



2

Capteurs dans l'industrie Agroalimentaire

Les capteurs

□ Les capteurs

Le capteur est un dispositif qui présente une caractéristique de nature *électrique* (s); soumis à l'action d'un **mesurande** (m) de nature *non-électrique* :

Mesurande : grandeur que l'on veut mesurer (débit, température, pression...)

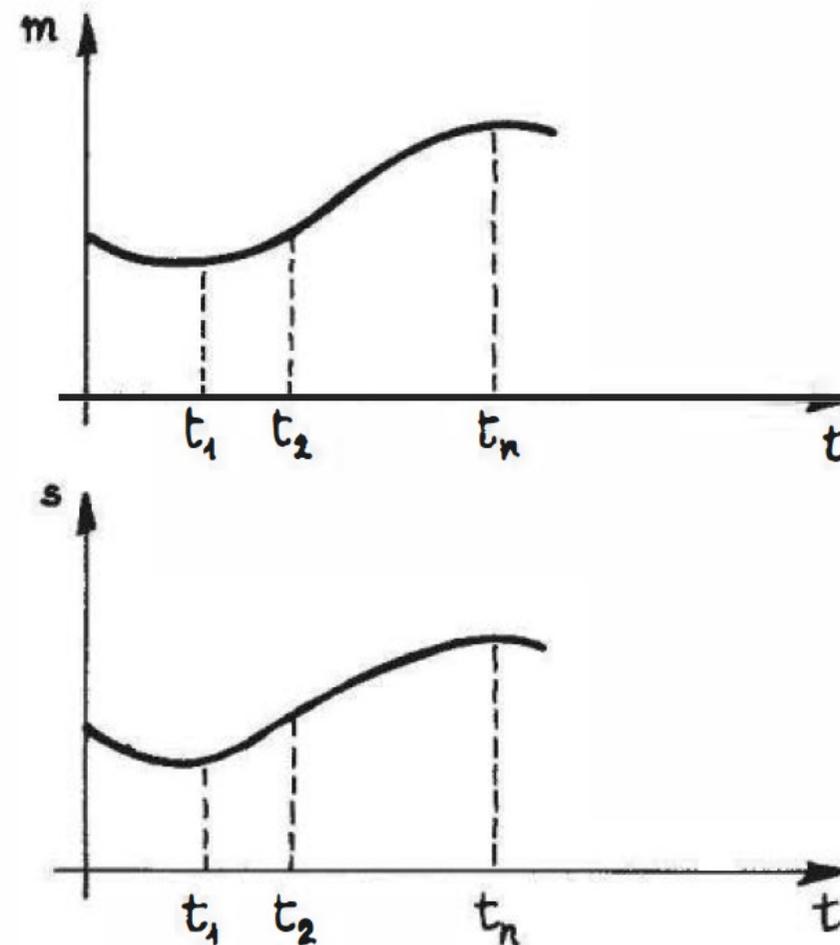
Grandeur d'entrée ou excitation

↑

$s = f(m)$

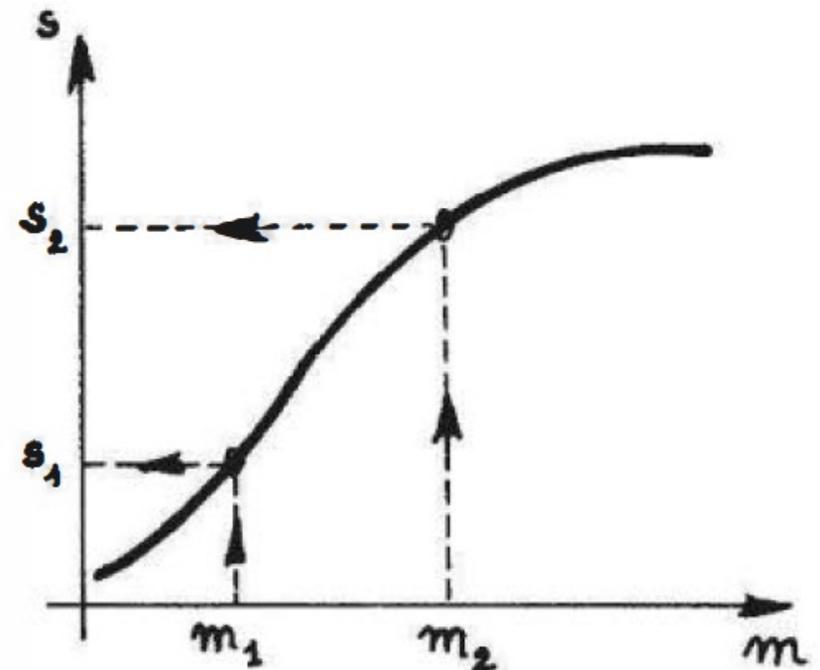
↓

Grandeur de sortie ou réponse du capteur

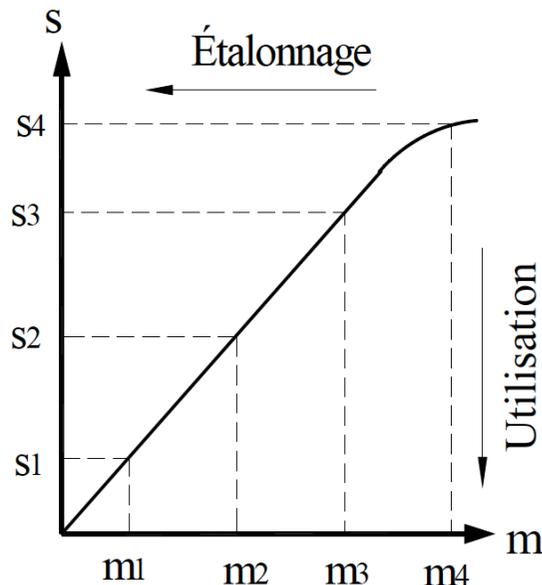


- Pour tout capteur la relation $s = f(m)$ sous sa forme numériquement exploitable est explicitée par étalonnage. Pour tracer la courbe :

Avoir un ensemble de valeurs de m connues avec précision, on mesure les valeurs correspondantes de s .



Toute valeur mesurée de s , permet d'associer la valeur de m qui la détermine (calculée)



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

$$\Delta s = S \times \Delta m$$



La *sensibilité* du capteur

□ En tant qu'élément de circuit électrique, le capteur se présente, vu de sa sortie :

Capteur **actif**

Soit comme un *générateur*, s est :
une charge, une tension ou un courant

Il **transforment** directement la grandeur physique en grandeur électrique. Cette forme d'énergie est propre au mesurande.
Ex: un thermocouple



Il transforme directement la "température" en tension électrique).

Capteur **passif**

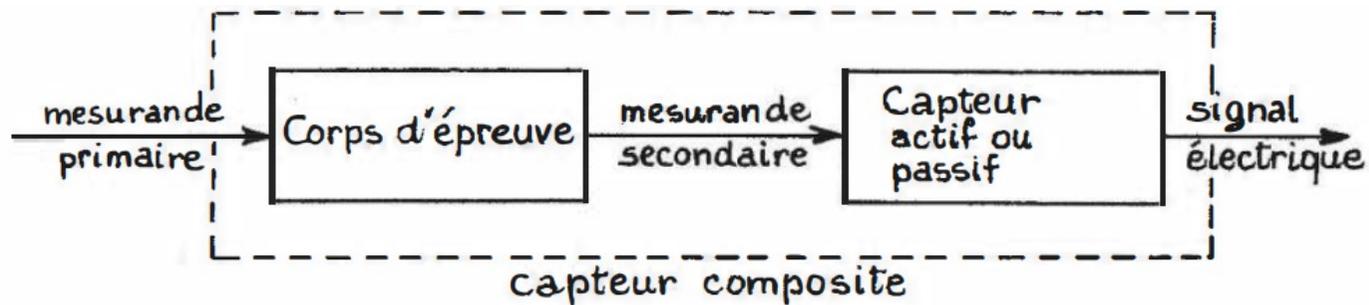
Soit comme une *impédance*, s est :
une résistance, une inductance ou une capacité

Il **utilisent** un élément *intermédiaire* qui réagit au phénomène physique et une alimentation électrique extérieure pour obtenir un signal électrique. Ex. un potentiomètre



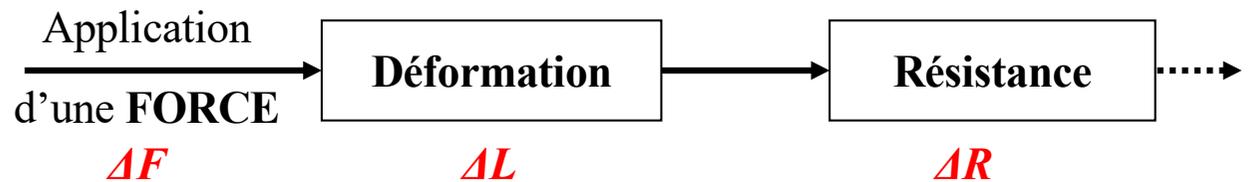
□ Corps d'épreuve (capteurs composites)

Est un dispositif, soumis au *mesurande étudié*, il assure une **première traduction** en une autre *grandeur physique non-électrique* (**mesurande secondaire**), qu'un capteur adéquat traduit (**2^{ème} traduction**) en *grandeur électrique*.



Exemple 1 :

Capteur de *force résistif*



Exemple 2 : Microphone

La **membrane** d'un microphone électrodynamique est un **corps d'épreuve** car c'est de son *mouvement*, conséquence de la **pression acoustique** à laquelle elle est soumise, que résulte le **signal électrique**.

❑ Le positionnement

Les options pour le positionnement des capteurs peuvent être résumées comme suit :

« Off-Line »

«hors-ligne » Les échantillons sont retirés du process et analysés dans un laboratoire **extérieur** à la ligne. Une analyse hors-ligne induit toujours des temps de **latence** entre la détection du défaut et la prise de mesures pour contrer les irrégularités

«at-ligne»

« à-ligne les échantillons sont également retirés du flux du process, mais ils sont analysés avec des équipements d'analyse qui se trouvent à **proximité** de la ligne (dans le même atelier). Les équipements analytiques des contrôles « *At-line* » permettent généralement un temps de contrôle plus rapide. Ces contrôles sont toutefois **moins sensibles et précis** que les appareils de laboratoire.

