

CAPTEURS

« conditionnement des signaux »

Instrumentation Industrielle

Principes de mesure

Module Capteur : Licence PRO

Présenté par:

ANNECCA Gaëtan

Responsable REGULATION

Papèteries de CLAIREFONTAINE

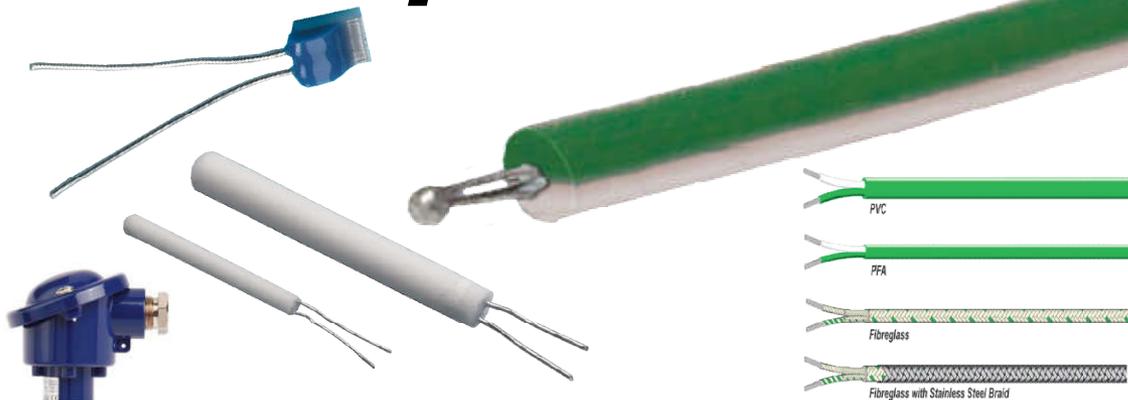
Partie 3 :

Les principes de mesure

- la mesure de température
- la mesure de pression (relative, absolue, différentielle)
- la mesure de niveau hydrostatique
- la mesure de niveau intrusive
- la mesure de niveau non intrusive
- la mesure de débit par pression différentielle
- la mesure de débit par méthode directe
- la mesure de débit sur canaux ouverts

Les principes de mesure

Température



La mesure de température

- **Les résistances thermoélectriques ou RTD**

RTD est l'abréviation de ***Resistance Temperature Detector*** et s'applique à tout capteur de température par variation de résistance ohmique. Le terme RTD correspond à une résistance thermoélectrique, celui de PTRD précise qu'elle est en platine.

Principe

La température d'un ***conducteur électrique*** est liée à sa ***résistance ohmique*** par une fonction généralement non linéaire et dépendant du ***matériau employé***.

Les capteurs de températures RTD les plus connus sont les

- ***thermistances***
- ***résistances thermoélectriques métalliques***

La mesure de température

Les thermistances

CTN : coefficient de température négatif

CTP : coefficient de température positif

Sont des composants **semi-conducteurs** constitués d'un aggloméré de poudres d'oxydes métalliques.

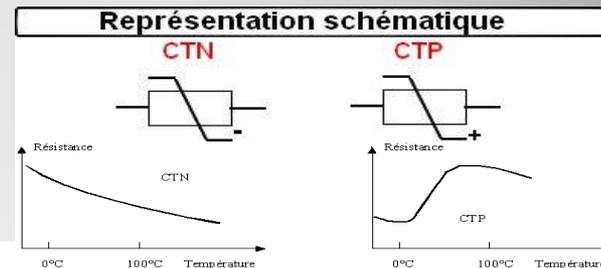
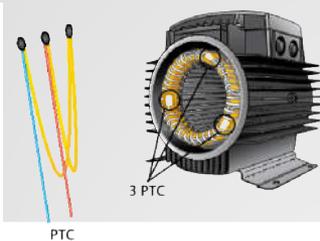
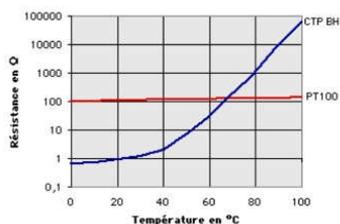
Leur **forte sensibilité thermique** limite leur emploi à une étendue de mesure de l'ordre de **50°C** dans une gamme comprise entre **-100°C et 250°C**.

Les thermistances permettent des mesures ponctuelles de température, et possèdent un **temps de réponse très rapide** (0,01 s).

En revanche, elles résistent mal aux **vibrations** et aux **chocs**, et leur tolérance d'**interchangeabilité** est inférieure à $\pm 10\%$.

Les caractéristiques des thermistances ne sont **pas adaptées** aux mesures de température des procédés industriels.

On les retrouve dans les circuits de compensation de la température de soudure froide des thermocouples, les mesures de T° des enroulements des moteurs électriques, dans les thermostats d'ambiance, dans les platines électroniques de commande des groupes de climatisation, les moteurs des voitures ...



La mesure de température

• **Les résistances thermoélectriques métalliques**

Dans les mesures de température de procédés industriels, les résistances thermoélectriques métalliques sont réalisées en **cuivre**, en **nickel** ou en **platine**.

-50°C	RTD cuivre	180°C
-60°C	RTD nickel	210°C
-250°C	RTD platine	850°C

Les éléments en platine destinés aux applications industrielles sont d'une pureté à **99,99%** et possèdent une très bonne inertie chimique, ce qui garantit à la fois une bonne stabilité de leurs propriétés thermoélectriques, et une excellente précision.

Le platine à une résistivité **six fois** plus grande que celle du cuivre et un coefficient de température satisfaisant bien que non linéaire.

Les RTD cuivre et nickel sont de plus en plus délaissées au profit des sondes en **platine**:

- plus **fiables**, plus **précises**, et possédant une plus **grande étendue de mesure**
- fabrication en plus **grande série** donc **diminution** de leur **coût** (seul inconvénient)

Pt100

Cu100

Ni100

Pt1000

Ni500

Pt25

La mesure de température

- **Les sondes à résistance de platine**

Relation

Selon la norme CEI 751, la relation de la résistance de platine $R(T)$ avec la température T , qui permet de définir sa température à moins de $0,1^\circ\text{C}$ est :

Pour une plage de -200°C à 0°C

$$R(T)/R(0^\circ\text{C}) = 1 + A.T + B.T^2 + C.(T-100).T^3$$

Pour une plage de 0°C à 850°C

$$R(T)/R(0^\circ\text{C}) = 1 + A.T + B.T^2$$

La valeur de la résistance normalisée **Pt100 est $100\ \Omega$ à 0°C** , $R(0^\circ\text{C})=100\ \Omega$

Les coefficients A, B et C sont déterminés par l'étalonnage.

Pour les sondes industrielles, la valeur des coefficients est:

$$A=3,851.10^{-3}\ \text{°C}^{-1}; B=-5,775.10^{-7}\ \text{°C}^{-2}; C=-4,1835.10^{-12}\ \text{°C}^{-4}$$

Le tableau de relation température/résistance (EIT 1990) donne la correspondance entre température et résistance pour des sondes industrielles telles que : **$R(0^\circ\text{C})=100,00\ \Omega$ et $R(100^\circ\text{C})=138,51\ \Omega$**

La mesure de température

- **Les sondes à résistance de platine**

Coefficient de température

Le coefficient de température ou *intervalle fondamental* α définit la valeur moyenne de la variation de la résistance entre **0°C et 100°C** :

$$\alpha = [R(100^\circ\text{C}) - R(0^\circ\text{C})] / [100 \cdot R(0^\circ\text{C})]$$

L'intervalle fondamental, selon la norme européenne, est

$$\alpha = 0,00385055 / ^\circ\text{C}$$

Il existe d'autres valeurs pour α , notamment celle de la norme *américaine* qui annonce **0,003916 / °C**

Résistance nominale

La résistance nominale est la *valeur de la résistance à 0°C*, soit pour une *sonde Pt100* : **$R(0^\circ\text{C}) = 100 \Omega$** .

D'autres valeurs de résistance nominale sont proposées pour les sondes de platine, plus rares : **10Ω, 25Ω, 500Ω, 1000Ω**.

Leur appellation respective est **Pt10, Pt25, Pt500** et **Pt1000**.

Les valeurs élevées permettent de conserver une bonne sensibilité et trouvent leur application aux très basses températures.

La mesure de température

- Extrait de la table de référence d'une sonde Pt100 d'après l'échelle internationale de température 1990 (EIT 90)

°C	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
-200	18,52										
-150	39,72	37,64	35,54	33,44	31,34	29,22	27,10	24,97	22,83	20,68	18,53
-100	60,26	58,23	56,19	54,15	52,11	50,06	48,00	45,94	43,88	41,80	39,72
-50	80,31	78,32	76,33	74,33	72,33	70,33	68,33	66,31	64,30	62,28	60,26
-0	100	98,04	96,09	94,12	92,16	90,19	88,22	86,25	84,27	82,29	80,31
0	100	101,95	103,90	105,85	107,79	109,73	111,67	113,61	115,54	117,47	119,40
50	119,40	121,32	123,24	125,16	127,08	128,99	130,90	132,80	134,71	136,61	138,51
100	138,51	140,40	142,29	144,18	146,07	147,95	149,83	151,71	153,58	155,46	157,33
150	157,33	159,19	161,05	162,91	164,77	166,63	168,48	170,33	172,17	174,02	175,86
200	175,86	177,69	179,53	181,36	183,19	185,01	186,84	188,66	190,47	192,29	194,10
250	194,10	195,91	197,71	199,51	201,31	203,11	204,90	206,70	208,48	210,27	212,05
300	212,05	213,83	215,61	217,38	219,15	220,92	222,68	224,45	226,21	227,96	229,72
350	229,72	231,47	233,21	234,96	236,70	238,44	240,18	241,91	243,64	245,37	247,09
650	329,64	331,22	332,79	334,36	335,93	337,50	339,06	340,62	342,18	343,73	345,28
850	390,48										

La mesure de température

- **Classe de précision : tolérance des sondes Pt100**

Température (°C)	Tolérance des sondes Pt100			
	Classe A		Classe B	
	±°C	±Ω	±°C	±Ω
-200	0,55	0,24	1,3	0,56
-100	0,35	0,14	0,8	0,32
0	0,15	0,06	0,3	0,12
100	0,35	0,13	0,8	0,3
200	0,55	0,20	1,3	0,48
300	0,75	0,27	1,8	0,64
400	0,95	0,33	2,3	0,79
500	1,15	0,38	2,8	0,93
600	1,35	0,43	3,3	1,06
650	1,45	0,46	3,6	1,13
700			3,8	0,17
800			4,3	1,28
850			4,6	1,34

