opérations expérimentales pour connaître la valeur numérique du *MESURANDE*.

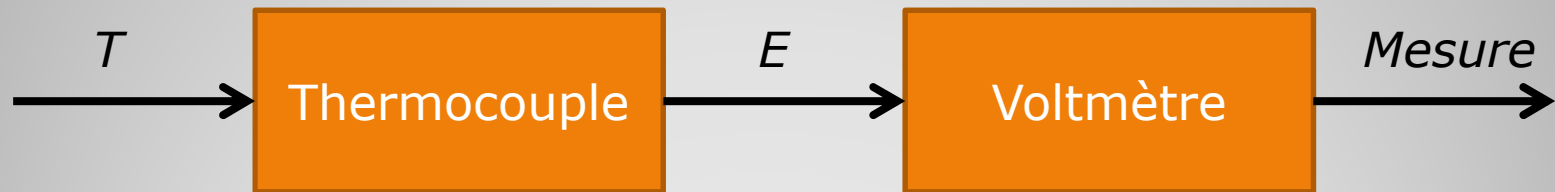
Chaîne de mesurage = ensemble des dispositifs, y compris le capteur permettant d'obtenir la valeur du *MESURANDE*.

# Métrologie – Chaîne de mesurage

## • Chaîne de mesurage

Exemple d'une chaîne de mesurage simple:

Un thermocouple et un voltmètre



Le Mesurande est la température  $T$ , et la mesure est l'indication de la tension  $E$ .

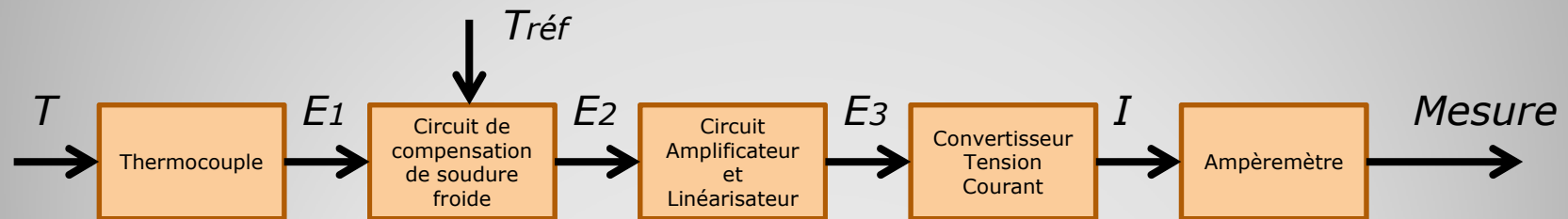
# Métrologie – Chaîne de mesurage



## • Chaîne de mesurage

Exemple d'une chaîne de mesurage plus complète:

Un thermocouple,  
un circuit de compensation de soudure froide,  
un circuit amplificateur et linéarisateur du signal,  
un convertisseur tension-courant et un ampèremètre



Le Mesurande est la température  $T$ ,

Les grandeurs intermédiaires sont les tensions  $E_1$  et  $E_2$  et  $E_3$ ,

La mesure est l'indication du courant  $I$ .

# Métrologie – Chaîne de mesurage

## • Grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont les « *parasites* » de la mesure.  
Les principales grandeurs d'influence comprennent:

**Température**

**Pression, accélération, vibrations, forces**

**Humidité**

**Champs magnétiques**

**Tension d'alimentation**

De façon générale on peut écrire:  $s=f(m,g1,g2,...)$

On cherche à **réduire l'importance** des grandeurs d'influence en les **stabilisant** à des valeurs connues, en **compensant**, en **isolant**, etc.

# Erreurs d'une chaîne de mesure

## • Erreurs de mesure

La valeur d'un *Mesurande* ne peut être évaluée que par la chaîne de mesurage.

**L'erreur de mesure** est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur de référence.

La valeur vraie du mesurande détermine l'excitation du capteur, mais l'expert **n'a accès qu'à la réponse globale de la chaîne de mesure.**

**L'écart** entre la valeur **vraie** et la valeur **mesurée**, sera **toujours inconnu**, et il y aura toujours une **incertitude** sur la valeur vraie du mesurande.

**Cette erreur de mesure ne peut être qu'estimée**, elle est la somme de **l'erreur systématique** et de **l'erreur aléatoire**.

## Erreurs d'une chaîne de mesure

## • Erreurs systématiques

Des mesurages répétés, pour une même valeur du Mesurande, peuvent entraîner un décalage constant entre la valeur de référence et la valeur mesurée.

Ce décalage constant ou à variation prévisible est ***l'erreur systématique***.

Les erreurs systématiques ont généralement pour cause une connaissance erronée ou incomplète de l'installation de mesure ou une mauvaise utilisation.

Elles peuvent souvent être réduites ou annulées par une correction.