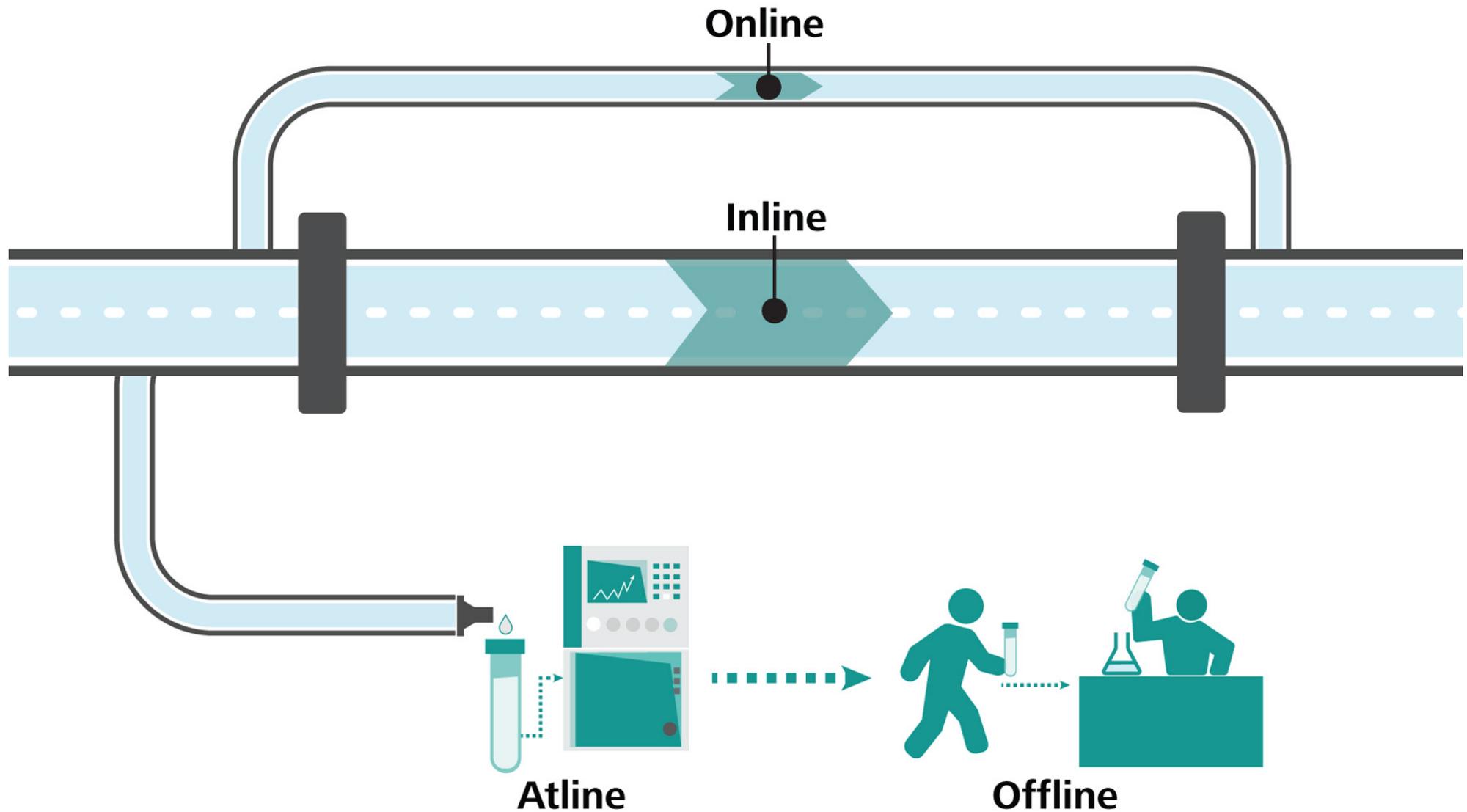
«On-ligne»

«sur-ligne » les échantillons ne sont pas totalement enlevés du flux du process ; ils sont temporairement séparés (par exemple, par l'intermédiaire d'un système de **by-pass**). Les échantillons sont transportés vers le dispositif de mesure de la ligne où ils sont **analysés** avant d'être **reconduits sur la ligne** (ou éjectés en cas de détection d'un échantillon non conforme).

«In-ligne»

«dans-ligne » le capteur est intégré directement **dans la ligne**, il est en contact direct avec les produits.

Voir thèse régulation P141



Principales exigences :

- ✓ Une tête de détection hygiénique et sans contaminant (réactifs...)
- ✓ Peu d'entretien requis
- ✓ Pas danger potentiel provenant de corps étrangers (ex. pas de composants en verre)
- ✓ Robustes pour résister aux températures ou pressions de traitement (ex. 200°C et 10 MPa dans des extrudeuses pour cuiseurs)
- ✓ Capable de résister aux produits chimiques contenus dans les composants alimentaires ou les effluents
- ✓ Tolérante au nettoyage sur place ou avec des têtes de détection jetables, faciles à remplacer
- ✓ Fiable avec une bonne reproductibilité, même exposé à l'humidité, la vapeur, la poussière, ou à l'encrassement par des graisses, des protéines ou des amidons
- ✓ Résistance à l'électromagnétiques et résistant aux vibrations mécaniques
- ✓ Coût total soit proportionnel aux avantages obtenus.

□ Exemples de paramètres mesurés et de types de capteurs utilisés dans le contrôle de processus alimentaires

Paramètres	Capteur/type d'instrument	Exemple d'application
Densité apparente	Détecteur d'ondes radio	Granules, poudres
Caféine	Détecteur proche infrarouge	Traitement du café
Couleur	Détecteur ultraviolette, visible et proche infrarouge	Tri à couleurs, imagerie pour identifier les aliments ou mesurer les dimensions

Parameter	Sensor/instrument type	Examples of applications
Temperature	Thermocouples, resistance thermometers, near infrared detector (remote sensing and thermal imaging), fibre-optic probe with fluorescent tip	Heat processing, refrigeration, etc.
Turbidity	Absorbance meter	Fermentations, sugar processing
Valve position	Proximity switch	Most processes
Viscosity	Mechanical resonance dipstick	Dairy products, blending
Water content	Near infrared detector, microwaves (for powders), radio waves, NMR	Baking, drying, etc.
Water quality	Electrical conductivity	Beverage manufacture
Weight	Strain gauge, load cell	Accurate measurement of tank contents, check-weighers

Parameter	Sensor/instrument type	Examples of applications
Bulk density	Radiowave detector	Granules, powders
Caffeine	Near infrared detector	Coffee processing
Colour	Ultraviolet, visible, near infrared light detector	Colour sorting, optical imaging to identify foods or measure dimensions
Conductivity	Capacitance gauge	Cleaning solution strength
Counting of food packs	Ultrasound, visible light	Most applications
Density	Mechanical resonance dipstick, gamma-rays	Solid or liquid foods
Dispersed droplets or bubbles*	Ultrasound	Foams
Fat, protein, carbohydrate content	Near infrared detector, microwaves	Wide variety of foods
Fill level (liquids or solids)	Ultrasound, mechanical resonance dipstick	Most processes
Flow rate (mass or volumetric)	Mechanical or electro-magnetic flowmeters, magnetic vortex meter, turbine meter, ultrasound, mechanical resonance dipstick, Coriolis meters	Most processes

Foreign body detection	X-rays (with imaging techniques), electromagnetic induction (metallic objects)	Most processes
Headspace volatiles	Near infrared detector	Canning, MAP
Humidity	Hygrometer, capacitance	Drying, freezing, chill storage
Interface between liquid and foam	Ultrasound	Foams
Level	Capacitance, nucleonic, mechanical float, vibronic, strain gauge, conductive level, static pressure, ultrasonic	Automatic filling of tanks and process vessels
Packaging film thickness	Near infrared detector	Many packaging applications: laminates
Particle size, shape, distribution	Radiowave detector	Dehydration
pH	Electrometric	Most liquid processing
Powder flow*	Acoustic emission monitoring	Dehydration, blending
Pressure or vacuum	Bourdon gauge, strain gauge	Concentration by boiling, extrusion, canning