La mesure de température

- **Vérification d'une sonde Pt100**

Une sonde Pt100 à vérifier est soumise à $T = 300^{\circ}\text{C}$

On mesure la valeur de sa résistance : $R_m(300^{\circ}\text{C}) = 211,71\Omega$

La valeur théorique suivant la table de référence normalisée :

$$R_{th}(300^{\circ}\text{C}) = \mathbf{212,05\Omega}$$

Cas d'une sonde classe A:

La tolérance est $\pm 0,27\Omega$ à 300°C

On constate que la valeur mesurée $211,71\Omega$ n'est pas dans l'intervalle toléré ($212,05\Omega \pm 0,27\Omega$), **la sonde n'est pas conforme.**

Cas d'une sonde classe B:

La tolérance est $\pm 0,64\Omega$ à 300°C

On constate que la valeur mesurée $211,71\Omega$ est dans l'intervalle toléré ($212,05\Omega \pm 0,64\Omega$), **la sonde est donc conforme.**

La mesure de température

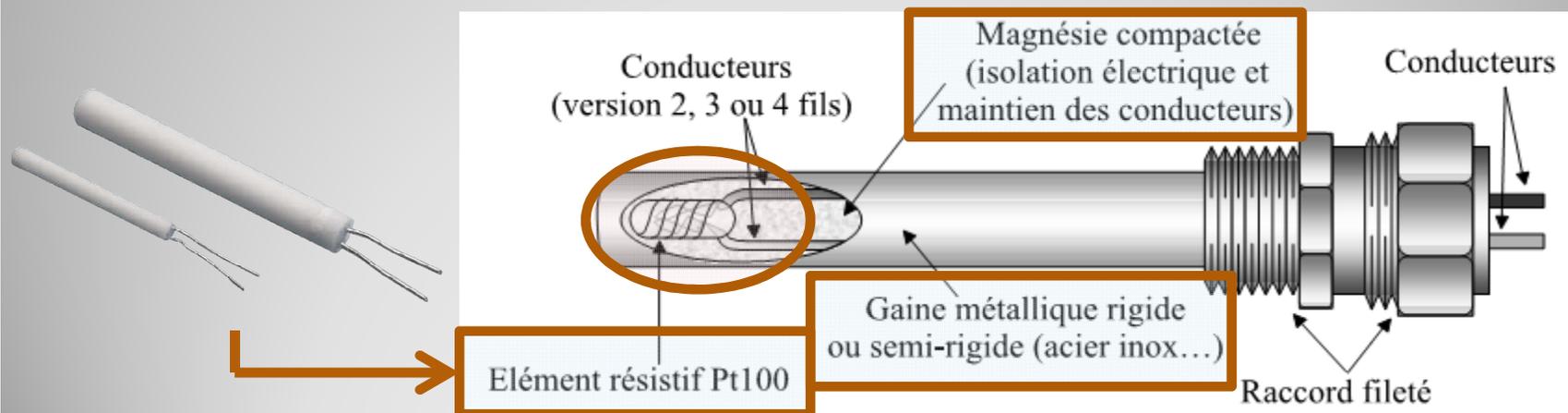
• Technologie des sondes Pt100

Résistances à fil de platine enroulé sur support isolant

Le diamètre de l'élément sensible est de l'ordre de quelques dizaines de micromètres et la longueur de fil d'environ une dizaine de centimètres.

Après bobinage autour d'un mandrin en verre (-200 à 350°C) ou en céramique (-200 à 650°C) la longueur de la sonde est de l'ordre de quelques centimètres.

L'élément en platine est placé par compactage minéral dans une gaine de protection cylindrique métallique, déformable ou rigide, appelée canne thermométrique. La nature de cette protection détermine la température maximale d'utilisation.



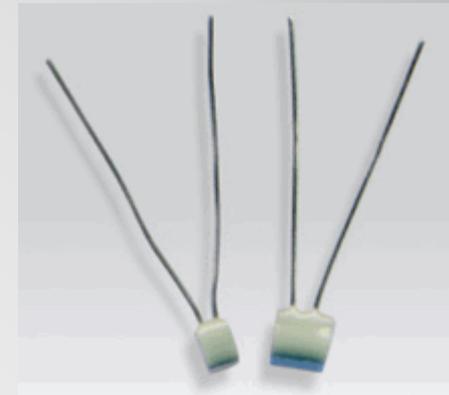
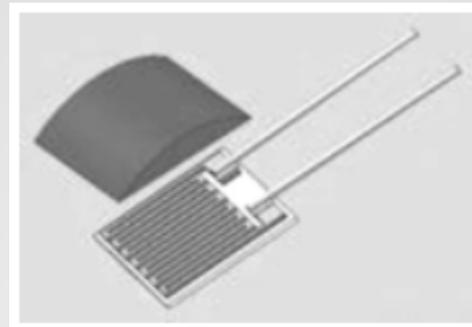
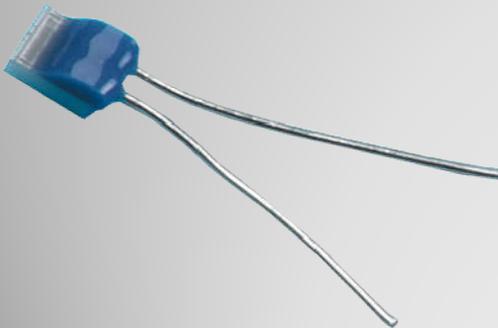
La mesure de température

- **Technologie des sondes Pt100**

Capteurs à couches minces, dépôt sur un substrat céramique

Un matériau platine pur, dont la résistance est connue et documentée pour différentes températures, est utilisé pour la fabrication de l'élément à résistance. Les technologies actuelles de fabrication sous vide des semi-conducteurs permettent d'obtenir des sondes à couche mince par dépôt du platine sur un substrat.

Les domaines d'utilisation vont jusqu'à 450°C, leur stabilité est moindre par rapport aux éléments traditionnels à enroulement, mais elles ont une excellente tenue à la vibration jusqu'à 200°C, un temps de réponse plus court, et un coût plus faible.



La mesure de température

• Câblage des sondes Pt100

Importance du câblage

La sonde Pt100 est connectée à l'instrument de mesure (transmetteur, afficheur, régulateur ou automate) par des fils dont la résistance ohmique influence la valeur de mesure de température.

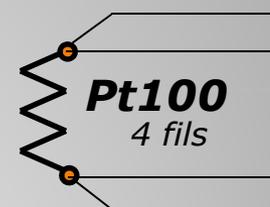
Pour ne pas générer une erreur de mesure inacceptable, la résistance ohmique du câblage doit être inférieure à la valeur de tolérance de la sonde Pt100 utilisée.

La connaissance de ce problème de câblage permet de choisir parmi les sondes disponibles : à 2, 3 ou 4 fils de raccordement.

Sonde Pt100 à 2 fils

Dans le cas le plus simple d'une sonde à 2 fils, il est impossible de distinguer les résistances parasites dues au raccordement avec la résistance de la sonde, et la précision de la chaîne de mesurage est dégradée.

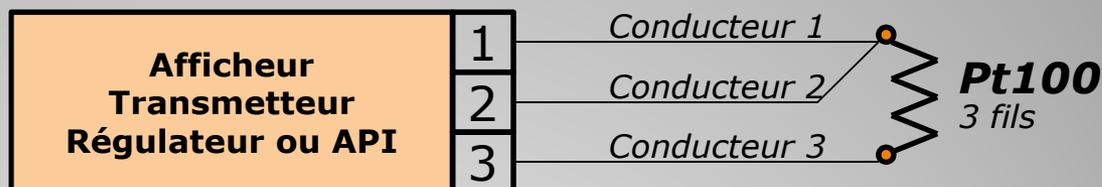
Pour maintenir une précision satisfaisante, lorsque la longueur de câblage est importante, la solution consiste à mettre le transmetteur dans la tête de raccordement de la sonde.



La mesure de température

• Câblage des sondes Pt100

Sonde Pt100 à 3 fils



La résistance entre le conducteur 1 et 2, est soustraite par le circuit électronique de l'appareil, de la valeur ohmique obtenue entre les conducteurs 1 et 3.

La résistance des fils de raccordement est limitée, mais la résistance des contacts de connexion n'est pas supprimée. Une longueur de câblage de l'ordre de 100m n'influence pas la précision de la chaîne de mesure qui reste pratiquement celle de la précision intrinsèque de la sonde Pt100.

Le besoin d'une meilleure précision dans les mesures industrielles de température, incite les fabricants à proposer les sondes **Pt100 à 3 fils** en **version standard**.

Sonde Pt100 à 4 fils

La résistance des fils de raccordement et la résistance des contacts de connexion n'interviennent plus dans la mesure, c'est une sonde réservée à l'**étalonnage**.

Les sondes à **4 fils** ont une précision intrinsèque **dix fois** supérieure.

Attention, les automates et les régulateurs n'ont pas d'entrées « Pt100 4 fils ».

La mesure de température

• Critères de choix d'une sonde Pt100

Les critères de choix d'une sonde Pt100 sont nombreux, la démarche est d'établir toutes les spécificités utiles à la prise de mesure envisagée.

Pour une température < à 650°C, la solution à envisager est la Pt100.

Propriétés générales

- Le domaine de température est compris entre **-200°C** et **650°C**
- Incursion possible en usage intermittent jusqu'à 850°C
- La précision, excellente à 100°C : $\pm 0,35^\circ\text{C}$ (classe A) et $\pm 0,8^\circ\text{C}$ (classe B)
- Stabilité à long terme
- Le temps de réponse dépend du diamètre de sonde et du milieu de mesure (liquide ou gaz). Il peut être de 0,3 s pour une sonde miniature, mais le temps de réponse courant à 95% est de plusieurs secondes, 15 s pour sonde de 4mm.
- Les diamètres de sonde vont de 0,5 mm en chemise déformable, à environ 25 mm pour des cannes pyrométriques. Les diamètres les plus courants sont entre 4 et 9 mm pour les gaines métalliques rigides.
- Coût 2 fois celui d'un thermocouple courant, mais les conducteurs en cuivre de raccordement sont moins coûteux que les conducteurs spécifiques des TC.
- Câblage simple puisque sans contrainte de température au point de connexion.