*Exemples: fausse température de référence, décalage d'une mesure de résistance ohmique, temps de réponse trop lent ...*

## Erreurs d'une chaîne de mesure

## • Erreurs aléatoires

Des mesurages répétés, pour une même valeur du Mesurande, conduisent à des écarts entre la valeur de référence et la valeur mesurée.

Ces écarts sont considérés comme **des erreurs aléatoires** car variant de façon imprévisible.

Certaines des causes peuvent être connues mais les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de l'expérience sont inconnues.

*Exemples: erreur de quantification, erreurs dues au bruit de fond produit par agitation thermique ou inductions parasites dues aux rayonnements électromagnétiques, erreurs dues à la variation de la célérité du son liée à la température ambiante ...*

## Erreurs d'une chaîne de mesure

## • Erreur aberrante

Au cours d'un étalonnage, il arrive qu'une mesure s'écarte notablement de la valeur de référence et conduise à une **erreur aberrante**.

Cette valeur aberrante peut provenir d'une erreur de lecture ou de manipulation, dans ce cas il est tout à fait normal de l'éliminer.

*Exemple : Dans la notice d'un multimètre de haute précision, il est recommandé de ne commencer les mesures qu'après un temps de stabilisation en température de tous les composants électroniques. Si ce temps n'est pas respecté, il peut conduire à une ou plusieurs valeurs aberrantes, notamment en début d'étalonnage. L'appareil étalonné peut alors être déclaré non conforme à ces caractéristiques métrologiques, alors qu'il est conforme !*

## Erreurs d'une chaîne de mesure

- Erreurs dues aux grandeurs d'influence

**La température:** modifie les caractéristiques électriques, mécaniques, géométriques des matériaux.

**Pressions, accélérations, vibrations, forces, etc. :** créent des déformations du corps d'épreuve qui altèrent la réponse.

**Humidité:** la constante diélectrique  $\epsilon$  et la résistivité  $\rho$   $\gamma$  sont sensibles. Dégradation de l'isolation électrique.

**Champs magnétiques:** modifications électriques (résistivité) pour les champs statiques, ou création de f.é.m. d'induction pour les champs variables.

**Tension d'alimentation:** fluctuation de l'amplitude ou de la fréquence peuvent altérer la grandeur se sortie du capteur lorsque elle dépend de celle-ci.

**La lumière ambiante:** peut s'ajouter à un flux lumineux à mesurer

## Erreurs d'une chaîne de mesure

- Réduction des erreurs accidentelle

**Les erreurs systématiques** peuvent être éliminées.

**Les erreurs accidentelles** sont aléatoires et imprévisibles.

**Protection de la chaîne de mesure:**

Isolation thermique, hygrométrique, vibratoire

Régulation de la tension d'alimentation

Élimination des dérives d'amplificateurs

Blindage des câbles et mise à la terre

Filtrage des signaux parasites

Résolution suffisante des convertisseurs analogique/numérique

Correction numérique par microprocesseur intégré

## Erreurs d'une chaîne de mesure

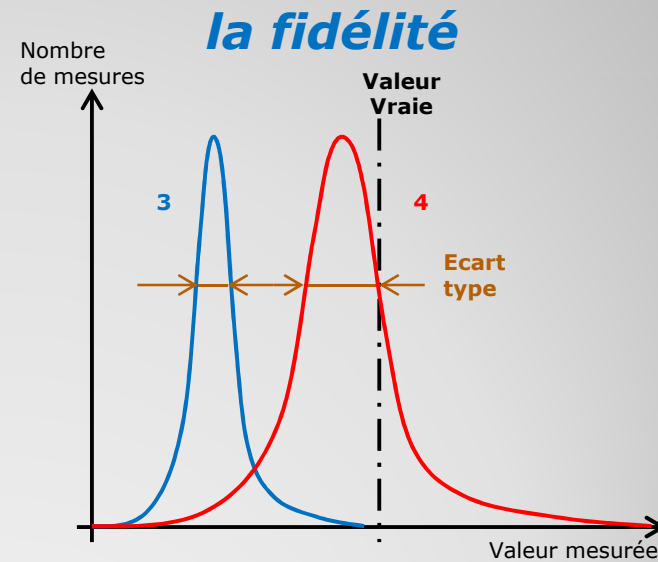
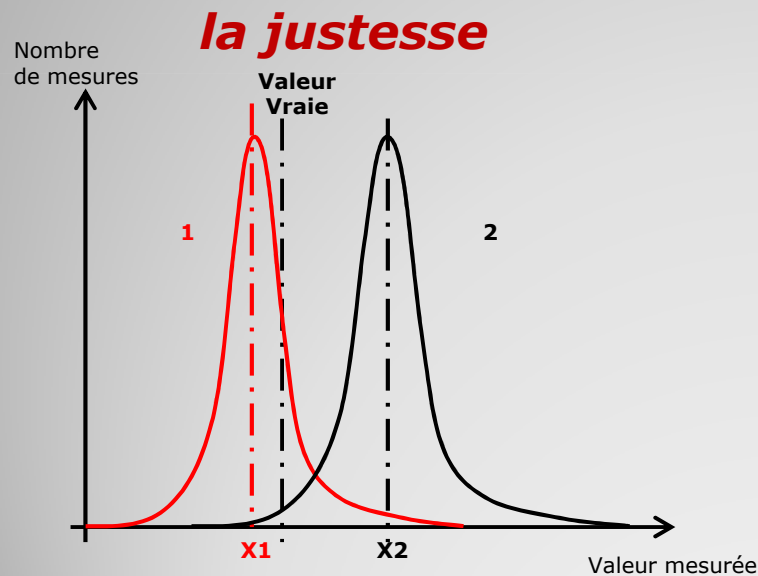