Caractéristiques métrologiques des capteurs

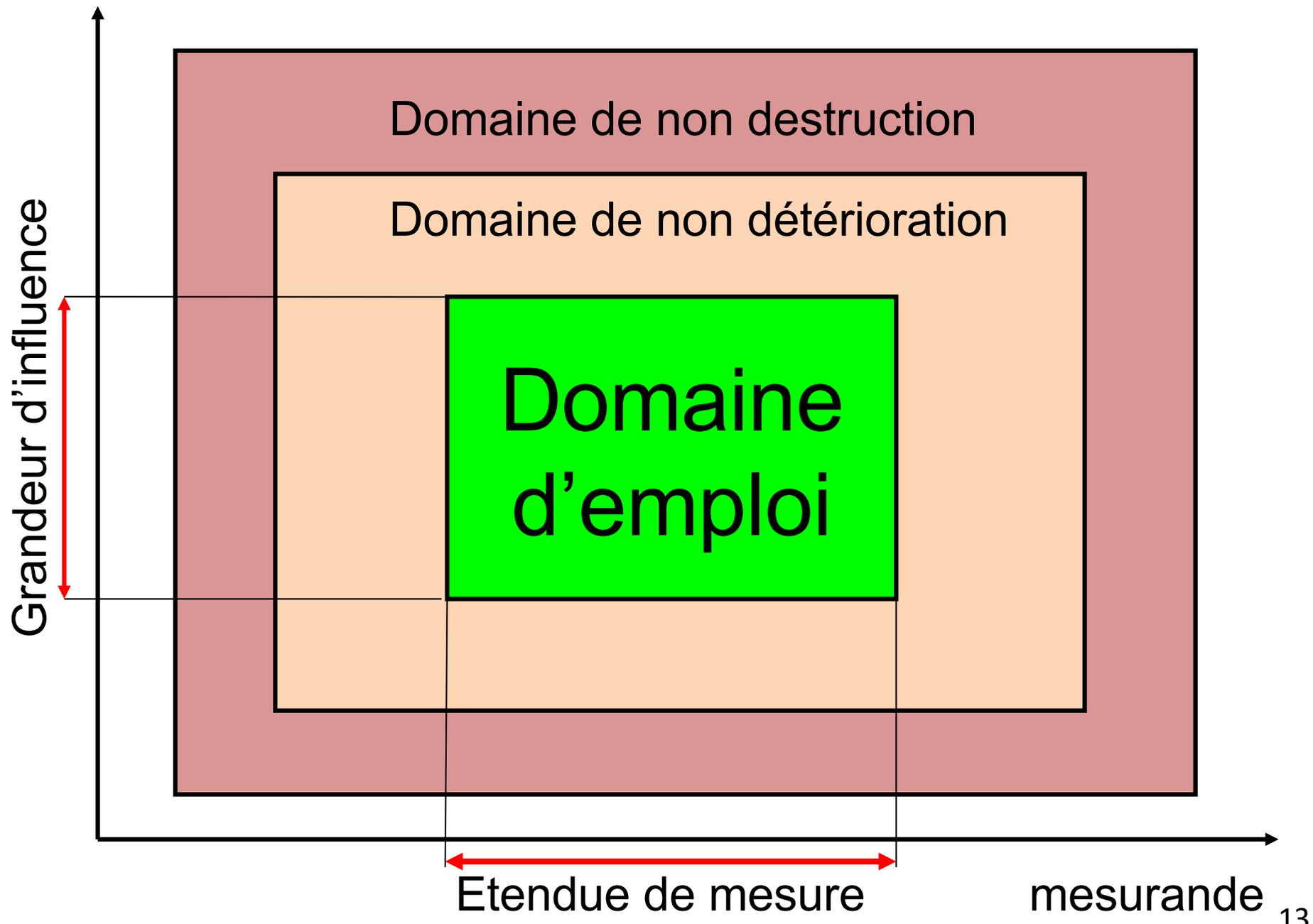
□ On caractérise un *capteur* selon plusieurs critères :

- ✓ Grandeur physique mesurée
 - ✓ Etendue de mesure
 - ✓ Domaine d'emploi
 - ✓ Domaine de non détérioration
 - ✓ Domaine de non destruction
 - ✓ Sensibilité
 - ✓ Fidélité, Justesse, Précision
 - ✓ Résolution
 - ✓ Temps de réponse
 - ✓ Bande passante
-
- ✓ **Grandeur physique mesurée** : un capteur est caractérisé par la grandeur physique qu'il est sensé mesurer. Le nom du capteur est alors lié à cette grandeur :
 - Capteur de température; Capteur de pression; Capteur de force; Etc..
 - ✓ **Etendue de mesure**: Domaine de mesure pour lequel les indications du capteur ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée. On appelle les valeurs limites du domaine, « portée minimale » et « portée maximale »...
 - Ex. etendue de mesure d'un capteur de pression de 1 à 25 bar

- ✓ **Domaine d'emploi** : Il est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre, d'une part la *grandeur à mesurer*, d'autre part les *grandeurs d'influence*, sans que les caractéristiques métrologiques du capteur soient modifiées (les erreurs éventuelles ne dépassent pas les valeurs maximales tolérées de la documentation).
 - Ex. Domaine d'emploi du capteur de P est de 1 à 25 bar pour des T entre 0 et 45 °C

- ✓ **Domaine de non détérioration**: Il est limité par les valeurs extrêmes que peuvent prendre la grandeur à mesurer et les grandeurs d'influence sans que les caractéristiques ne soient altérées après retour dans le domaine nominal d'emploi. Dans la plage de non-détérioration, le constructeur ne garantit plus les performances du capteur (ce qui ne signifie pas nécessairement qu'elles soient dégradées).

- ✓ **Domaine de non destruction**: Il précise les limites que pourront prendre les grandeurs à mesurer et d'influence sans destruction du capteur, mais avec une *détérioration certaine et permanente* de ses caractéristiques métrologiques.
 - Quand, par accident, un capteur est utilisé dans ce domaine, même pendant une courte durée, il est indispensable de procéder ensuite à un *réétalonnage* complet du capteur.
 - Si l'utilisation se fait hors des limites du domaine de non destruction, l'altération est irréversible.



✓ Résolution

La résolution d'un appareil est la plus petite variation de mesure qu'il peut déceler.

Exemple : Pour un capteur de pression ----- Résolution = 0.05 bar

✓ Sensibilité

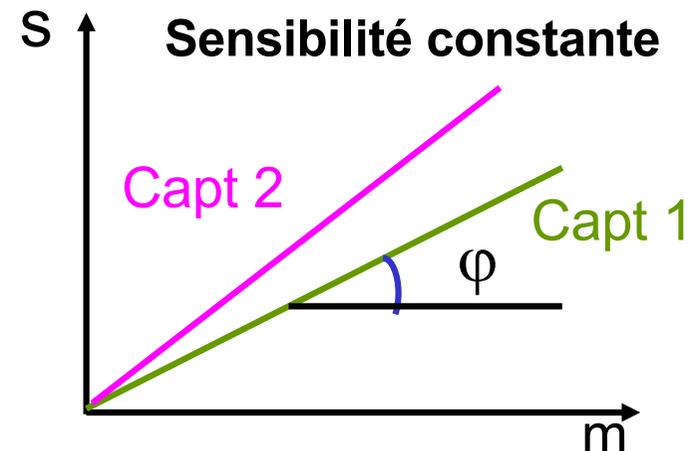
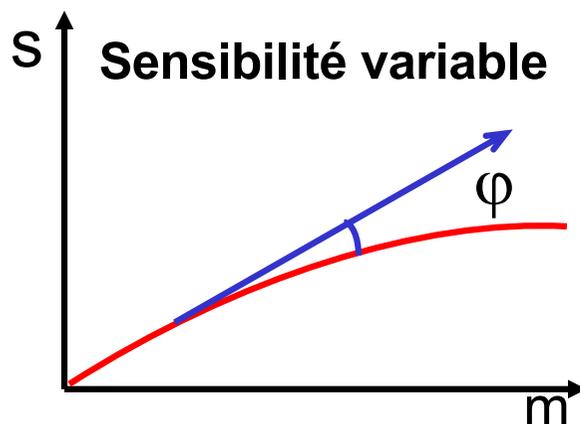
C'est le rapport de la variation du signal de sortie s par rapport à la variation correspondante m de la grandeur à mesurer. C'est à dire à la pente de la courbe de réponse du capteur pour une valeur donnée :

$$S = ds/dm = \text{tg} (\varphi)$$

ds : variation de sortie

dm : variation de l'entrée

Capteur 2 est plus sensible que le **capteur 1**



Fidélité - justesse - précision

Les erreurs accidentelles entraînent une *dispersion* des résultats lors de mesures répétées ;



Leur traitement statistique permet de :

- connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée ;
- fixer les limites de l'incertitude.



Sont indépendantes, la probabilité d'apparition des différents résultats satisfait habituellement à la loi normale (loi de Gauss).

La probabilité $P(m_1, m_2)$ d'obtenir comme résultat d'une mesure une valeur du mesurande comprise entre deux valeurs m_1 et m_2 peut s'écrire :

$$P(m_1, m_2) = \int_{m_2}^{m_1} p(m) dm$$

Où $p(m)$ est la **densité de probabilité** pour la valeur m du mesurande.

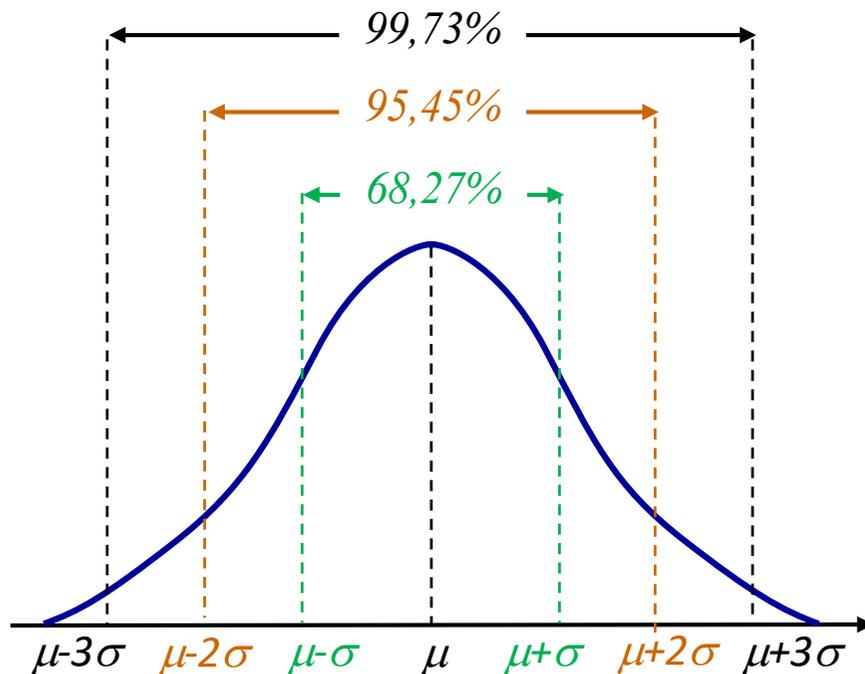
Dans le cas de la loi de Gauss :

$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(m - \bar{m})^2}{2\sigma^2} \right\}$$