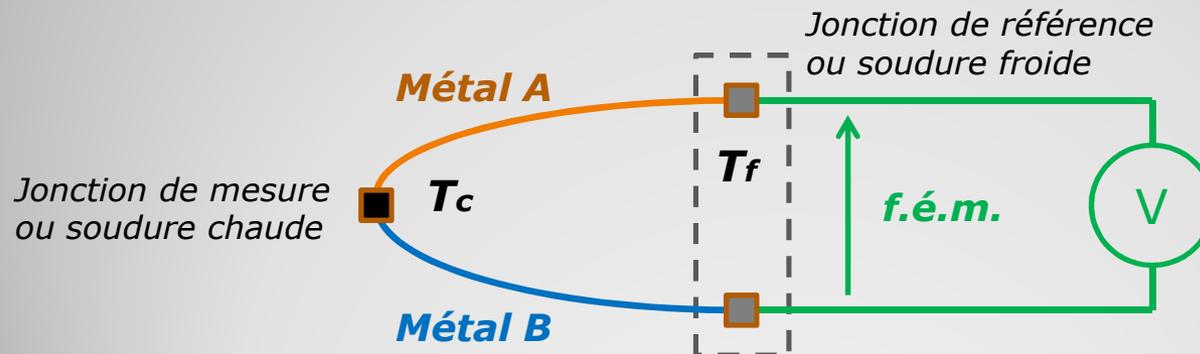
La mesure de température

• Les thermocouples

Principe

Un thermocouple est un circuit électrique fermé, constitué par deux métaux différents **A** et **B**, dont les **jonctions** sont soumises à un gradient de température.

La **conversion d'énergie thermique** crée un déplacement d'électrons et **génère** une force électromotrice (**f.é.m.**) de Seebeck, qui dépend de la **nature** des deux **métaux** et de la différence des températures au niveau des jonctions.



La mesure de température

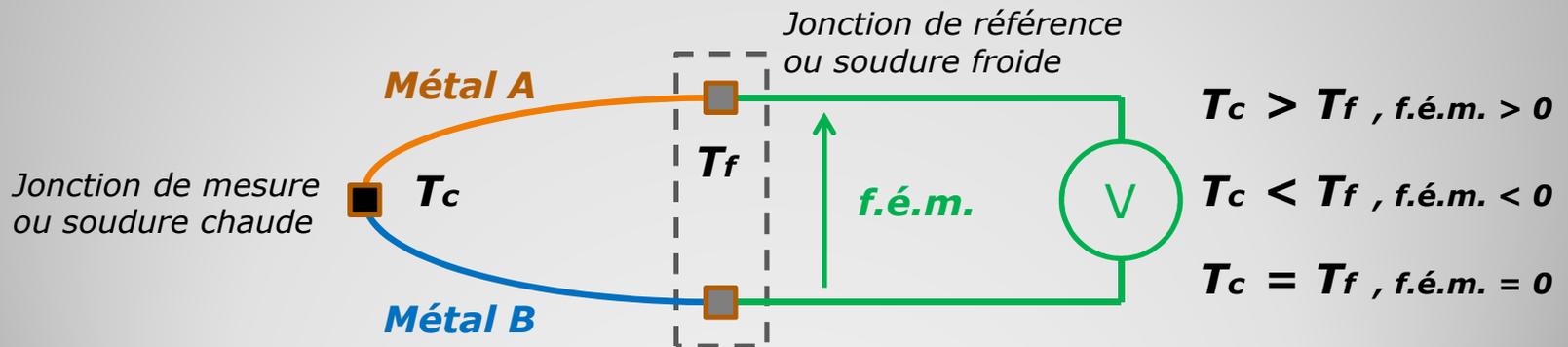
• Les thermocouples

Dans la désignation d'un thermocouple **A/B**, le métal A est le conducteur **positif** et le métal B le conducteur **négalif**.

La **jonction** de mesure est soumise à la température **T_c à mesurer**, et la jonction de référence, reliant les bornes de l'instrument de mesure, est à une température **T_f connue**.

La **f.é.m. de Seebeck**, notée $E_{A/B}^{T_c, T_f}$ est **positive** lorsque la température T_c est supérieure à la température T_f . Elle est **négalive** dans le cas inverse, est nulle si les températures T_c et T_f sont égales.

En fonction des métaux A et B employés, la f.é.m. varie de **5 à 70 μV** par $^{\circ}C$ de différence entre les deux températures T_c et T_f des jonctions.



La mesure de température

- Les thermocouples

Propriétés spécifiques des thermocouples par type

Il existe huit types de thermocouple normalisé codifiés par une lettre :

CODE	Conducteurs Positif / Négatif	Température conseillée (°C)	Indications
K	Nickel-Chrome / Nickel Aluminium	-40 à 1100	Le plus utilisé
T	Cuivre / Cuivre-Nickel	-185 à 350	Applications cryogéniques
J	Fer / Cuivre-Nickel	20 à 700	Industrie plastique
N	Ni-Chrome-Silicium / Ni-Silicium	0 à 1150	Milieu nucléaire
E	Nickel -Chrome/ Cuivre-Nickel	0 à 800	Milieu oxydant
R	Platine Rhodié 13% / Platine	0 à 1600	Plus stable que le type S
S	Platine Rhodié 10% / Platine	0 à 1550	Milieu oxydant et corrosif
B	Platine Rhodié 30% / Platine Rhodié 6%	100 à 1600	Le plus cher, + stable que R

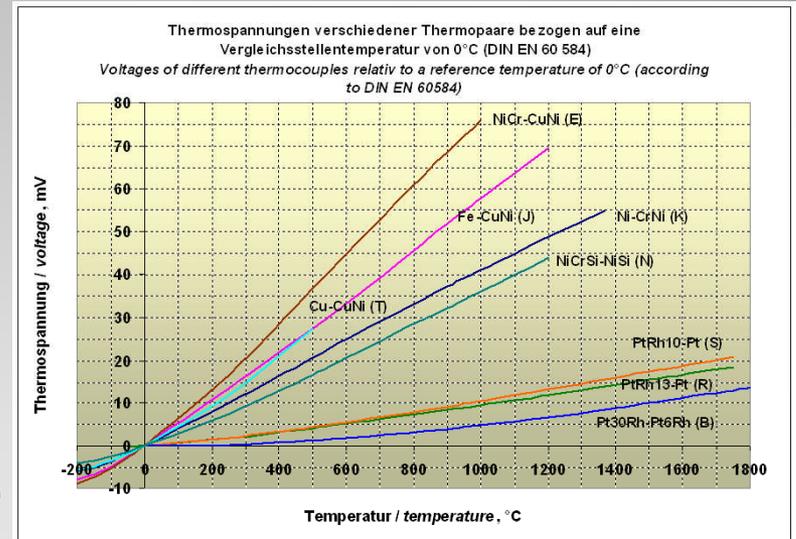
La mesure de température

- **Les thermocouples**

Table de référence normalisée

La relation entre la température et la f.é.m. étant une fonction polynomiale, c'est-à-dire non linéaire, il est d'usage d'utiliser des tables de conversion pour chaque type de thermocouple.

Le report de la f.é.m. lue à la jonction de référence dans une table de référence normalisée (norme CEI 584.1) permet d'obtenir la valeur de la température de la soudure chaude.



Page suivante: exemple pour un thermocouple (type K). Extrait de la table de référence basée sur l'échelle internationale de température 1990 (EIT 90) TC type K (Ni-Cr/Ni-Al): Nickel-Chrome/Nickel Aluminium, (Chromel/Alumel) Valeur de la f.é.m. en microvolts et jonction de référence à 0°C.

La mesure de température

Intro

Généralités

Capteurs

Principes de mesure

TD et TP

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-200	-5 891	-6 035	-6 158	-6 262	-6 344	-6 404	-6 441	-6 458			
-100	-3 554	-3 852	-4 138	-4 411	-4 669	-4 913	-5 141	-5 354	-5 550	-5 730	-5 891
-0	0	-392	-778	-1 156	-1 527	-1 889	-2 243	-2 587	-2 920	-3 243	-3 554
0	0	397	798	1 203	1 612	2 023	2 436	2 851	3 267	3 682	4 096
100	4 096	4 509	4 920	5 328	5 735	6 138	6 540	6 941	7 340	7 739	8 138
200	8 138	8 539	8 940	9 343	9 747	10 153	10 561	10 971	11 382	11 795	12 209
300	12 209	12 624	13 040	13 457	13 874	14 293	14 713	15 133	15 554	15 975	16 397
400	16 397	16 820	17 243	17 667	18 091	18 516	18 941	19 366	19 792	20 218	20 644
500	20 644	21 071	21 497	21 924	22 350	22 776	23 203	23 629	24 055	24 880	24 905
600	24 905	25 330	25 755	26 179	26 602	27 025	27 447	27 869	28 289	28 710	29 129
700	29 129	29 548	29 965	30 382	30 798	31 213	31 628	32 041	32 453	32 865	33 275
800	33 275	33 685	34 093	34 501	34 908	35 313	35 718	36 121	36 524	36 925	37 326
900	37 326	37 725	38 124	38 522	38 918	39 314	39 708	40 101	40 494	40 885	41 276
1000	41 276	41 665	42 053	42 440	42 826	43 211	43 595	43 978	44 359	44 740	45 119
1100	45 119	45 497	45 873	46 249	46 623	46 995	47 367	47 737	48 105	48 473	48 838
1200	48 838	49 202	49 565	49 962	50 286	50 644	51 000	51 355	51 708	52 060	52 410
1300	52 410	52 759	53 106	53 451	53 795	54 138	55 479	54 819			

La mesure de température

• Les thermocouples : loi des températures successives

Cette loi permet de déterminer la température T_c de la jonction de mesure à partir de la f.é.m. mesurée à la jonction de référence lorsque la température T_f est différente de 0°C pour un thermocouple A/B.

On a :

$$E_{A/B}^{T_c, 0^\circ\text{C}} = E_{A/B}^{T_c, T_f} + E_{A/B}^{T_f, 0^\circ\text{C}}$$

f.é.m. à lire dans la table de référence pour déduire T_c
 f.é.m. mesurée à la jonction de référence
 f.é.m. à lire dans la table de référence

Exemple : pour connaître la température T_c , on relève $T_f=30^\circ\text{C}$, et la tension à la jonction de référence du thermocouple (type K), $E_K^{T_c, 30^\circ\text{C}} = 18\,589\ \mu\text{V}$.

La table de référence indique pour $T=30^\circ\text{C}$, $E_K^{30^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}} = 1\,203\ \mu\text{V}$.