## • Qualité d'une chaîne de mesurage

La qualité est évaluée par :

**la précision** regroupant **la fidélité** et **la justesse**

Pour déterminer cette précision, un grand nombre de mesures est effectuée d'une même valeur d'un Mesurande, dite **valeur vraie**.



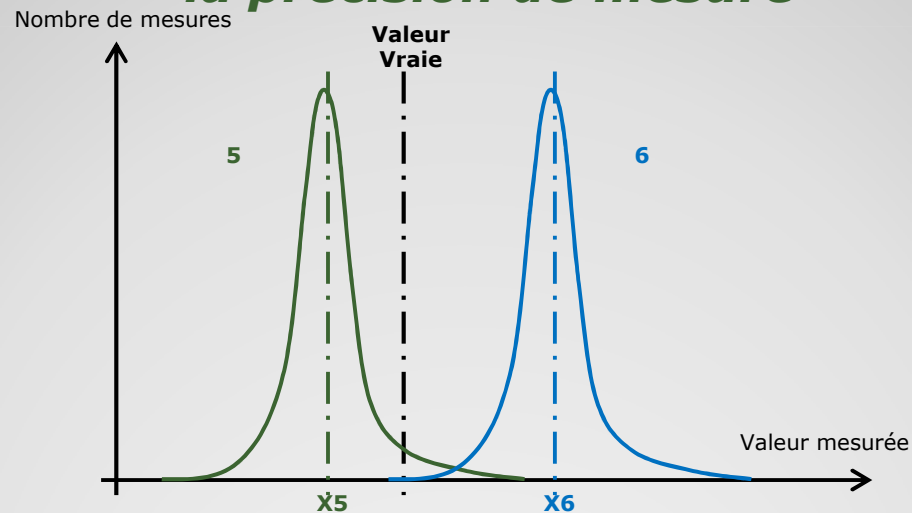
# Qualité d'une chaîne de mesurage

# • Qualité d'une chaîne de mesurage

La qualité est évaluée par :

**la précision** regroupant **la fidélité** et **la justesse**  
à fidélité égale, 5 est plus juste que 6, donc plus précis

## **la précision de mesure**



# Qualité d'une chaîne de mesurage

## • Etalonnage d'un instrument

En clair, cette opération consiste à mesurer la même grandeur avec l'équipement à étalonner et l'équipement étalon, et à comparer les indications des deux instruments, puis à exploiter les résultats de cette comparaison.

Exemple: étalonnage d'un thermomètre simplifié.

Dans un milieu homogène, à une température stabilisée (four ou bain thermostaté), nous plongeons un instrument à étalonner (thermomètre) et un étalon (thermomètre de référence, accompagné d'un certificat d'étalonnage), et nous mesurons la température du milieu (bain ou four).

Le thermomètre étalon (ajusté) indique 25,30 °C, le thermomètre à étalonner indique 24,10 °C. Nous avons alors,  $T^{\circ} \text{ thermomètre} = T^{\circ} \text{ étalon} - 1,20 \text{ °C}$

C'est la première étape de la définition.

La seconde étape consiste à exploiter les résultats de la première.

Il peut s'agir de trois actions :

- la correction « manuelle » du résultat lu
- la vérification du matériel
- l'ajustage du matériel.