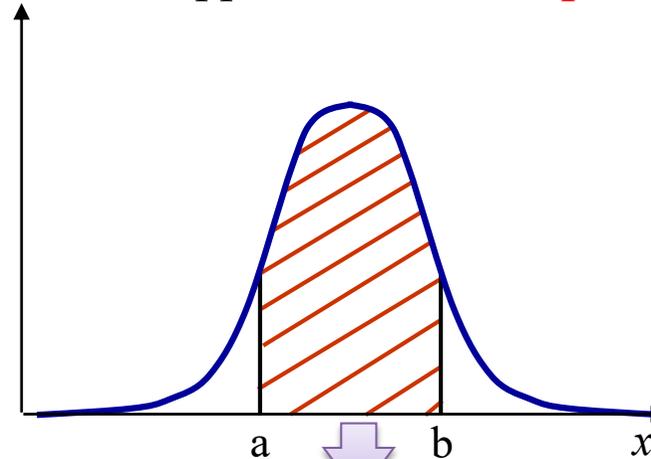
La valeur de m la plus probable est \bar{m}

La probabilité d'apparition d'un résultat de mesurage dans les limites indiquées est :

$$P(\bar{m} \pm \sigma) = 68,27 \quad P(\bar{m} \pm 2\sigma) = 95,45 \quad P(\bar{m} \pm 3\sigma) = 99,73$$



$f(x)$ → Appelée **densité de probabilité**



$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx = P(X \leq b) - P(X \leq a)$$

**Pour faire des calculs avec une loi $N(\mu ; \sigma)$, on se ramène à la loi $N(0 ; 1)$.
Donc on doit **centrer et réduire X**.**

- La variable **centrée réduite** associée à la variable aléatoire X est la variable : $Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$
- La variable Z suit la loi normale $N(0 ; 1)$ dont les paramètres sont $\mu = 0$ et $\sigma = 1$

□ Calcul des probabilités avec la loi normale centrée réduite



Rappelez vous que l'intégrale de $f(x)$ n'est pas nécessaire pour le calcul des valeur de probabilité $P(X \text{ ou } Z)$, ces dernière peuvent être déterminées à partir de cette tables **tables**.

z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7291	0,7325	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1,0	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2,0	0,9772	0,9778	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986

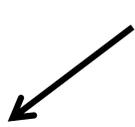
Pour $P(Z \leq 1,24)$

Exemple

On suppose que la variable X suit $N(11; 2)$. Quelle proportion d'individus est-ce que $X \leq 14$?

On va chercher : $P(X \leq 14) \Leftrightarrow P\left(Z \leq \frac{14-11}{2}\right) \Leftrightarrow P(Z \leq 1.5)$

On centrer et réduire X



De la table : $P(Z \leq 1.5) = 0.9332$ Donc : $P(X \leq 14) = 0.9332$

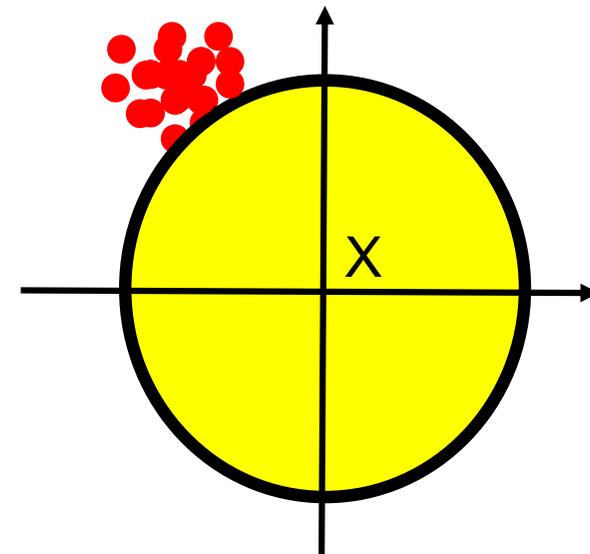
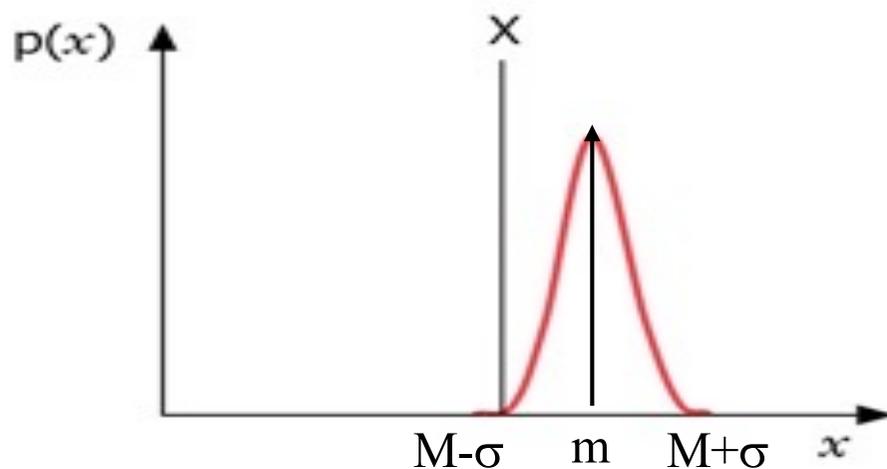
Pour 93.3 % des individus, la variable X est inférieure à 14.

✓ Fidélité

- La fidélité est la faculté d'un instrument à donner des mesures répétables (les erreurs accidentelles sont faibles).

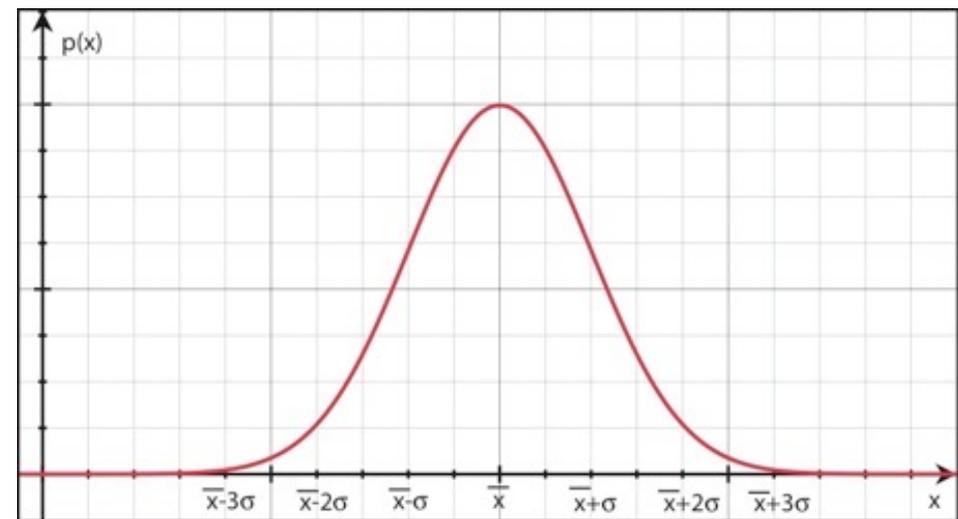
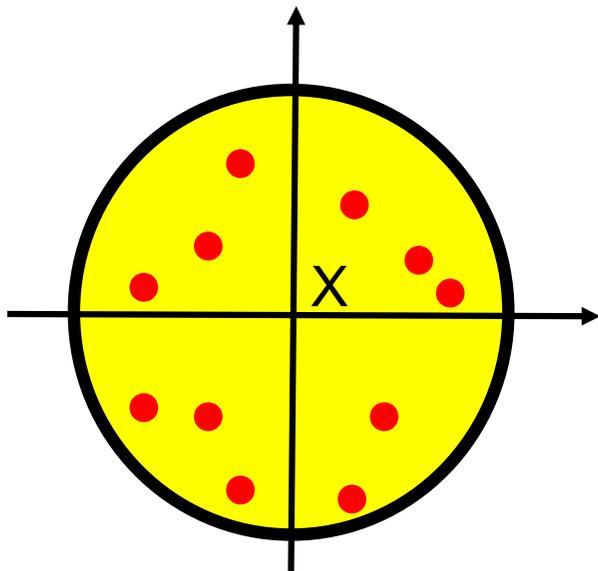
L'écart type est souvent considéré comme l'erreur de fidélité : il permet ainsi une appréciation quantitative de la fidélité.

Les erreurs accidentelles sont faibles : elle se traduit par des résultats de mesurage groupés autour de leur valeur moyenne



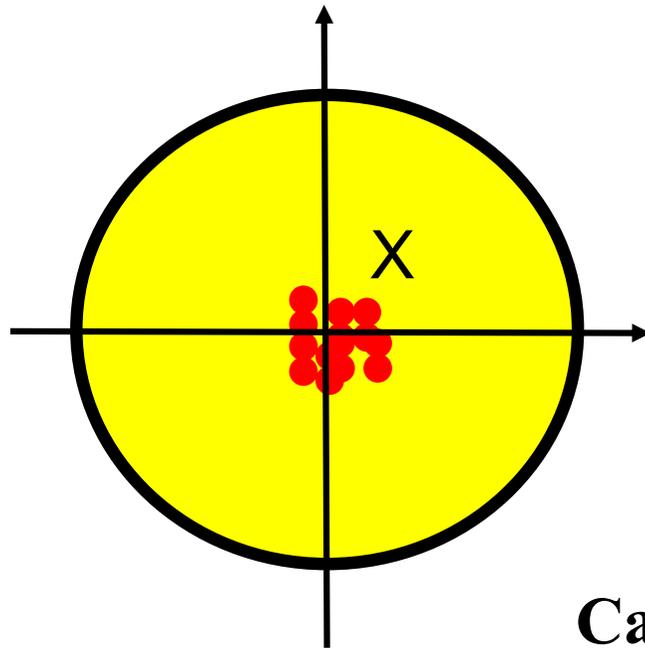
✓ Justesse

- Aptitude d'un capteur à délivrer une réponse très proche de la vraie valeur (moyenne est proche de la valeur vraie)
- Elle est liée à la moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures par rapport à la valeur réelle.
- Elle est représentée la reproductibilité de l'instrument.