La loi des températures successives conduit à :

$$E_K^{T_c, 0^\circ\text{C}} = 18\,589 + 1\,203 = \mathbf{19\,792\ \mu\text{V}}, \text{ ce qui correspond à } \mathbf{T_c = 480\ ^\circ\text{C}}.$$

La mesure de température

- **Les thermocouples : compensation de soudure froide**

La connaissance de la température de la soudure froide est indispensable pour déterminer la température de la soudure chaude. Deux cas pratiques se présentent.

- **Température de soudure froide constante à 0°C:**

Lorsque la soudure froide est à **0°C**, la mesure de la f.é.m. permet de connaître directement la température de la soudure chaude à l'aide des **tables de référence**. Dans ce cas idéal, les conducteurs de la soudure froide doivent être insérés dans un milieu thermostaté à 0°C avec une précision meilleure que celle du thermocouple. Cas des **étalonnages en laboratoire**.

- **Température de soudure froide variable:**

Industriellement, c'est un **circuit électronique** qui mesure automatiquement la température de la soudure froide, à partir d'une **thermistance** placée près de la jonction de référence, et ajoute la f.é.m. correspondante à la f.é.m. de mesure

La tension exploitée est $E_{A/B}^{T_c, 0^\circ C}$ et correspond à la température mesurée. Ce circuit est appelé **circuit de compensation de soudure froide**, souvent noté **CSF**, et intégré dans l'instrument de mesure (afficheur, transmetteur, régulateur ou carte d'entrée API).

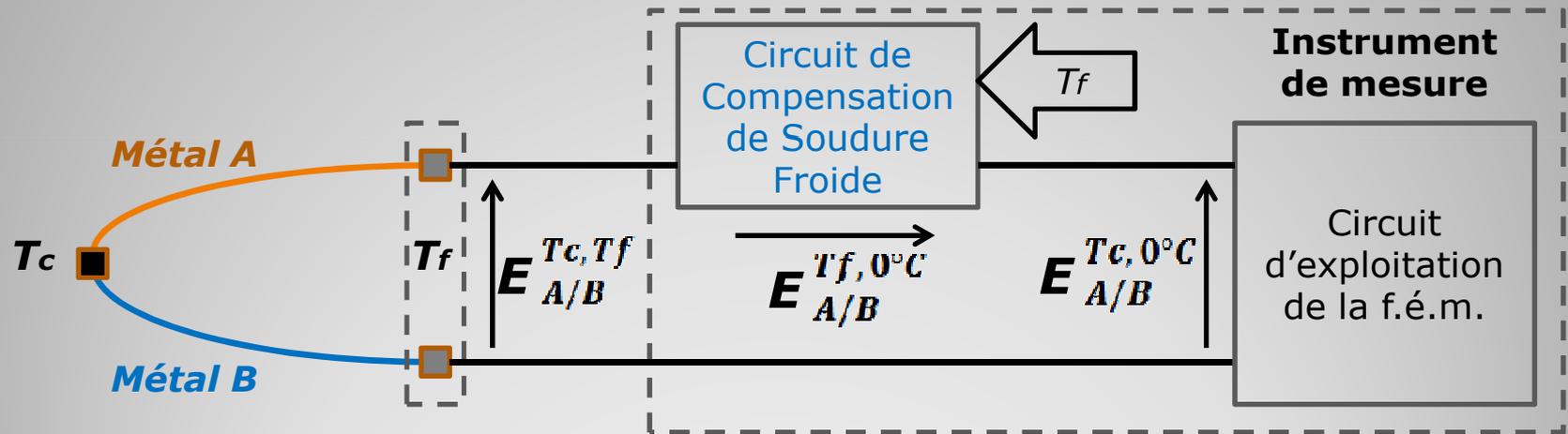
La CSF doit être validée dans la configuration de cet instrument.

La mesure de température

- Les thermocouples : compensation de soudure froide

Le circuit de compensation de soudure froide est intégré dans l'instrument de mesure (afficheur, transmetteur, régulateur ou API).

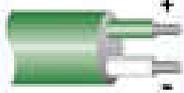
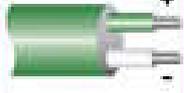
La CSF doit être validée dans la configuration de l'instrument.



Le circuit de CSF mesure la température de soudure froide avec une incertitude négligeable dans le cas de variations de cette température inférieure à $50^\circ C$.

La mesure de température

• Les thermocouples: *Codes couleur des câbles ex : type K*

couples symboles	NATURE DES MÉTAUX		température d'utilisation normale en °C	TOLÉRANCES		F.E.M. à 100°C en mV	EXTENSION+		COMPENSATION °C	NATURE DES MÉTAUX		IEC 584 - 3 NFC 43-324 119031 / 854937
	+	-		classé 1	classé 2		classe 1	classe 2		+	-	
K	Nickel-Chrome ou Chromel*	Nickel-allié ou Alumel*	-200°C à +1200°C	-40°C à +375°C ±1,5°C	+40°C à +333°C ±2,5°C	4,096	KX1 ±1,5°C Temp. Câble -25°C à +200°C	KX2 ±2,5°C Temp. Câble -25°C à +200°C		Nickel-Chrome ou Chromel*	Nickel-allié ou Alumel*	
							Ni-Cr	Ni-Al		Ni-Cr	Ni-Al	
							KCA (DIN ou WC) ±2,5°C Temp. Câble 0°C à +150°C			Fer	Cuivre-Nickel W ou Advance* ou Constantan*	
				+375°C à +1000°C ±0,004,m	+333°C à +1200°C ±0,0075,m					Cuivre	Cuivre-Nickel V ou Advance* ou Constantan*	
										Fe	Cu-Ni	
										Cu	Cu-Ni	

La mesure de température

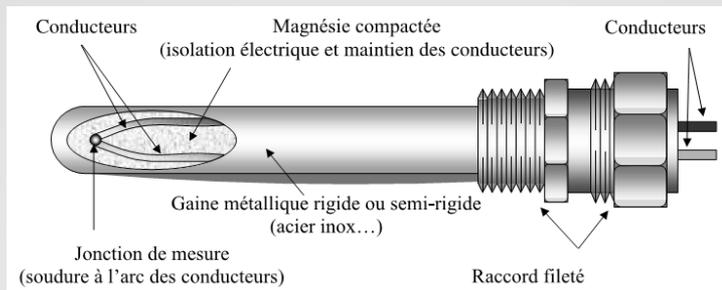
• Protection d'un thermocouple

Lorsqu'ils ne sont pas protégés, les conducteurs utilisés ne doivent pas réagir chimiquement avec l'atmosphère environnante.

Le thermocouple nu dont la soudure chaude est non isolée, chaque conducteur étant isolé électriquement par un revêtement en PVC, en Téflon ou en soie de verre.

Le thermocouple chemisé est un ensemble constitué par les éléments du thermocouple insérés dans une poudre minérale comprimée isolante dans une gaine déformable en acier.

La canne pyrométrique comprend le thermocouple chemisé surmonté d'une tête de raccordement étanche protégeant le bornier de connexion, et en option, le transmetteur. Un raccord fileté est prévu pour fixer la canne sur le processus.



La mesure de température

• Accessoires de montage

Pour son raccordement au processus et sa maintenance, il existe des accessoires additifs aux cannes pyrométriques et aux sondes.

Le doigt de gant est le principal accessoire, il peut être soudé directement sur une cuve ou une tuyauterie, ou bien vissé dans un raccord taraudé, à fixation par bride ou par clamp.

De simples raccords filetés peuvent aussi être employés pour le montage des sondes sur le processus.



Doigt de gant



Raccords

La mesure de température



Intro

Généralités

Capteurs

Principes de mesure

TD et TP



Pression

La mesure de pression

• Introduction

Quantitativement, la pression est la seconde grandeur physique mesurée industriellement après la température. Du vide poussé de quelques pascals absolus aux fortes pressions de plusieurs milliers de bar, les techniques de mesures développées pour les applications sont très variées.

La **pression** P (Pa) est une grandeur physique représentant une force F (N) par unité de surface S (m²) s'exerçant à l'intérieur d'un fluide. $P = F / S$

Vide absolu : ne peut être atteint 0 Pa abs.

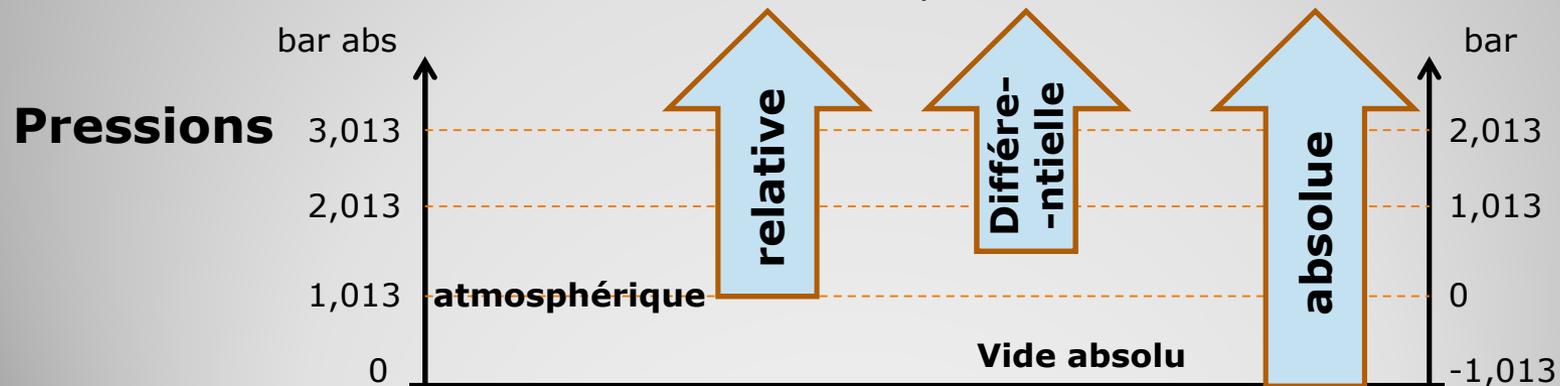
Pression atmosphérique : référence variable en fonction de l'altitude.

Pression atmosphérique de référence : fixée à 101 325 Pa (en pression absolue)

Pression absolue : pression exprimée par rapport au vide absolu.

Pression relative : pression exprimée par rapport à la pression atmosphérique.

Pression différentielle : différence entre deux pressions relatives ou deux absolues.