# Etalonnage d'un instrument

## • Etalonnage direct ou absolu

Valeur du Mesurande  
générée par l'étalon  
de référence



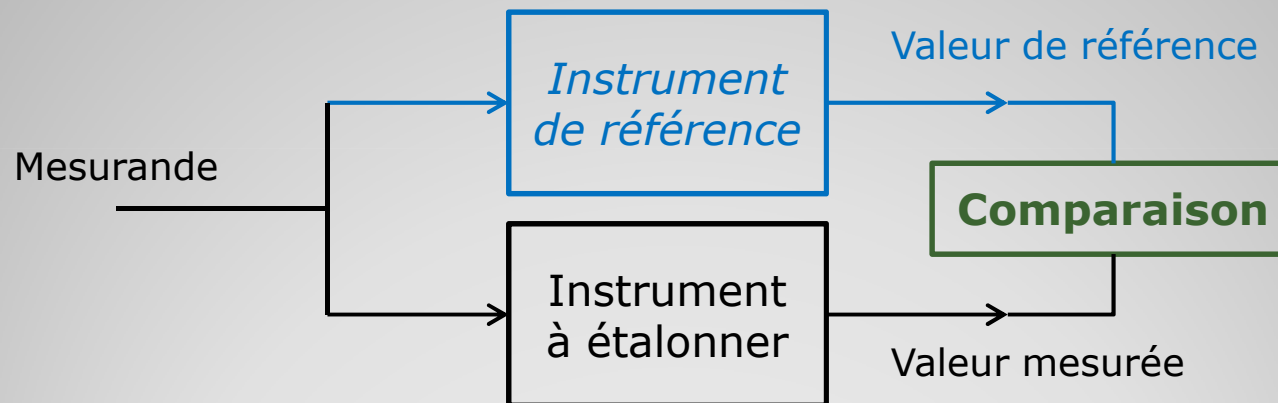
Valeur mesurée

Exemples d'éléments de référence:

- Cales-étalons pour les capteurs de déplacement
- Masses marquées pour les balances et pesons
- Températures de point fixes primaires ou secondaires pour les capteurs de température définies par EIT90 (Echelle Internationale Température 1990)
- Solutions tampons pour les sondes de *pH*
- Gaz étalons (2% ou 8% O<sub>2</sub>) pour les sondes taux d'oxygène des fumées

# Etalonnage d'un instrument

- Etalonnage indirect  
ou par comparaison



Exemples d'instrument de référence:

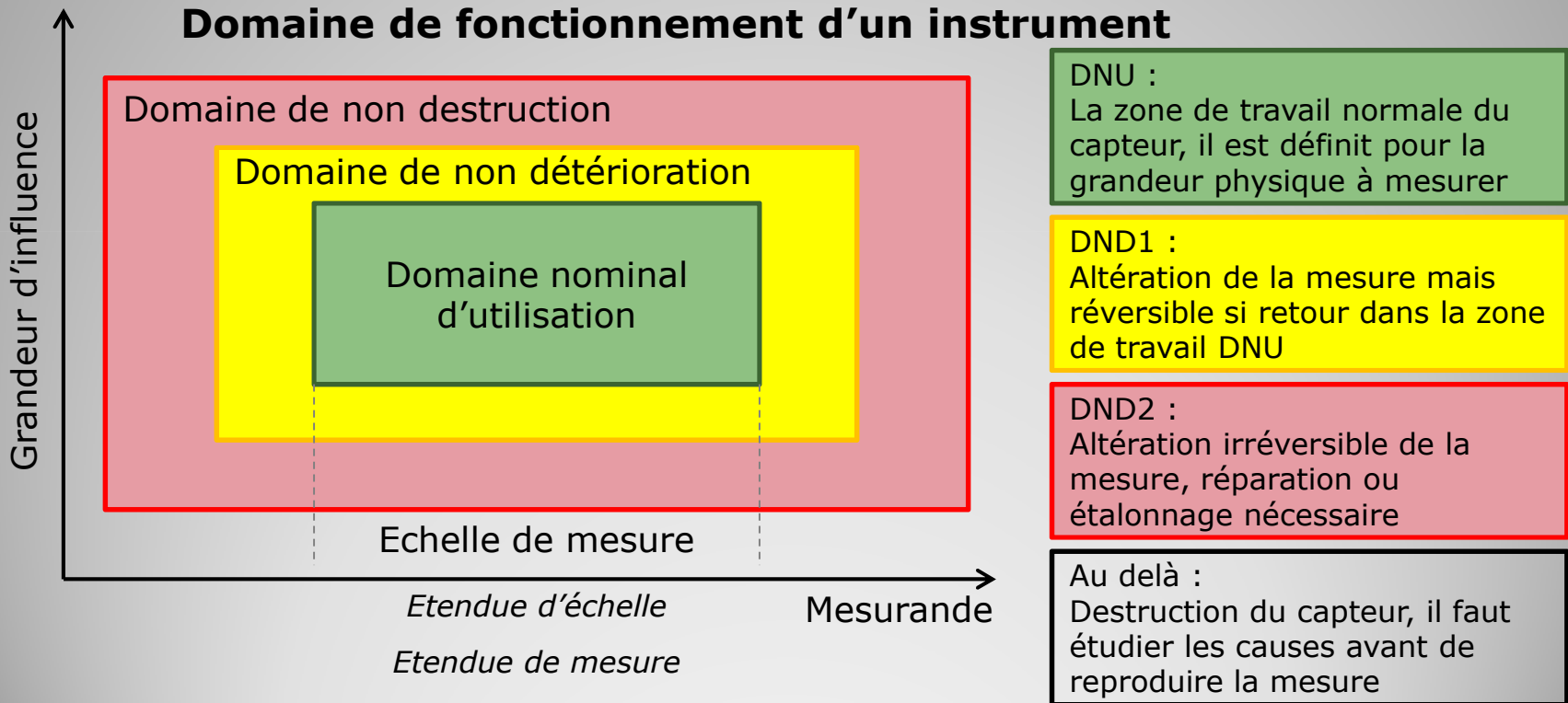
Thermomètre, Manomètre, Baromètre, Mètre, Sonomètre, Anémomètre