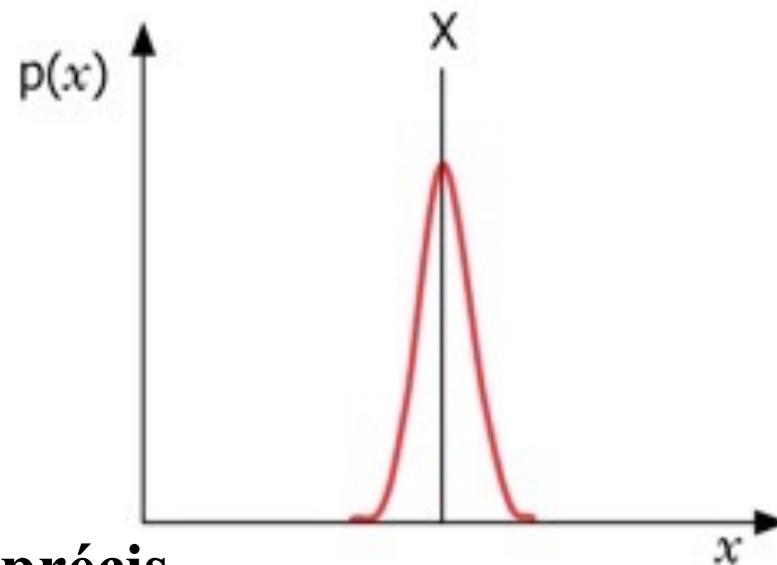


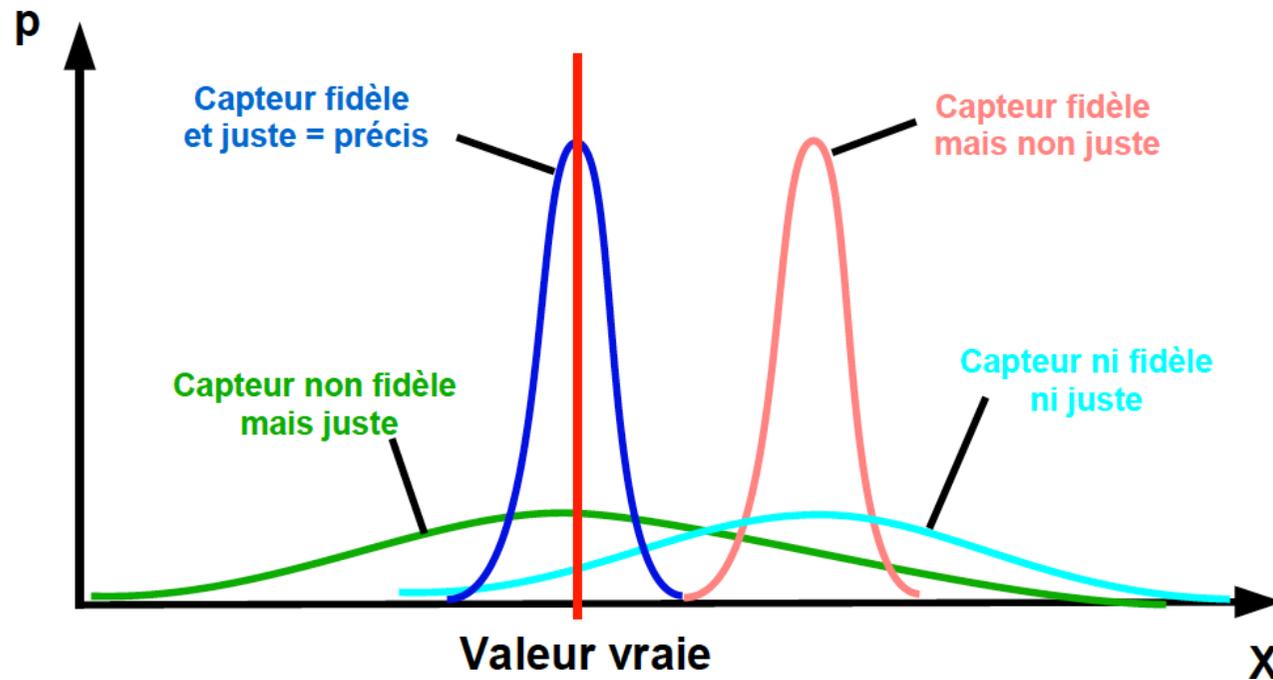
✓ Précision

- Elle correspond à l'écart en % entre la valeur réelle et la valeur correspondante fournie par le capteur. Elle correspond aussi à la plus grande erreur possible du capteur sur son étendue de mesure. On exprime très souvent la précision en pourcentage de l'étendue de mesure. Exemple: Capteur de température
 - Etendue de mesure: 0-50 °c
 - Erreur maximale: 0,25 °c
 - précision = $(0,25 / 50) * 100 = 0,5 \%$

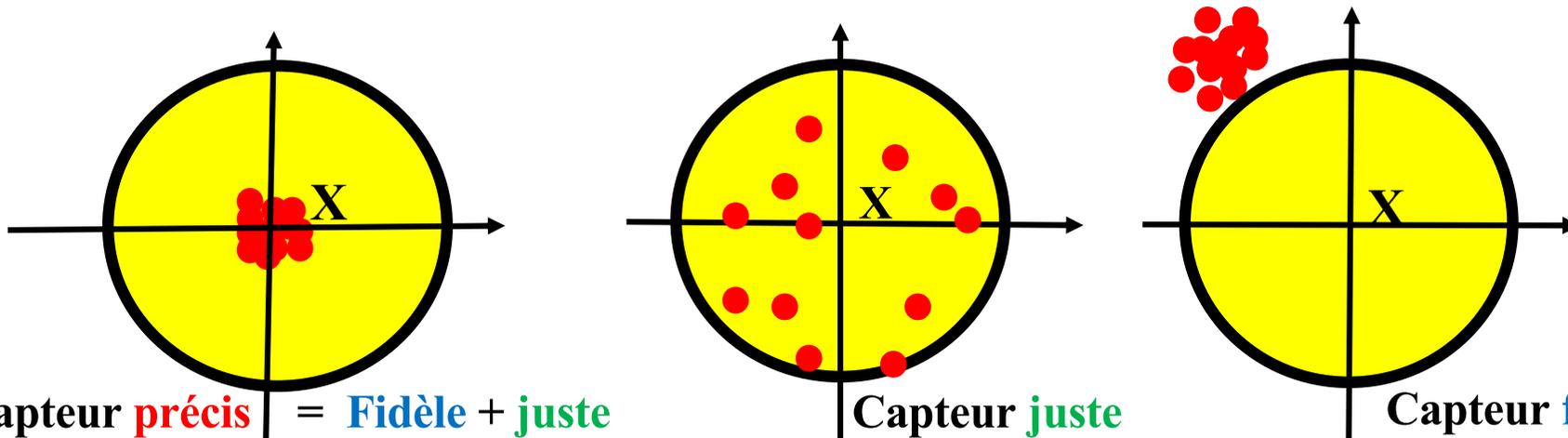


Capteur précis





Un capteur est **précis** s'il est **juste** et **fidèle**



Capteur **précis** = **Fidèle** + **juste**

Capteur **juste**

Capteur **fidèle** 22

CARACTÉRISTIQUES MÉTROLOGIQUES

❑ Notion d'erreur

Les erreurs de mesures peuvent être dues :

- à l'instrument de mesure,
- à l'opérateur,
- ou à la variabilité de la grandeur mesurée.

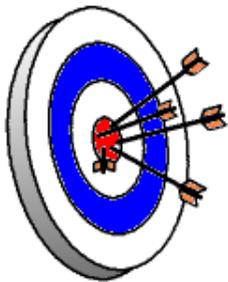
On classe les erreurs de mesures en 2 catégories :

L'erreur de mesure aléatoire

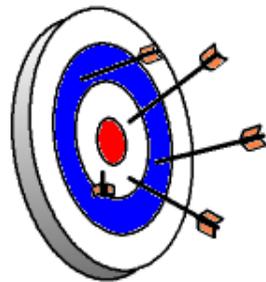
Lorsqu'un même opérateur répète plusieurs fois le mesurage d'une même grandeur, les valeurs mesurées peuvent être différentes. La dispersion des valeurs mesurées est due à la qualité du mesurage réalisé par l'opérateur, à la qualité de l'instrument de mesure.

L'erreur de mesure systématique

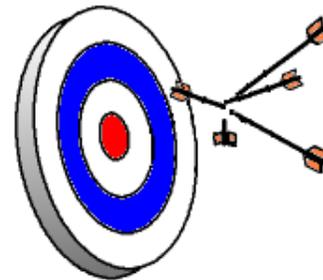
Un appareil défectueux, mal étalonné ou utilisé incorrectement conduit à des valeurs mesurées proches les unes des autres mais éloignées de la valeur vraie.



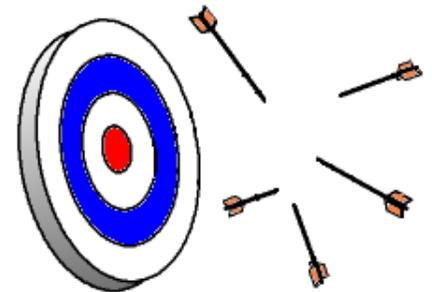
Faible erreur aléatoire



Erreur aléatoire importante



Erreur systématique importante, mais faible erreur aléatoire



Erreurs systématique et aléatoire importantes

CARACTÉRISTIQUES MÉTROLOGIQUES

■ Les erreurs de mesure

- ✓ Les seuls mesurands dont la valeur est parfaitement connue sont les **grandeurs étalons** car leur valeur est fixée par convention.
- ✓ La valeur ne peut être connue qu'après traitement par une chaîne de mesure

C'est la valeur **vraie** du mesurand qui détermine *l'excitation du capteur*



L'expérimentateur n'a accès qu'à la réponse globale de la chaîne de mesure : cette réponse est la valeur mesurée.

L'**écart** entre valeur mesurée et valeur vraie est *l'erreur de mesure*

- ✓ Due en particulier aux imperfections de la chaîne de mesure qui dégradent l'information du signal au cours de son traitement
- ✓ Cependant, une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire l'erreur de mesure et donc *l'incertitude* sur la valeur vraie.