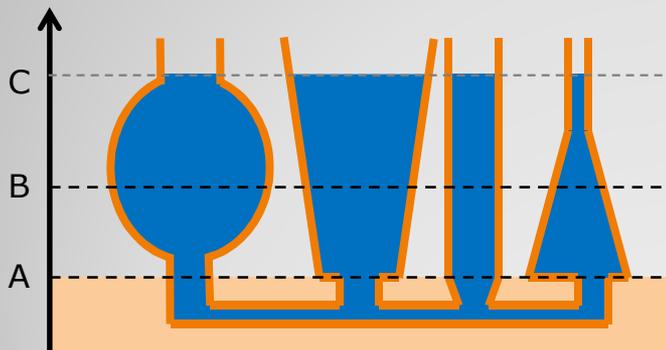
La mesure de pression

• Hydrostatique

Principe des vases communicants

Lorsqu'un liquide homogène relie sans discontinuité plusieurs surfaces libres soumises à la même pression, elles sont à la même altitude C quelle que soit la forme des vases ou récipients.

Altitude z



Pression hydrostatique

La pression hydrostatique P de la masse exercée par une colonne, de section S quelconque, et de hauteur H , de fluide homogène de masse volumique ρ , est:

$$P = F / S = m.g / S = \rho.V.g / S$$

$$V = H.S \quad \text{donc} \quad P = \rho.H.S.g / S$$

Soit
$$P = \rho.g.H$$

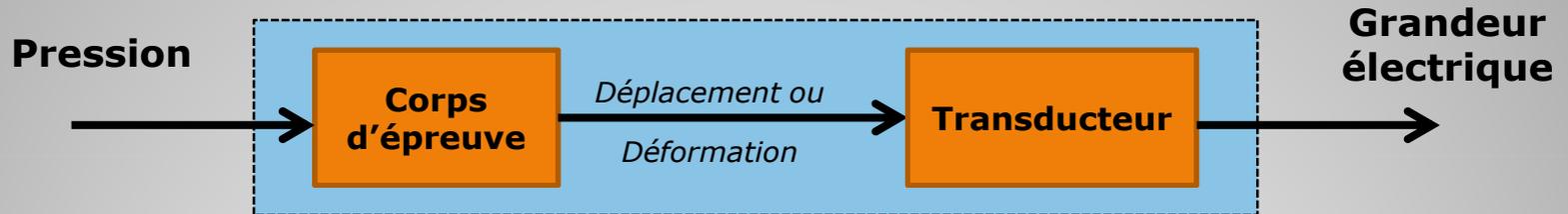
Toutes les pressions hydrostatiques au niveau A ($H=Z_C-Z_A$) à l'intérieur du liquide sont identiques.

De même pour les pressions hydrostatiques au point B ($H=Z_C-Z_B$).

La mesure de pression

• Principe d'un capteur de pression

La **pression** du fluide exerce une force sur le **corps d'épreuve** du capteur. Il en résulte un **déplacement** ou une **déformation**, traduit par le **transducteur** qui délivre une **grandeur électrique** exploitée par le transmetteur.



Industriellement, le capteur de pression apparaît dans la plupart des cas en **transmetteur de pression**, en délivrant des signaux standards 4-20mA ou 0-10V exploitables par les appareils de mesures: (afficheurs, régulateurs, cartes d'entrées API et SNCC).

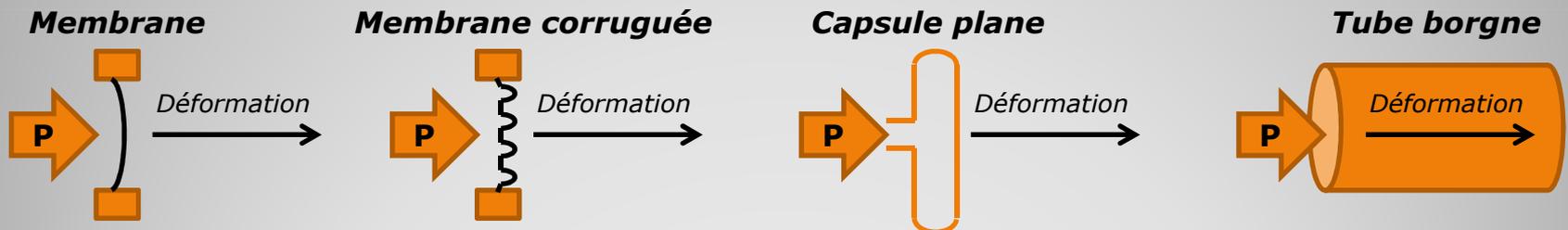


La mesure de pression

• Corps d'épreuve

Parmi les principaux corps d'épreuve employés par les fabricants, on remarque la **membrane**, la **membrane corruguée** (pourvue de stries annulaires généralement circulaires), la **capsule plane** ou **corruguée**, et le **tube borgne**.

Chacun d'entre eux ayant des caractéristiques intrinsèques telles que sensibilité à la pression, étendue de mesure ou temps de réponse. Leur domaine respectif d'emploi leur est spécifique.



La mesure de pression

- **Transducteurs électriques**

Monté **directement** ou **indirectement** sur le **corps d'épreuve**, le transducteur en traduit le déplacement ou la déformation.

Il existe une très grande variété de transducteurs, **passifs** ou **actifs**, parmi lesquels ceux à variation de capacité électrique, de résistance ohmique par jauges de contrainte métalliques ou semi-conductrices, ou à effet piézoélectrique.



La mesure de pression

• Réalisation technique Capteur de pression relative ou absolue

Exemple avec une cellule en céramique à variation de capacité.

La pression **P** du processus agit directement sur la membrane en céramique et la déplace au maximum de **25 µm**.

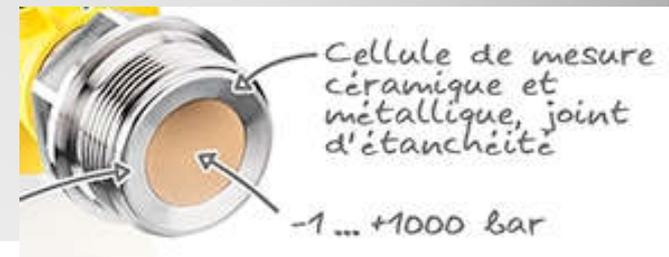
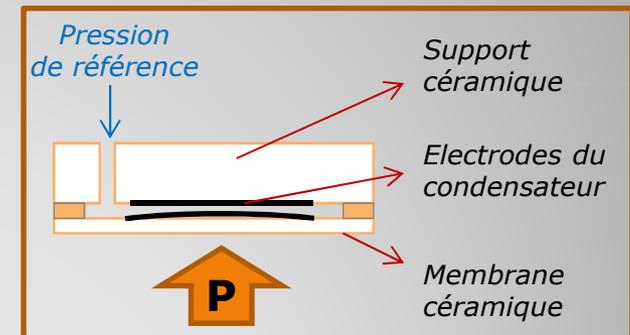
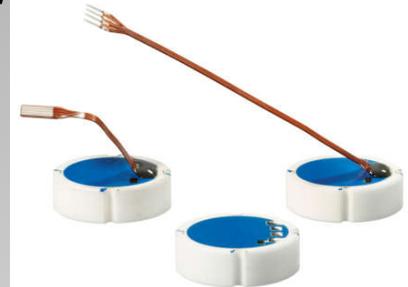
La **variation de capacité** proportionnelle au déplacement est mesurée aux électrodes du support en céramique et de la membrane.

La gamme de mesure est déterminée par l'**épaisseur** de la membrane en céramique.

Lorsque la référence est la pression atmosphérique, quelle que soit la réalisation technique, c'est un capteur de pression relative.

Pour un vide poussé en pression de référence, c'est un capteur de pression absolue.

Transducteur
Cellule
céramique



La mesure de pression

• Réalisation technique

Capteur de pression relative ou absolue

Exemple avec une membrane métallique à variation de résistance ohmique.

La pression P du processus déplace

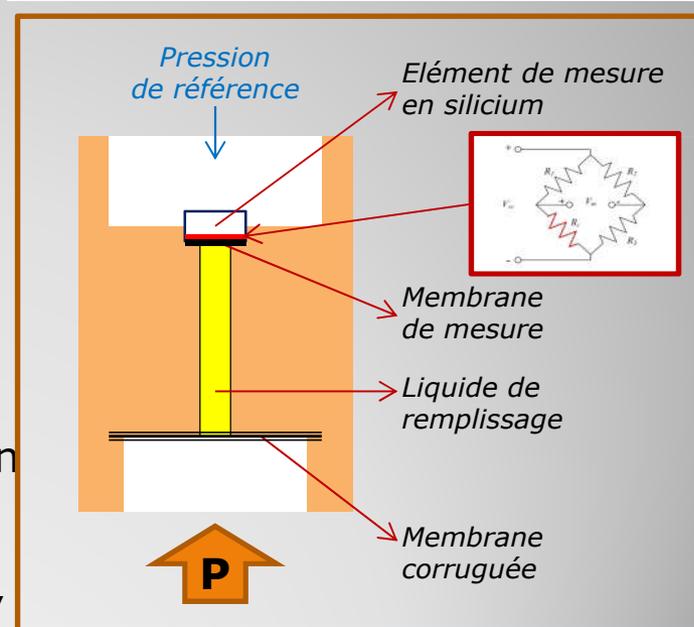
- la membrane métallique séparatrice
- le liquide de remplissage
- et la membrane de mesure

Sous l'effet du déplacement, l'élément de mesure **piézorésistif** subit une contrainte qui modifie sa résistance ohmique.

La **tension de mesure** résultante du pont de Wheatstone est **proportionnelle** à la **pression**.

Lorsque la référence est la pression atmosphérique, quelle que soit la réalisation technique, c'est un capteur de pression relative.

Pour un vide poussé en pression de référence, c'est un capteur de pression absolue.