Certains appareils permettent la génération du Mesurande et assurent la fonction instrument de référence : four d'étalonnage, calibrateur de pression

## Etalonnage d'un instrument

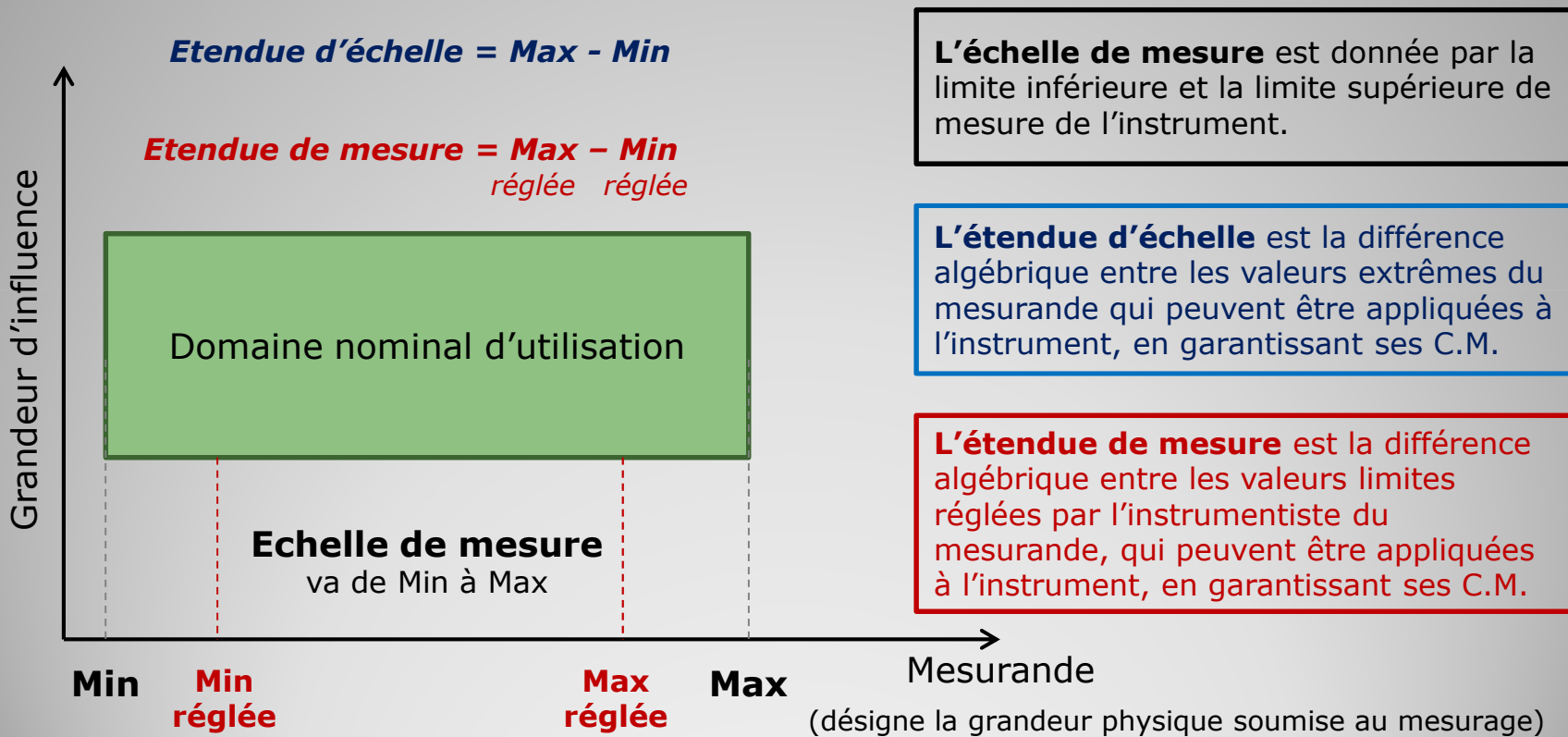
- Caractéristiques Métrologiques des instruments de mesure indispensable au technicien pour choisir et exploiter avec pertinence les instruments de mesure