■ Erreurs systématiques

Une erreur systématique est soit constante, soit à variation lente par rapport à la durée de mesure : elle introduit donc un décalage constant entre valeur vraie et valeur mesurée.

Etablie par l'écart entre les valeurs les plus probables tirées de deux séries de mesurages portant sur le même mesurande et effectuées par des méthodes et instruments différents.

✓ Erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence

Ce type d'erreur peut être réduit par la vérification soignée des appareillages associés.
Ex: Décalage du zéro d'un appareil de mesure

Erreur sur la sensibilité ou sur la courbe d'étalonnage.

✓ Erreurs sur les caractéristiques du capteur

✓ Erreurs dues au mode ou aux conditions d'emploi

Erreur de rapidité ou de finesse : la vitesse de réponse d'un capteur et de l'équipement associé. Ex: Sonde de température placée dans un fluide au repos ou en mouvement.

■ Erreurs accidentelles

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

1. Erreurs liées aux indéterminations intrinsèques des caractéristiques instrumentales

Erreur de mobilité

Spécifiée comme la variation maximale du mesurande qui n'entraîne pas de variation détectable de la grandeur de sortie du capteur (signal électrique).

Erreur de lecture

Dépend de l'opérateur mais aussi, d'autre part, de la qualité de l'appareil: finesse de l'aiguille par exemple.

Erreur de quantification d'un convertisseur analogique-numérique

L'opération de quantification attribue une valeur unique à l'ensemble des valeurs analogiques comprises dans une plage correspondant à un bit de poids le plus faible

Erreur d'hystérésis

Lorsque l'un des éléments de la chaîne de mesure comporte un composant présentant de l'hystérésis sa réponse dépend, dans une certaine mesure, de ses conditions d'utilisation antérieures.

Exemple

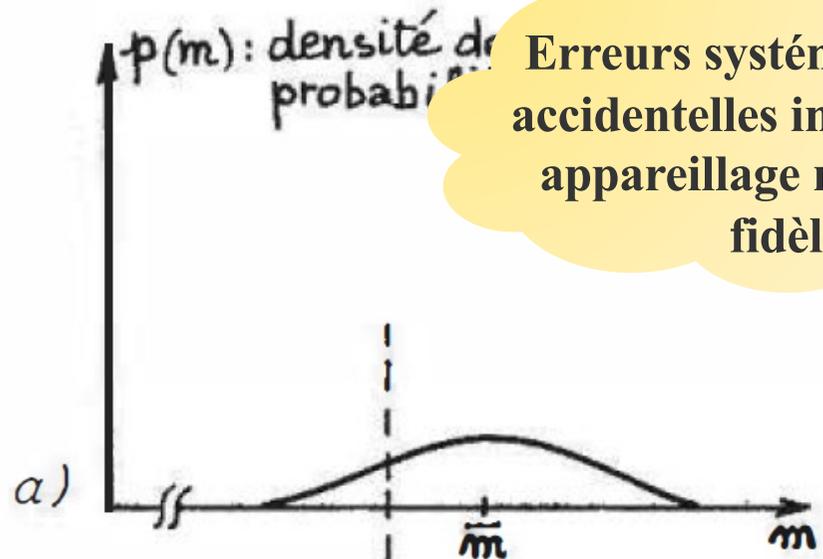
Mesure T par un capteur comportant une protection en plastique (Pt 100 surmoulée);
l'échange thermique :
mesurande ↔ *protection* ↔ *capteur*
Pt100 donne une T_i différente si vous réalisez une étude par T croissante puis par T décroissante.

2. Erreurs dues à la prise en compte par la chaîne de mesure de signaux parasites de caractère aléatoire :

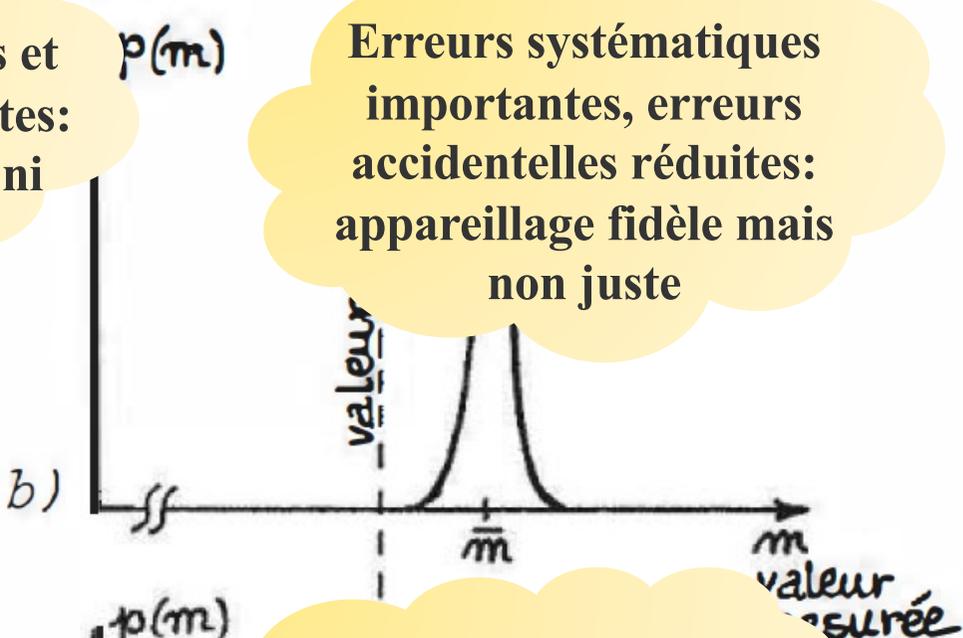
- ✓ Bruit de fond
- ✓ Inductions parasites
- ✓ Fluctuations de tension des sources d'alimentation

3. Erreurs dues à des grandeurs d'influence :

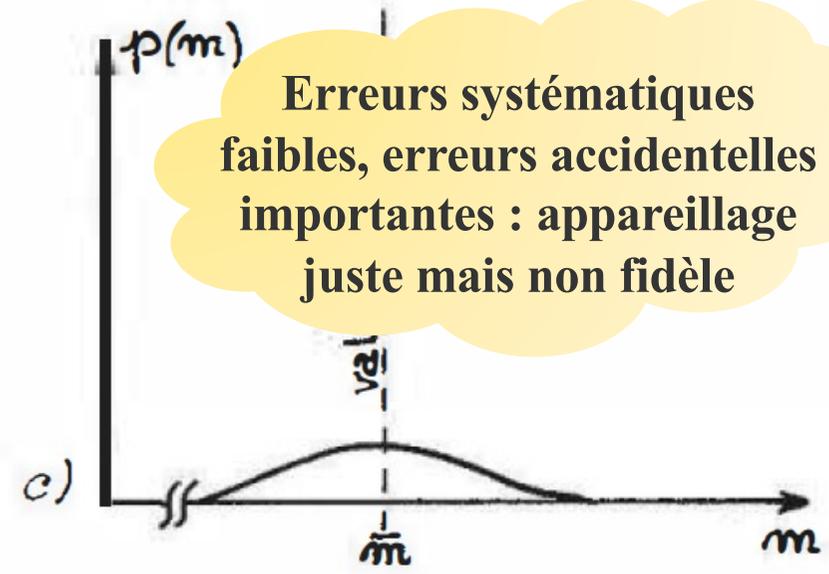
Lorsque les variations de grandeurs d'influence ne sont pas prises en compte lors de l'étalonnage, on peut considérer leur contribution comme étant de caractère aléatoire.



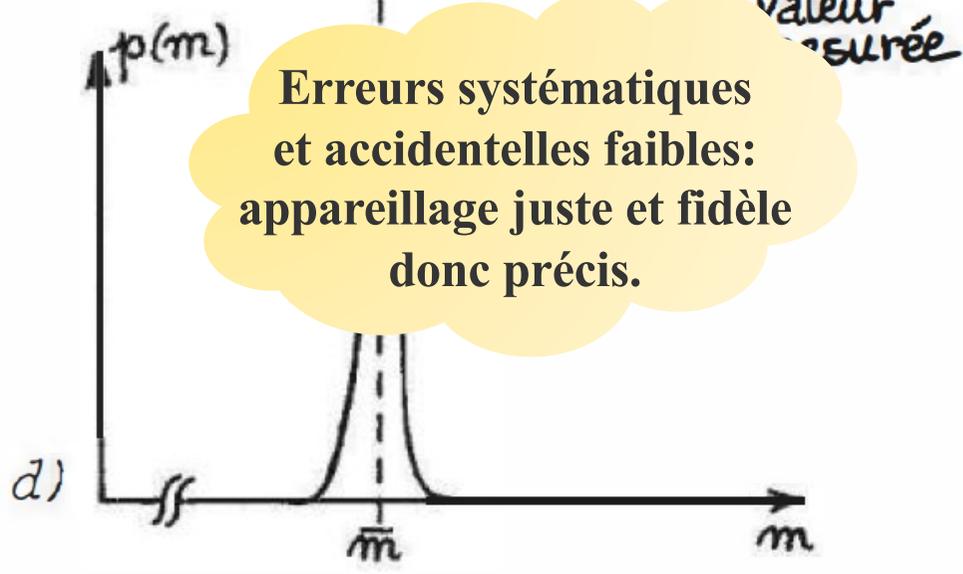
Erreurs systématiques et accidentelles importantes: appareillage ni juste, ni fidèle



Erreurs systématiques importantes, erreurs accidentelles réduites: appareillage fidèle mais non juste



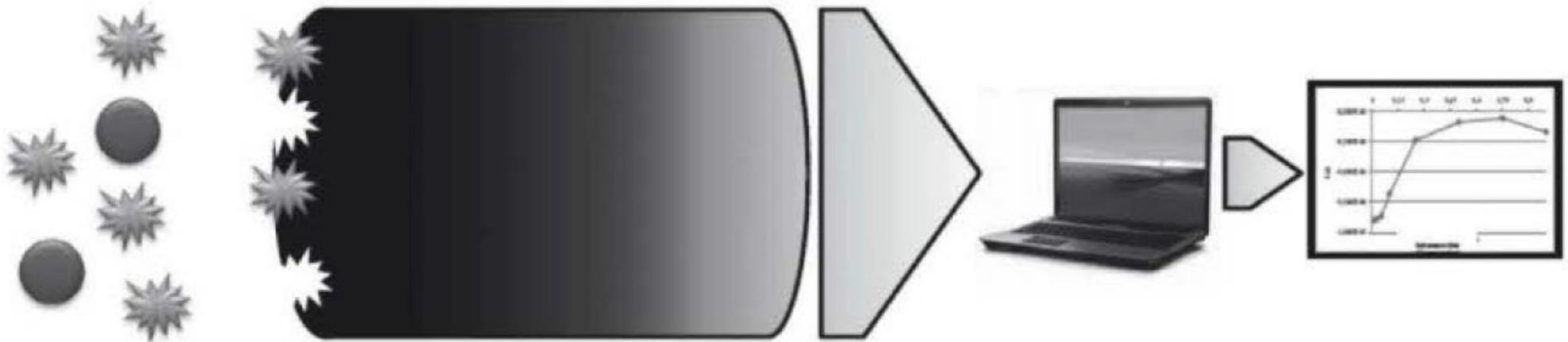
Erreurs systématiques faibles, erreurs accidentelles importantes : appareillage juste mais non fidèle



Erreurs systématiques et accidentelles faibles: appareillage juste et fidèle donc précis.