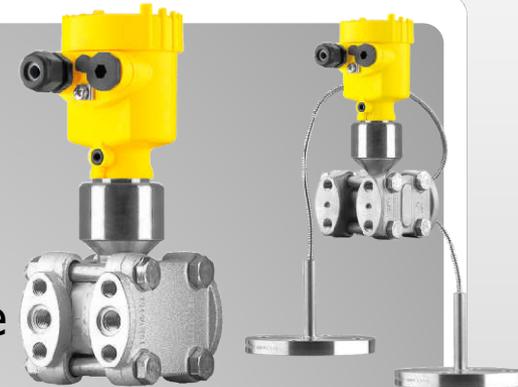


La mesure de pression

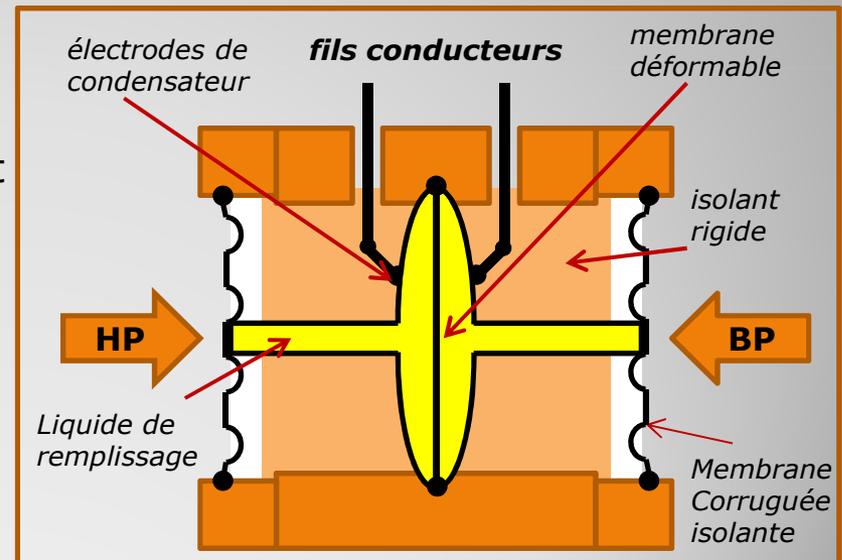
• Réalisation technique

Capteur de pression différentielle

Il est très répandu car il permet de mesurer une **pression différentielle**, mais aussi un **niveau**, un **débit**, une **densité** ou encore de vérifier l'efficacité d'un échangeur thermique ou d'un filtre en mesurant leur **pertes de charge**.



Exemple de réalisation: cellule en coupe, les pressions **HP** et **BP** appliquées sur chaque membrane corruguée isolante sont transmises par l'intermédiaire d'une huile de silicone à la membrane déformable, ce qui entraîne une **variation** différentielle de **capacité** entre les électrodes des condensateurs et la membrane déformable.



La mesure de pression

• Transmetteur de pression configurable

Le transmetteur est logé dans un boîtier monté directement sur le capteur de pression, qu'elle soit relative, absolue ou différentielle.

Lorsque le transmetteur est réglable, la configuration permet de régler les paramètres usuels suivants:

- Appellation et adresse du capteur-transmetteur
- Unités principales et secondaire
- Valeurs minimale et maximale de l'étendue de mesure
- Temps de réponse, filtre sur la mesure, fonction de linéarité
- Indication des températures du process et du boîtier
- Signal de sortie en cas de défaut, et d'autres fonctions suivant les options

En fonction des options retenues, cette configuration peut se faire directement sur des touches de paramétrage ou un afficheur intégré, par un modem avec le protocole HART, ou par bus de terrain.



La mesure de pression

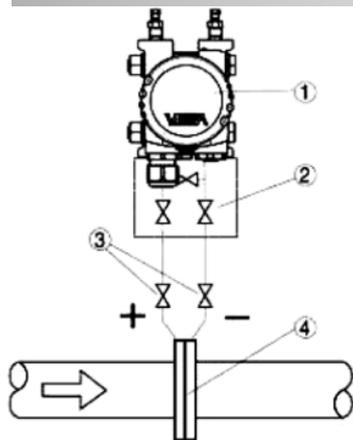
• Montage du capteur de pression

L'implantation du capteur dépend de la nature du fluide et de l'application.

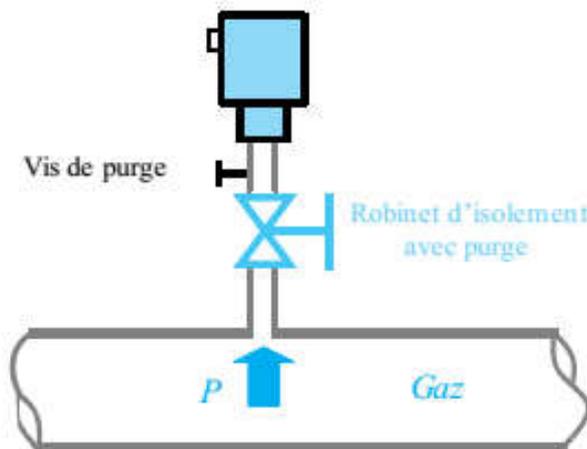
En général, pour un gaz incondensable, la position est indifféremment au-dessus ou en-dessous de la conduite.

Pour les liquides, vapeur et gaz condensable, il est placé en-dessous de la conduite.

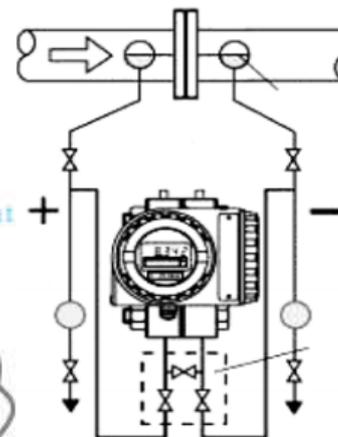
Débit Gaz



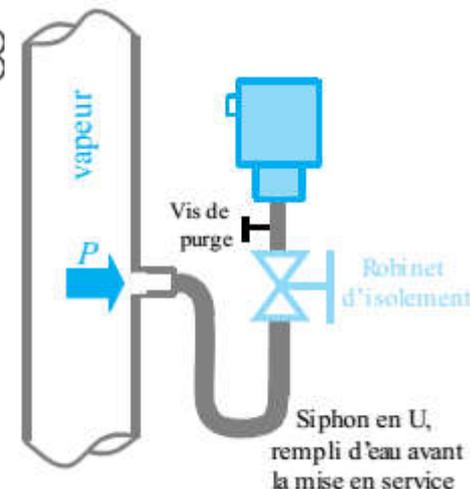
Pression Gaz



Débit Vapeur



Pression Vapeur



La mesure de pression

• Séparateurs

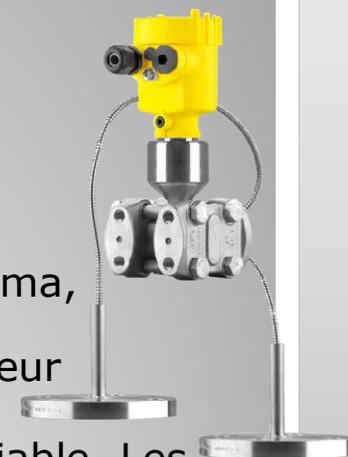
Les séparateurs à membrane permettent de garantir des applications de mesure de pression dans des conditions du processus supérieures à celles prévues par le fabricant du capteur.

Le séparateur peut être monté directement sur le capteur (extension) ou bien avec un capillaire entre le séparateur et le capteur.

Cas d'utilisation:

- Fluides visqueux, cristallisant ou tendant à se solidifier
- Fluides très corrosifs ou toxiques
- Processus très exigeant en matière d'hygiène (agroalimentaire, pharma, biotechnologie)
- Température du process trop élevée pour le corps d'épreuve du capteur
- Température ambiante trop élevée pour le boîtier du transmetteur

Un séparateur constitué avec le capteur un ensemble étalonné indissociable. Les ouvertures ayant permis le remplissage du liquide tampon doivent rester scellées.



Séparateurs à extension pour niveau



Mesure de niveau sur cuve à séparateur DN80 / PN40 avec extension

Séparateurs à Capillaire



Mesure de pression différentielle ou de niveau sur cuve fermée pour applications en milieu très corrosif (membrane dorée)

La mesure de pression

• Etalonnage

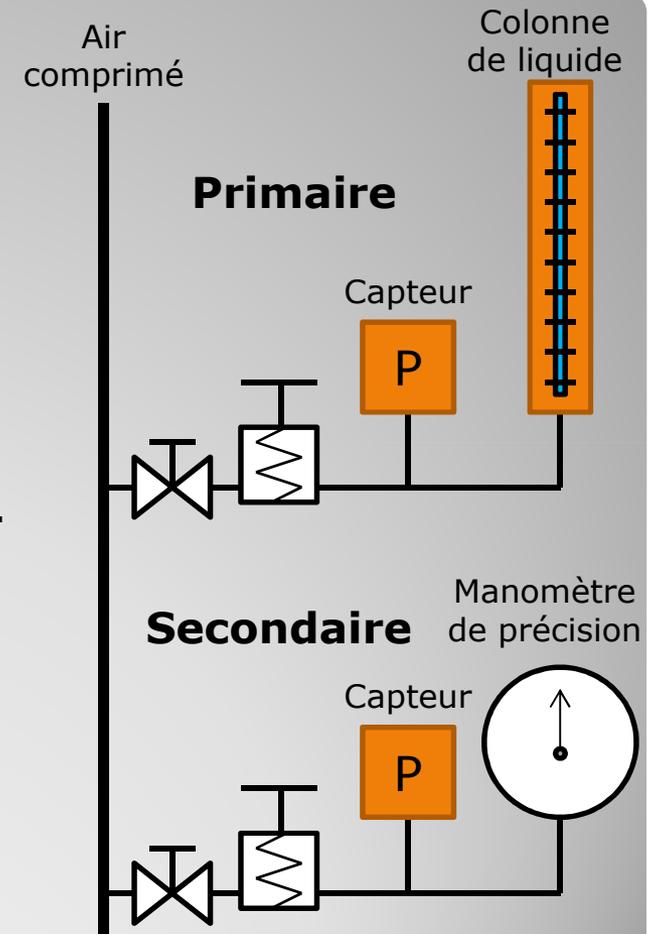
Etalonnage primaire

La pression de référence P soumise au capteur à étalonner est générée soit à l'aide d'une colonne de liquide où $P = \rho \cdot G \cdot H$, pour les pressions entre quelques mbar et 300 mbar, soit à l'aide d'une balance manométrique par application d'une force F sur une section S déterminée donnant $P = F / S$.

La pression de référence est un **étalon primaire**.