## Domaine de fonctionnement d'un instrument



# Caractéristiques Métrologiques

• Etendue d'échelle , étendue de mesure



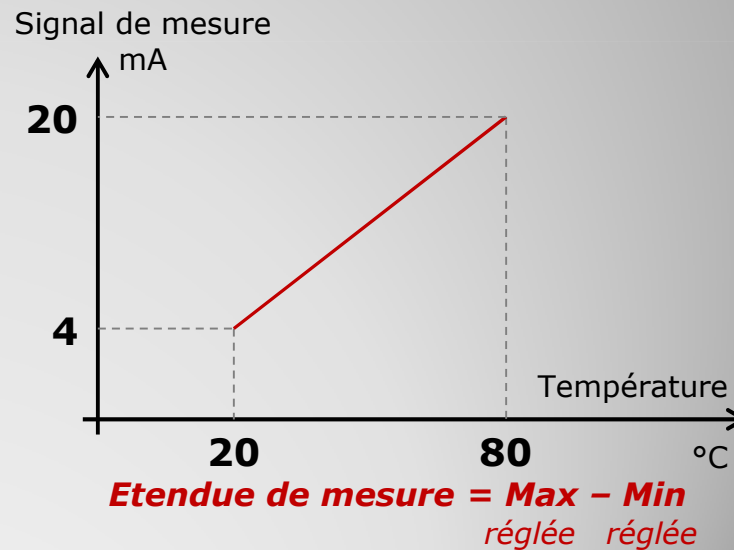
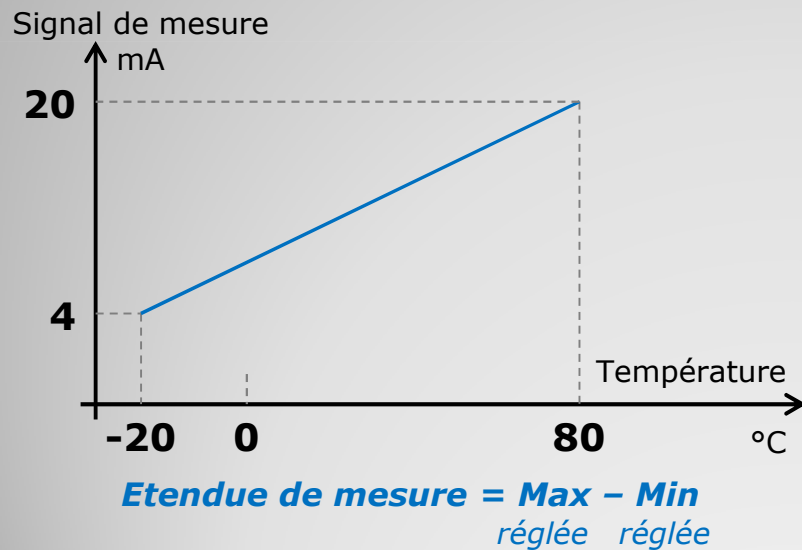
Caractéristiques Métrologiques

## • Zéro de mesure

**Le zéro de mesure** est la valeur prise comme origine de l'information délivrée par l'instrument, le zéro des transmetteurs industriels est réglable ou paramétrable.

**Le décalage de zéro est dit positif** si la valeur de l'étendue de mesure est supérieure à la valeur maximale

**Le décalage de zéro est dit négatif** si la valeur de l'étendue de mesure est inférieure à la valeur maximale



# Caractéristiques Métrologiques



## • Rangeabilité

La **rangeabilité R** d'un instrument s'exprime comme le quotient de l'étendue de mesure maximale réglable par l'étendue de mesure minimale réglable. Cette définition implique que le réglage d'étendue soit prévu par le fabricant.

$$R = \frac{EM \text{ maxi}}{EM \text{ mini}}$$

Elle se note sous la forme R:1

Elle chiffre la capacité de réglage de l'instrument

Une rangeabilité de 3:1 est médiocre, il est classique d'avoir 10:1

Une rangeabilité de 100:1 est gage d'une très grande souplesse d'adaptabilité d'un instrument au problème de mesure.

*Exemple : la notice d'un transmetteur de niveau annonce un réglage d'une étendue de mesure de 0,6 m à 30 m.*

*Rangeabilité est  $R = 30 / 0,6 = 50$  et elle est notée 50:1 ce qui correspond à une excellente capacité de réglage.*

# Caractéristiques Métrologiques

- Linéarité

Un instrument est dit linéaire dans une plage déterminée du mesurande si sa sensibilité y est indépendante de la valeur du mesurande.

**L'écart de linéarité** est la spécification qui permet d'apprécier la plus ou moins bonne linéarité d'une courbe d'étalonnage.