□ Biocapteurs

Un biocapteur est un *système analytique* formé d'un **récepteur biologique** capable de reconnaître une *substance cible* présente dans un milieu complexe et un **transducteur** qui traduit les *modifications physico-chimiques* engendrées par la *reconnaissance spécifique* en un signal électrique ou optique permettant de mesurer la concentration de la substance cible.



Substance
cible

Reconnaissance
moléculaire

Signal physico-
chimique

Transducteur

Amplificateur
du signal

Traitement du signal

✓ L'élément biologique ou **Biorécepteur** est immobilisé sur ou au contact du transducteur.



Apporte une sensibilité très élevée
par rapport aux capteurs chimiques.



Son utilisation impose des conditions
d'utilisation douces, (pH, T, solvants...)

□ **Biorécepteurs**

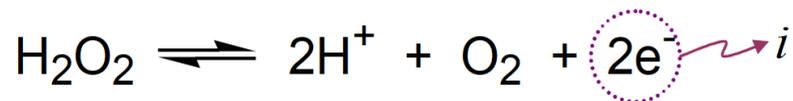
- ✓ Toute structure biologique ayant une capacité de reconnaissance est susceptible d'être utilisée pour la mise en œuvre d'un biocapteur. Ces éléments biologiques sont souvent fragiles et instables
- ✓ Un Biorécepteur permet d'apporter au biocapteur une grande spécificité.

- **Enzymes**

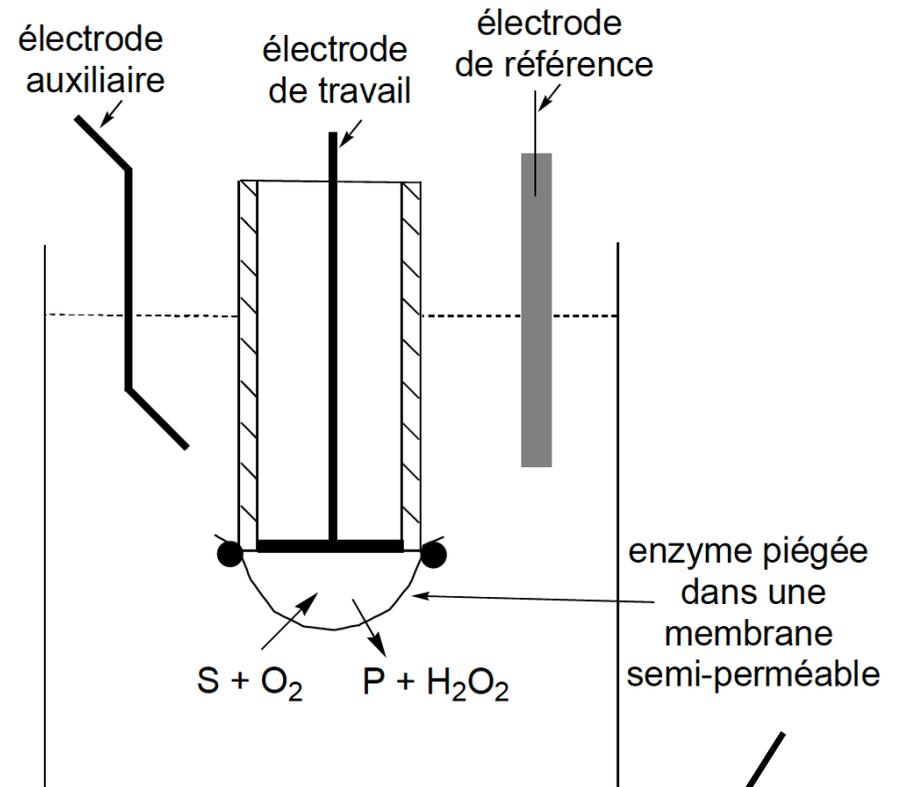
Le premier biocapteur apparu en 1962 (Clark et Lyons) était basé sur l'immobilisation de la glucose oxydase sur une électrode à oxygène (via une membrane semi-perméable) pour mesurer la concentration du glucose dans le sang.

✓ *La conversion* :
D-glucose (S) en Gluconolactone (P) et H₂O₂

DéTECTÉE par
électrochimie



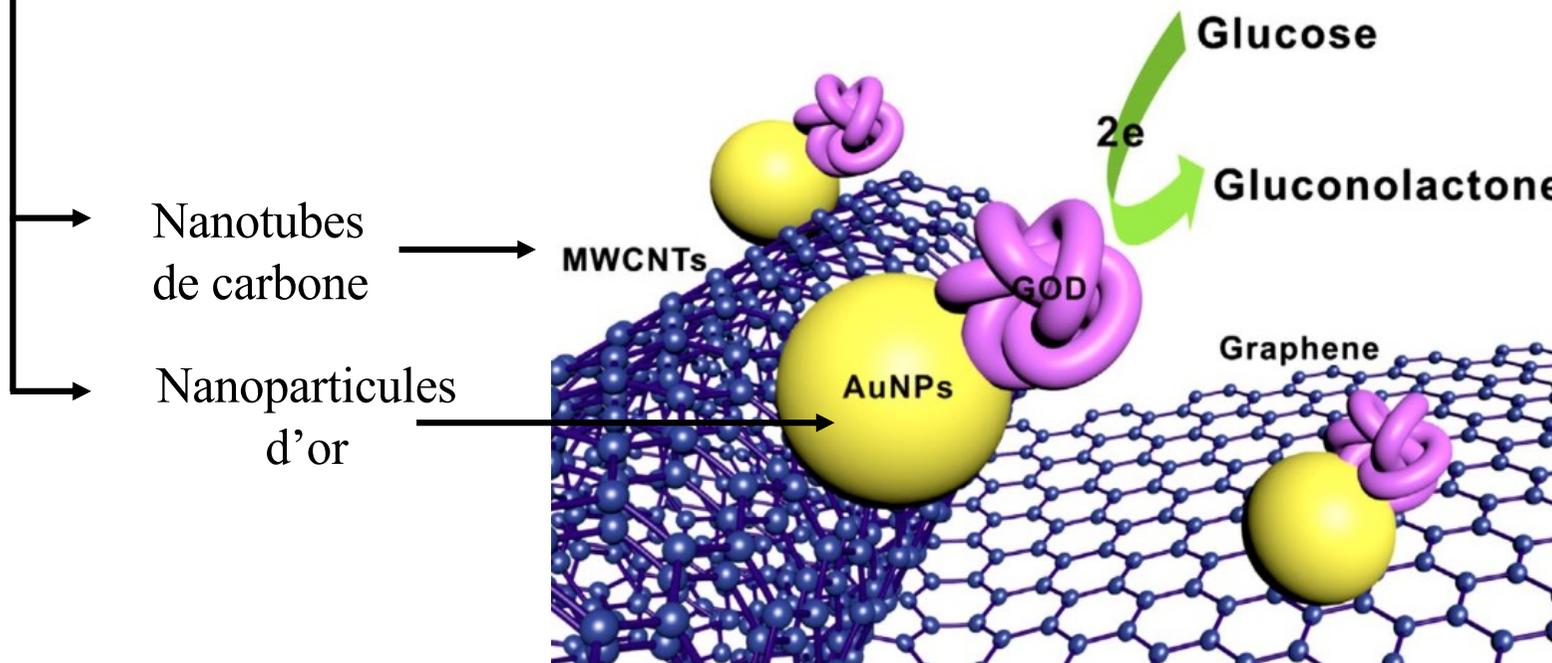
DéTECTÉE par
électrode



Capteur ampérométrique

Les réactions se produisent dans une mince couche à la surface du **transducteur**

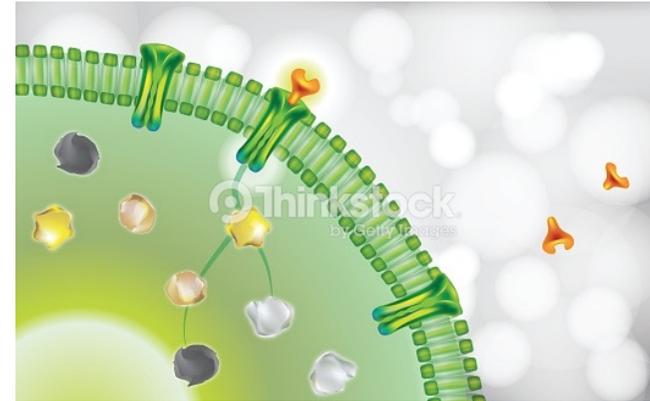
Récemment, des résultats très prometteurs obtenues en utilisant des **nanoparticules métalliques** qui servent de relais électroniques entre l'enzyme et l'électrode.