Etalonnage secondaire

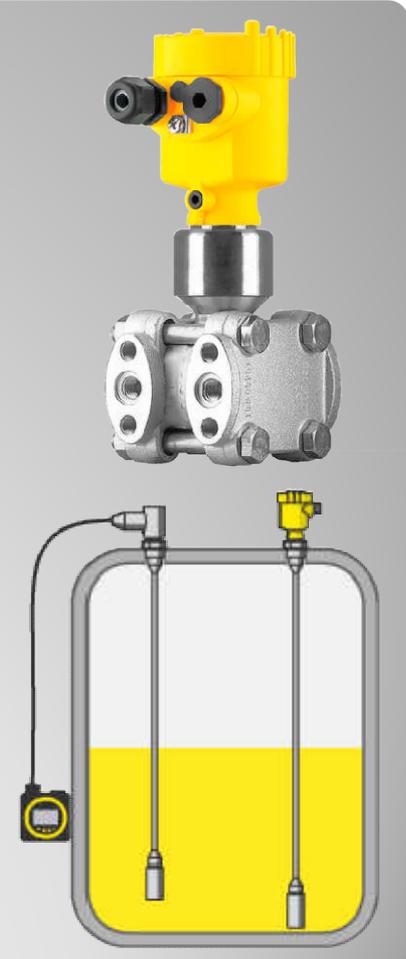
C'est un étalonnage **par comparaison**, c'est-à-dire que la pression soumise au capteur à étalonner est mesurée avec une précision au moins dix fois supérieure par un capteur interne d'un calibrateur portatif ou par un manomètre de précision nommé **manomètre de vérification**.



La mesure de pression



Niveau hydrostatique



Mesure de niveau hydrostatique

• Définition

On appelle **niveau** d'un liquide dans un réservoir, la différence de hauteur entre un plan de référence et le plan d'interface liquide-gaz ou de deux liquides immiscibles. Un niveau est aussi l'instrument donnant la valeur de cette **hauteur** de liquide.

La mesure d'un **niveau** de (réservoir, cuvier, ...) sert soit à **réguler** la **hauteur** du produit permettant le contrôle du procédé, soit à **informer** du **volume manquant** ou **restant**.

Le **jaugeage** ou **barémage** d'un réservoir consiste à établir, avec une incertitude maîtrisée, la relation $V = f(h)$ liant le volume V du liquide contenu dans le réservoir à la position h du niveau de ce liquide, repérée sur un axe vertical défini à partir d'une origine de référence.

Remarque: les volumes de liquide sont soumis en France lors des transactions commerciales, à une obligation légale de mesurage (ordonnance 45-2405 du 18/10/1945) car la facturation de ces quantités liquides, de leur transport, ou des taxes assises lors de leur mise à la consommation, est toujours proportionnelle au volume.

La connaissance du volume avec exactitude garantit le **prix** le plus **juste** possible aux parties en présence.

Mesure de niveau hydrostatique

• Niveau hydrostatique

Principe et conditions d'application

L'équation de l'hydrostatique $P = \rho \cdot g \cdot h$ conduit à mesurer la pression pour obtenir la hauteur h de liquide, **aux conditions** que la masse volumique ρ soit constante, et que l'accélération g de la pesanteur soit constante. Cette dernière condition étant pratiquement toujours vérifiée sur les processus.

Méthode directe ou différentielle

En fonction des conditions, deux méthodes génériques existent:

- La **méthode directe** qui emploie un capteur de **pression relative** mesurant la pression statique à un point bas du réservoir.
- La **méthode différentielle** utilisant un capteur de **pression différentielle**, pour un niveau d'interface entre liquides ou entre liquide et gaz, lorsque le réservoir est soumis à une pression différente de la pression atmosphérique.

Mesure de niveau hydrostatique

- **Mesure hydrostatique directe**

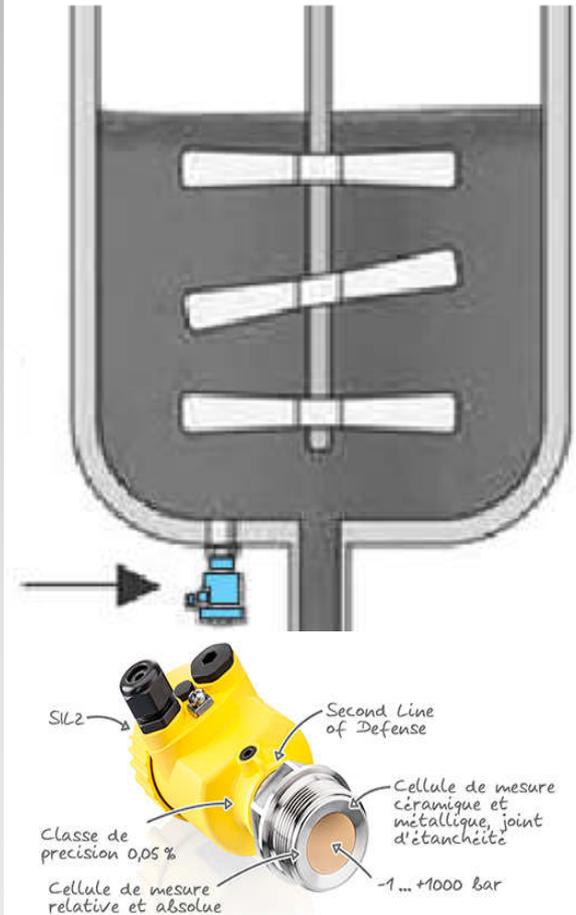
Application : sur tout réservoir ouvert, c'est-à-dire soumis à la pression atmosphérique, ou tout puits à l'air libre.

Capteur de pression à membrane affleurante

Un capteur de pression relative dont la membrane est affleurante à la paroi du réservoir est placée au point bas désiré.

La mesure de la pression est proportionnelle au niveau situé au-dessus de ce point bas.

Ce montage réponds bien aux exigences d'hygiène des industries agroalimentaires car ces capteurs résistent aux nettoyages et aux chocs thermiques des stérilisations.



Mesure de niveau hydrostatique

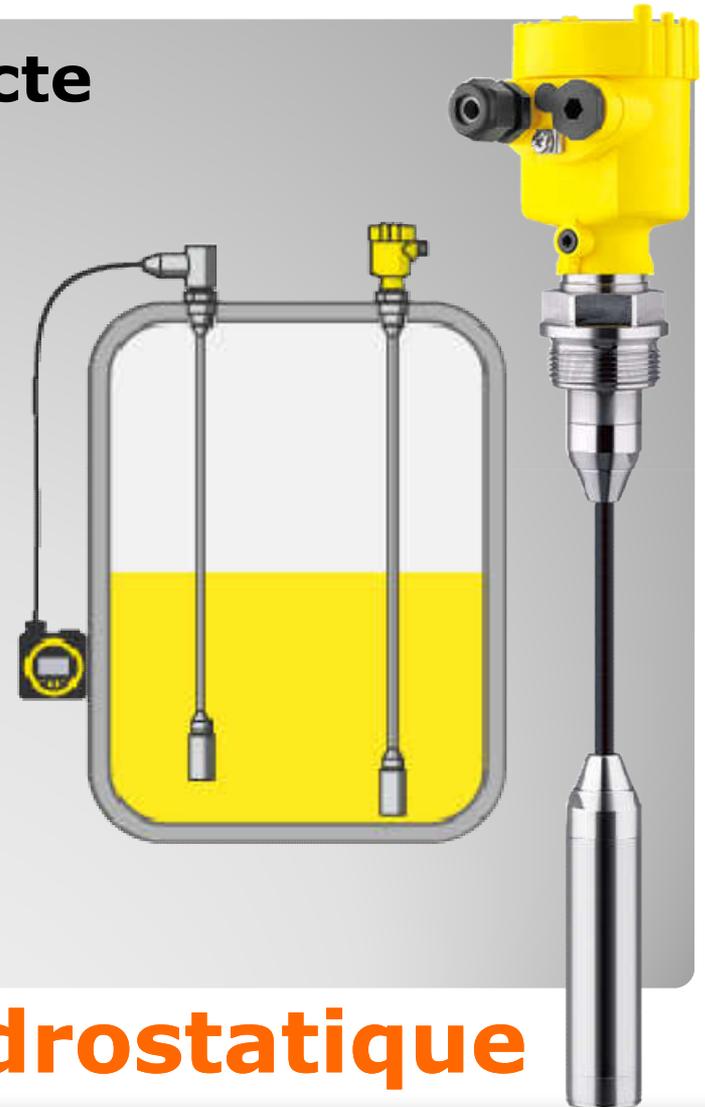
- **Mesure hydrostatique directe**

Capteur à sonde plongeante

Constitué d'un capteur de pression relative plongé par le haut du réservoir, la sonde mesure la pression hydrostatique et donc le niveau au-dessus d'elle.

Le capteur est relié par un câble ou une prolongation rigide au transmetteur situé à l'extérieur du réservoir.

La pression atmosphérique est amenée à la cellule de mesure par capillaire interne à la prolongation qu'il ne faut ni obstruer, ni couper lors du montage.



Mesure de niveau hydrostatique

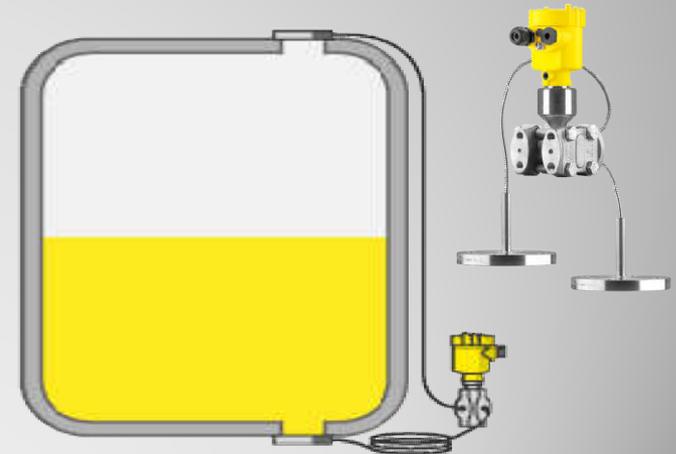
• Mesure hydrostatique différentielle

Application

Sur tout réservoir fermé soumis à une pression, inconnue ou variable, au-dessus du niveau à mesurer, on utilise un capteur de pression différentielle, avec un double piquage direct des pressions, ou équipé d'une ou deux brides spécifiques au niveau.

Plus de 20% des mesures de niveau sont réalisées sur des cuves pressurisées et sont effectuées par pression différentielle.