Il est défini à partir de l'écart maximal entre la courbe d'étalonnage et la meilleure droite, et il est exprimé en pourcentage de la valeur maximale de la grandeur de sortie dans l'étendue de mesure considérée.

La courbe d'étalonnage est tracée à partir des points expérimentaux. L'équation de la droite, appelée meilleure droite est la représentation la plus probable, est déterminée par la méthode des moindres carrés.

## Caractéristiques Métrologiques

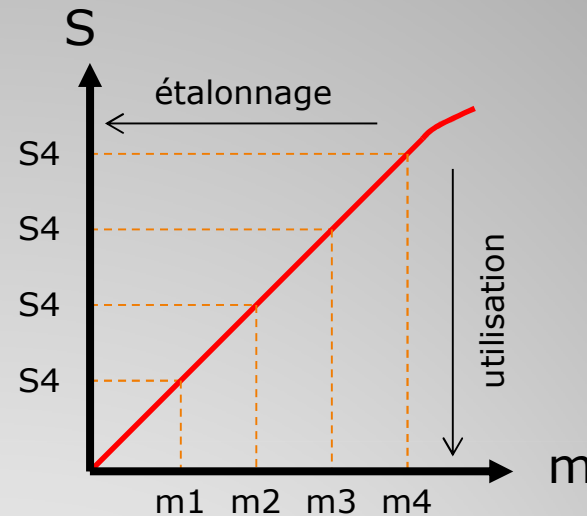
- **Linéarité**

Pour des raisons de facilité d'exploitation, on essaie généralement d'obtenir pour la fonction  $f$  une relation linéaire.

- **Sensibilité**

La **sensibilité  $S_e$**  est le quotient de l'accroissement du signal de sortie  $S$  de l'instrument par l'accroissement du signal d'entrée  $m$  correspondant, et obtenu en régime permanent.

Lorsqu'un instrument est linéaire, la sensibilité indiquée est la pente de la droite qui est la meilleure approximation de la courbe d'étalonnage.



$$S_e = \frac{dS}{dm}$$

## Caractéristiques Métrologiques

## • Précision des valeurs mesurées

Les erreurs accidentelles entraînant une dispersion des résultats, il est nécessaire d'introduire le **traitement statistique** pour obtenir :

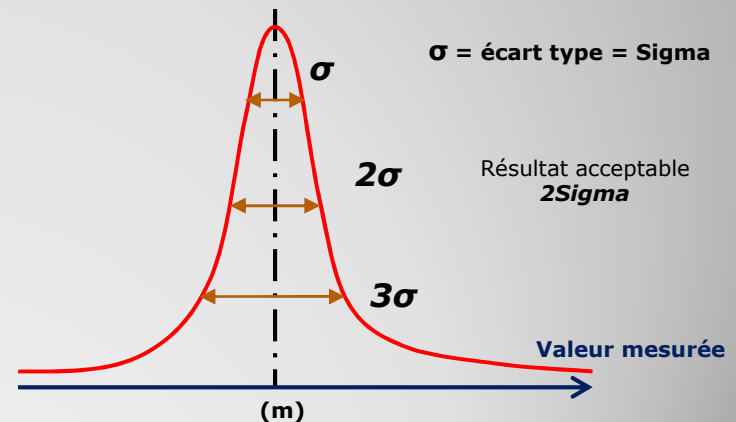
- **la valeur la plus probable**
- **fixer les limites de l'incertitude**

Lorsque le mesurage d'une même valeur du mesurande est répété « n » fois, on définit alors :

- **la valeur moyenne arithmétique** (valeur la plus probable)
- **l'écart-type «  $\sigma$  »** (dispersion des résultats)

**Loi de Gauss** : la probabilité d'apparition d'un résultat de mesurage dans les limites indiquées est,

- $(m \pm \sigma)$  dans 68,3 % des cas
- $(m \pm 2\sigma)$**  dans **95,5 %** des cas
- $(m \pm 3\sigma)$  dans 99,7 % des cas



## Caractéristiques Métrologiques

## • Précision d'instrument

### **Incertitude absolue annoncée par le fabricant :**

Pour un instrument de mesure, le fabricant annonce la manière dont on peut calculer l'erreur maximale ou ***incertitude absolue***.