- ✓ La surface de l'électrode est fonctionnalisée à l'aide de nanoparticule sur lesquelles on greffe l'enzyme
- ✓ Des études spectroscopiques menées sur la glucose-oxydase ont montré que cette technique permet de conserver intact l'enzyme

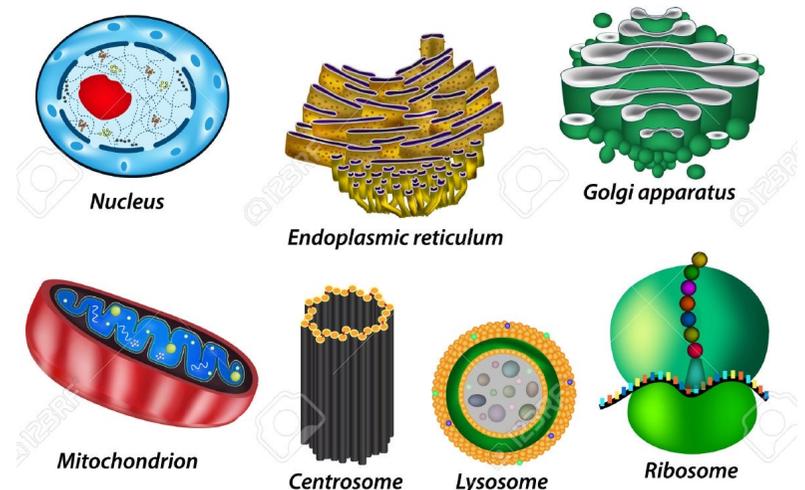
■ Cellules entières

- ✓ Les bactéries et les levures peuvent jouer le rôle d'élément sensible d'un biocapteur.
- ✓ Les cellules sont équipées d'un grand nombre d'enzymes et de récepteurs qui peuvent transformer des signaux chimiques ou biologiques en signaux *électriques* voire *optiques*.
- ✓ Les cellules peuvent être modifiées génétiquement en introduisant un gène *reporter* va produire un signal mesurable (ex. l'émission de lumière) quand il est exposé à une substance cible.



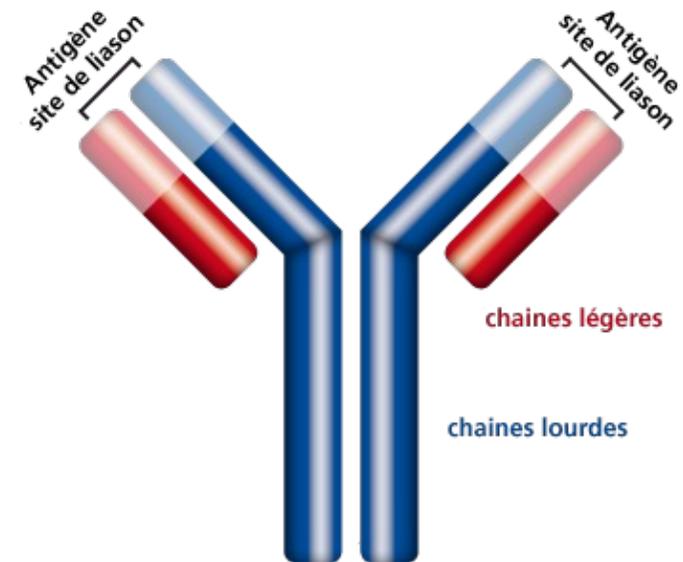
■ Les organites cellulaires

Ces éléments nécessitent un environnement adéquat pour conserver leur intégrité structurale et leur capacité de reconnaissance. Quelques structures cellulaires, comme les chloroplastes, les thylacoïdes... ont été utilisés dans des biocapteurs.



■ Les anticorps

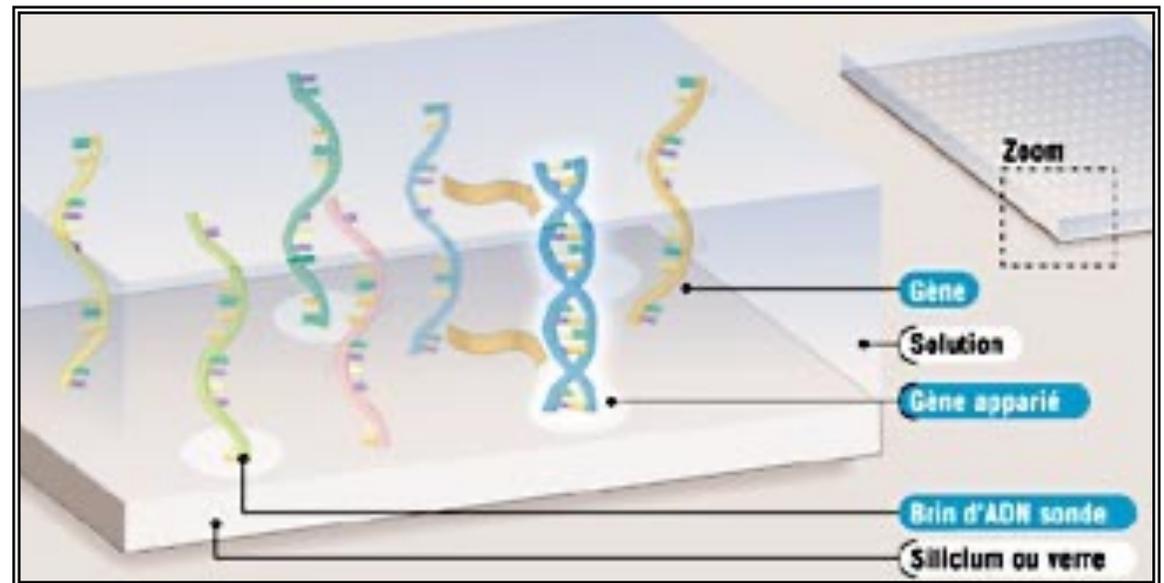
La grande spécificité de l'interaction antigène-anticorps aboutit à des constantes d'affinité très élevées. Lorsque les antigènes sont de faible poids moléculaire, il est assez difficile de les détecter. Il est possible de marquer l'antigène ou l'anticorps avec des chromophores ou avec un deuxième anticorps ...



■ Les acides nucléiques

Un outil très puissant pour la détection de nombreuses bactéries pathogènes dans le domaine agroalimentaire

Le principe est de mesurer *l'hybridation* entre une séquence connue (Biorécepteur) et sa complémentaire (échantillon); détectable à l'aide de marqueurs (fluorophores..)



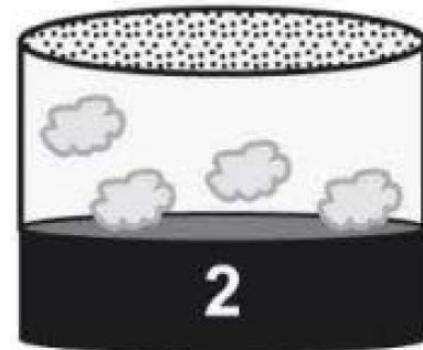
Adsorption

- ✓ Largement utilisée pour fixer des enzymes sur des supports (cellulose, carbone ...).
- ✓ Pas très stable Aux modifications physico-chimiques du milieu (pH, T , sels...)
- ✓ Stabilité améliorée par l'ajout des réactifs (glutaraldéhyde).



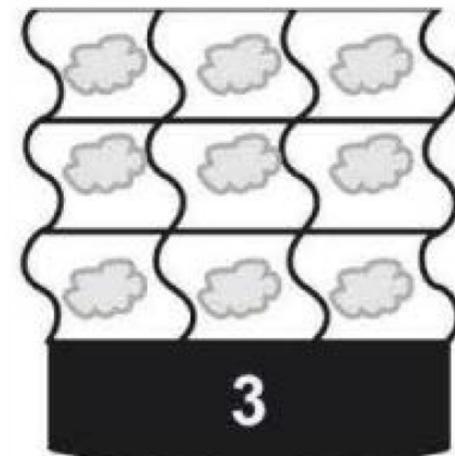
Confinement

- ✓ Biorécepteur en solution dans un compartiment limité par une membrane.
- ✓ Utilisée pour des capteurs à enzymes ou à cellules entières.
- ✓ Problèmes est la conservation de l'activité sur de longues périodes de stockage.



Encapsulation

- ✓ Biorécepteur incorporé dans un gel (polymères de polyvinylalcool modifiés, des algines...)
- ✓ Encapsulation de grandes quantités, augmente la stabilité chimique et thermique et mise en œuvre est facile.
- ✓ Problème de diffusion du substrat vers le site actif des enzymes.

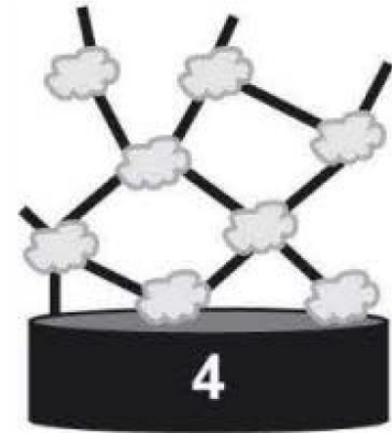


L'immobilisation covalente

Basées sur la réaction entre un groupement fonctionnel du Biorécepteur et des groupements réactifs de la surface solide (liaison covalence).

Pour les protéines (enzymes, anticorps), la fixation se fait par les groupements fonctionnels portés par les chaînes latérales des acides aminés :

- ✓ *Amine* de la lysine
- ✓ *Acide carboxylique* de l'asparcate et du glutamate
- ✓ *Hydroxyle* de la sérine
- ✓ *Thiol* de la cystéine
- ✓ *Phénol* de la tyrosine



Les méthodes d'affinité

La réaction antigène-anticorps est une réaction d'affinité

Avec la biologie moléculaire, il est possible d'obtenir des protéines modifiées génétiquement avec des étiquettes histidine qui peuvent se fixer sur des supports modifiés avec l'acide trinitriloacétique.

Son avantage est la réversibilité de l'immobilisation et sa facilité d'emploi.