Exemple d'une notice constructeur:

#### **Précision de mesure**

Ecart de mesure pour paramétrage de valeur seuil, hystérésis et reproductibilité incluses

- typique : 0,25 % de la valeur finale
- maximal : 0,5 % de la valeur finale

Temps de réponse  $T_{99}$

< 5 ms

Stabilité à long terme

- Début et étendue de mesure

0,25 % de val. de fin d'échelle/an

Influence de la température ambiante

- Début et étendue de mesure

0,25 %/10 K de la valeur finale

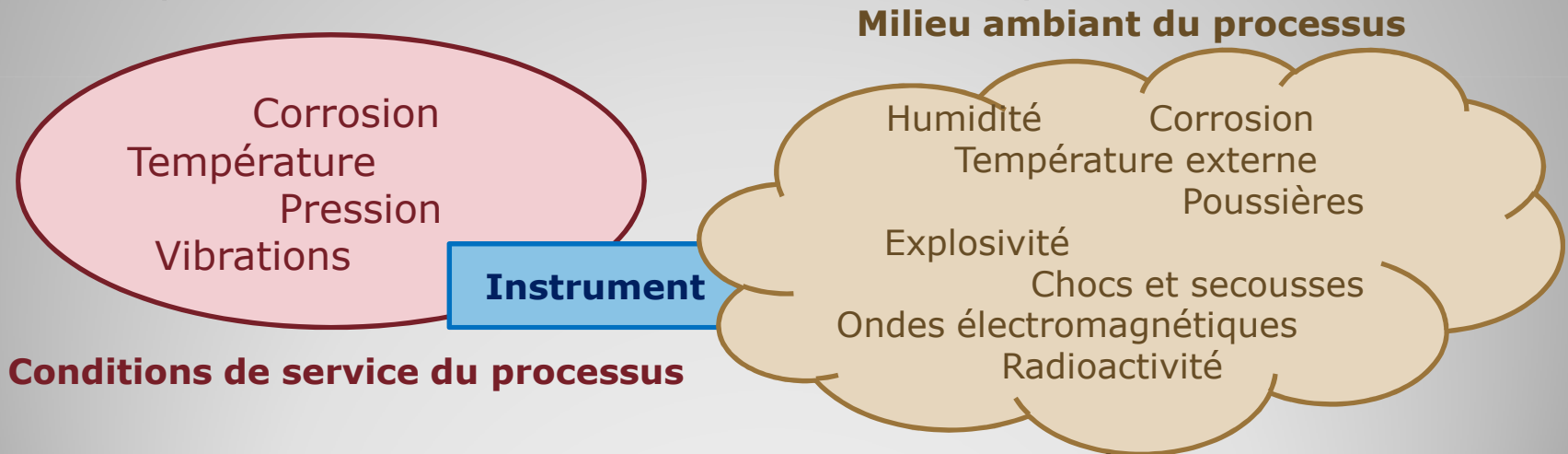
- Influence énergie auxiliaire

0,005 %/V

# Caractéristiques Métrologiques

- Environnement

Tout appareil quel qu'il soit, instrument de mesure, de contrôle commande ou autre, doit fonctionner dans les **conditions de services** imposées par le fonctionnement du processus sur lequel il opère, ainsi que dans le **milieu ambiant** dans lequel il évolue.



L'examen de l'environnement industriel d'un appareil définit toutes les qualités intrinsèques indispensables pour qu'il reste opérationnel.

# Environnement industriel

- Adaptation aux conditions de service

La **corrosion** dégrade les qualités de résistance mécanique de l'instrument notamment aux tenues à la **température** et à la **pression de service**.

Le choix primordial du matériau détermine la compatibilité à la corrosion, et se détermine à partir de la composition chimique détaillée du produit en contact avec l'instrument.

- Degrés de protection

Tout matériel électrique est protégé par une enveloppe au point de vue poussières, pénétration de l'eau et impacts mécaniques externes, dont les degrés de protection sont indiqués par les codes :

- IP (International Protection)
- IK (Protection mécanique internationale).

## Environnement industriel

- Atmosphères explosives ATEX

**ATEX** est la contraction de **AT**mosphère et de **Explosive**

**Directives ATEX**

Depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2006, les directives

- 1999/92/CE dite ATEX 118a
- 1994/9/CE dite ATEX 100a

sont d'application **obligatoire** sur l'ensemble de la communauté européenne.

La première définit les **prescriptions minimales** visant à améliorer la **protection** en matière de **sécurité** et de **santé** des **travailleurs** susceptibles d'être **exposés** au risque d'atmosphères explosives.

La seconde définit la **conception** et la **construction** du **matériel** utilisable en atmosphère explosible.

## Environnement industriel



- Compatibilité électromagnétique : **CEM**

C'est l'aptitude d'un appareil électrique à fonctionner de façon satisfaisante dans un environnement électromagnétique.

Un appareil, avec ses câbles d'alimentation et de signaux, doit être immunisé au mieux à un environnement électromagnétique et ne doit pas générer de perturbations électromagnétiques nocives à son environnement.

**Normes CEM :**

La directive européenne **CEM 89/336/CEE** exige que tout produit électrotechnique soit soumis à des essais de résistance au brouillage et d'émissions parasites.

Lorsque l'appareil testé respecte les critères stipulés par les normes, il obtient le marquage CE (Communauté Européenne) attestant de sa conformité CEM avec ces normes.

## Environnement industriel