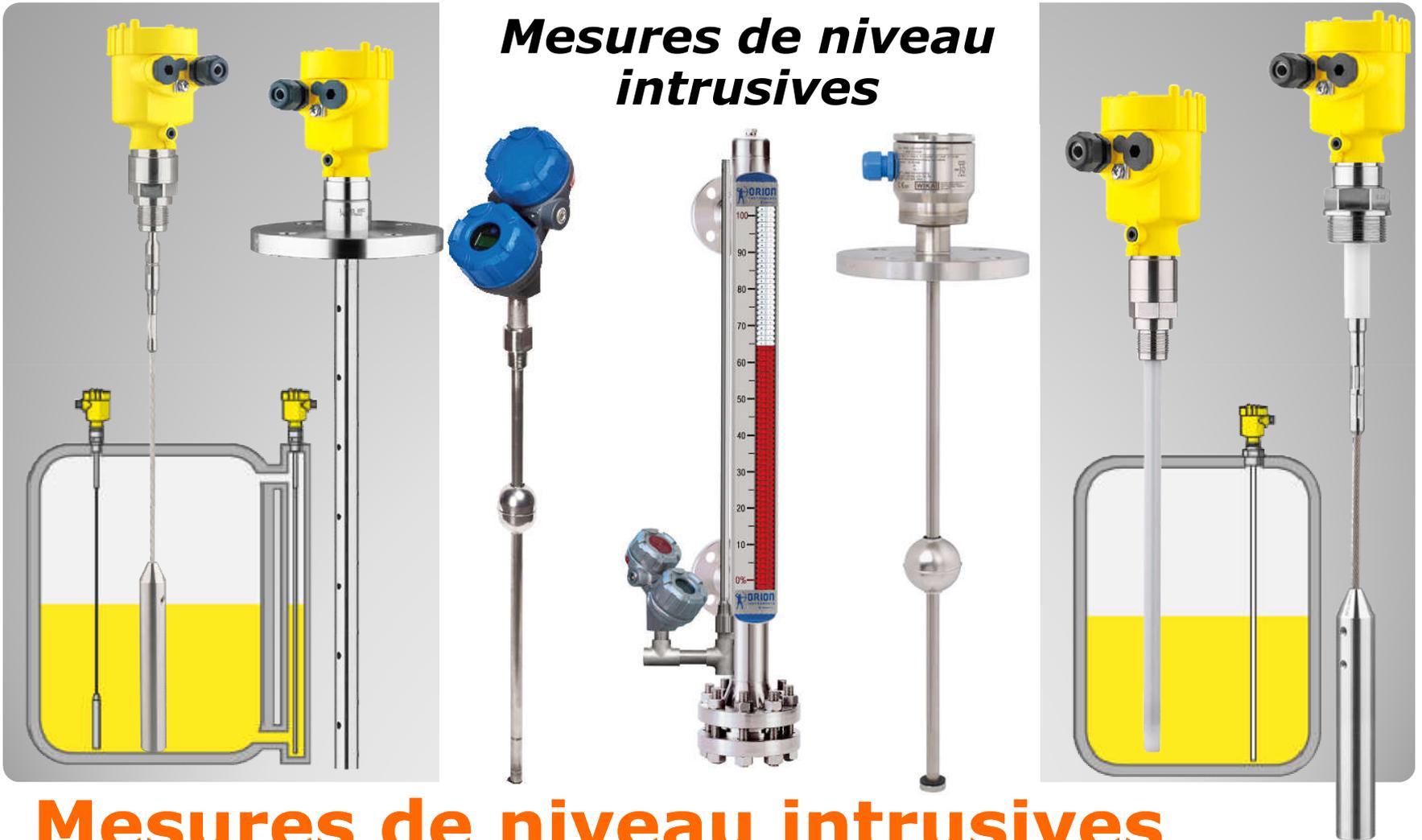
Le montage classique d'un capteur de pression différentielle permet de s'affranchir de la surpression au dessus du liquide pour obtenir la pression hydrostatique.



Mesure de niveau hydrostatique



Mesures de niveau intrusives



Mesures de niveau intrusives

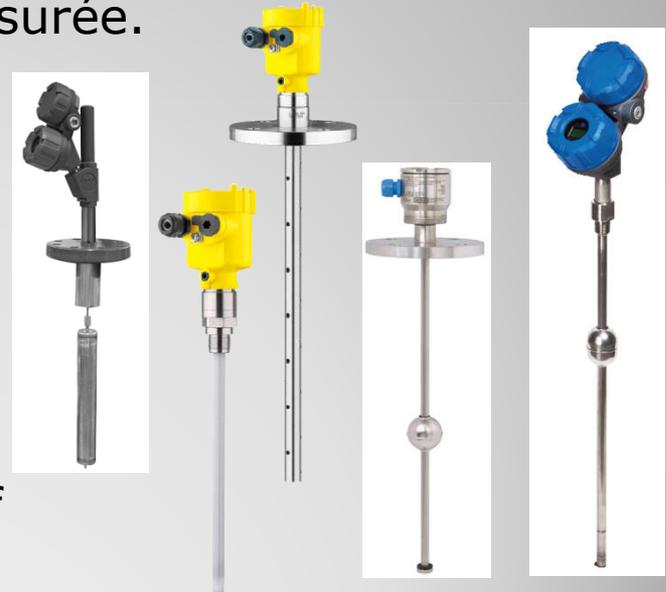
• Mesures de niveau intrusives

Définition

Mesure intrusive : le capteur est en contact avec le produit et perturbe plus ou moins la grandeur mesurée.

Plusieurs technologies sont utilisées

- Transmetteur de niveau à plongeur
- Sonde capacitive
- Sonde radar à impulsions filoguidées
- Transmetteur de niveau magnétique
- Transmetteur de niveau magnétostrictif



Mesures de niveau intrusives



**Mesures de niveau
non intrusives**

Mesures de niveau non intrusives

• Mesures de niveau non intrusives

Définition

Mesure non intrusive : le capteur n'est pas en contact avec le produit et n'influence donc pas la grandeur mesurée par sa présence.

Principales technologies utilisées

- Capteur de niveau à ultrasons
- Capteur de niveau à radar
- Sonde à absorption de rayons gamma



Mesures de niveau non intrusives

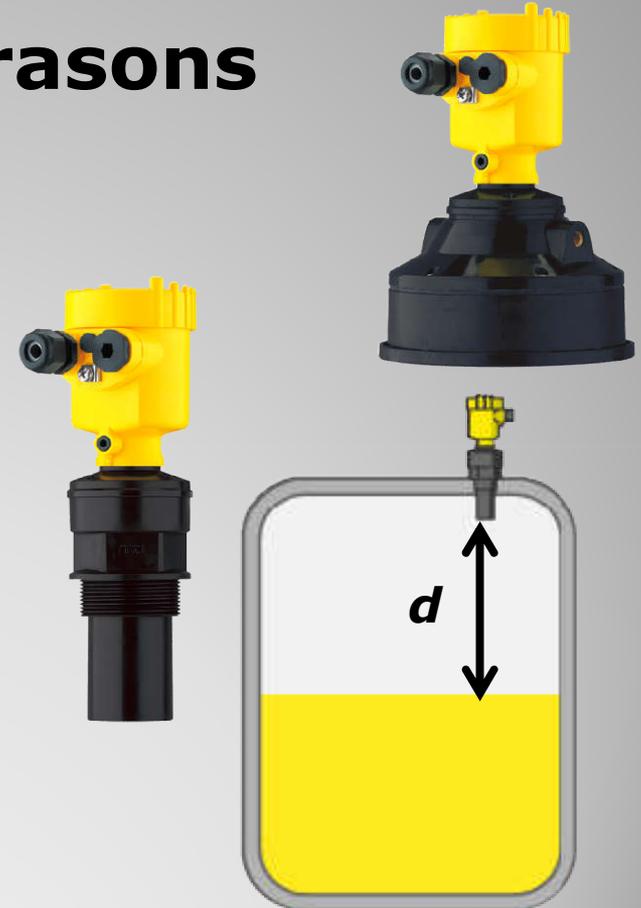
• Capteur de niveau à ultrasons

Principe du temps de parcours

La sonde envoie des **impulsions ultrasoniques** comprises entre 10 KHz et 60 KHz en direction de la surface du produit à la vitesse du son **c** (environ 340 m/s), où elles sont réfléchies par le produit et reçues à nouveau par la sonde.

Le transmetteur mesure le temps **t** entre l'émission et la réception d'une impulsion, et détermine la distance **d** entre la membrane de la sonde et la surface du produit par **$d = c \cdot t / 2$** .
A partir de **d** , on obtient la valeur souhaitée du **niveau** ou du **volume**.

Pour corriger la durée de propagation du son en fonction de la température, un capteur de température est intégré dans les sondes à US.



Mesures de niveau non intrusives

• Capteur de niveau à impulsions radar

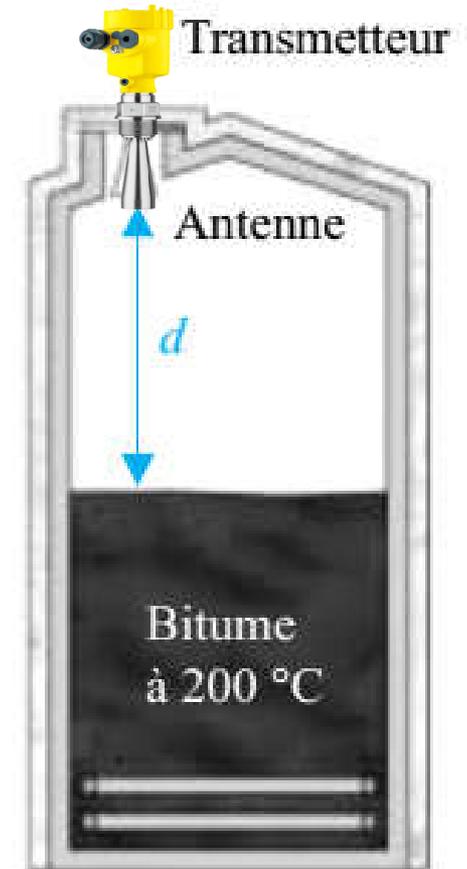
Principe du temps de parcours

Des **impulsions micro-ondes** dites radar, sont émises (entre 6 et 26 GHz) à la vitesse de la lumière c (environ 300 000 km/s), vers le produit par une antenne, une partie est réfléchiée par la surface du produit, puis réceptionnée par la même antenne.

Le transmetteur mesure le temps t de propagation correspondant à la distance d entre l'antenne et la surface du produit, $d = c \cdot t / 2$

La saisie des **dimensions** du réservoir permet par configuration d'obtenir un signal proportionnel au **niveau** ou au **volume**.

Un réglage en réservoir vide ou plein n'est pas nécessaire.



Mesures de niveau non intrusives

• Capteur de niveau sans contact

à ultrasons, à impulsions radar ou à ondes continues

Les différents types d'échos

• **Echo Produit :**

- Signal réfléchi par le produit
- Echo se déplaçant en fonction du niveau

• **Echo Parasite :**

- Réflexion créer par un obstacle fixe se trouvant sur le trajet de l'onde entre le capteur et la surface du produit
- Echo se situant toujours au même endroit
- Echo se situant toujours devant l'Echo Produit

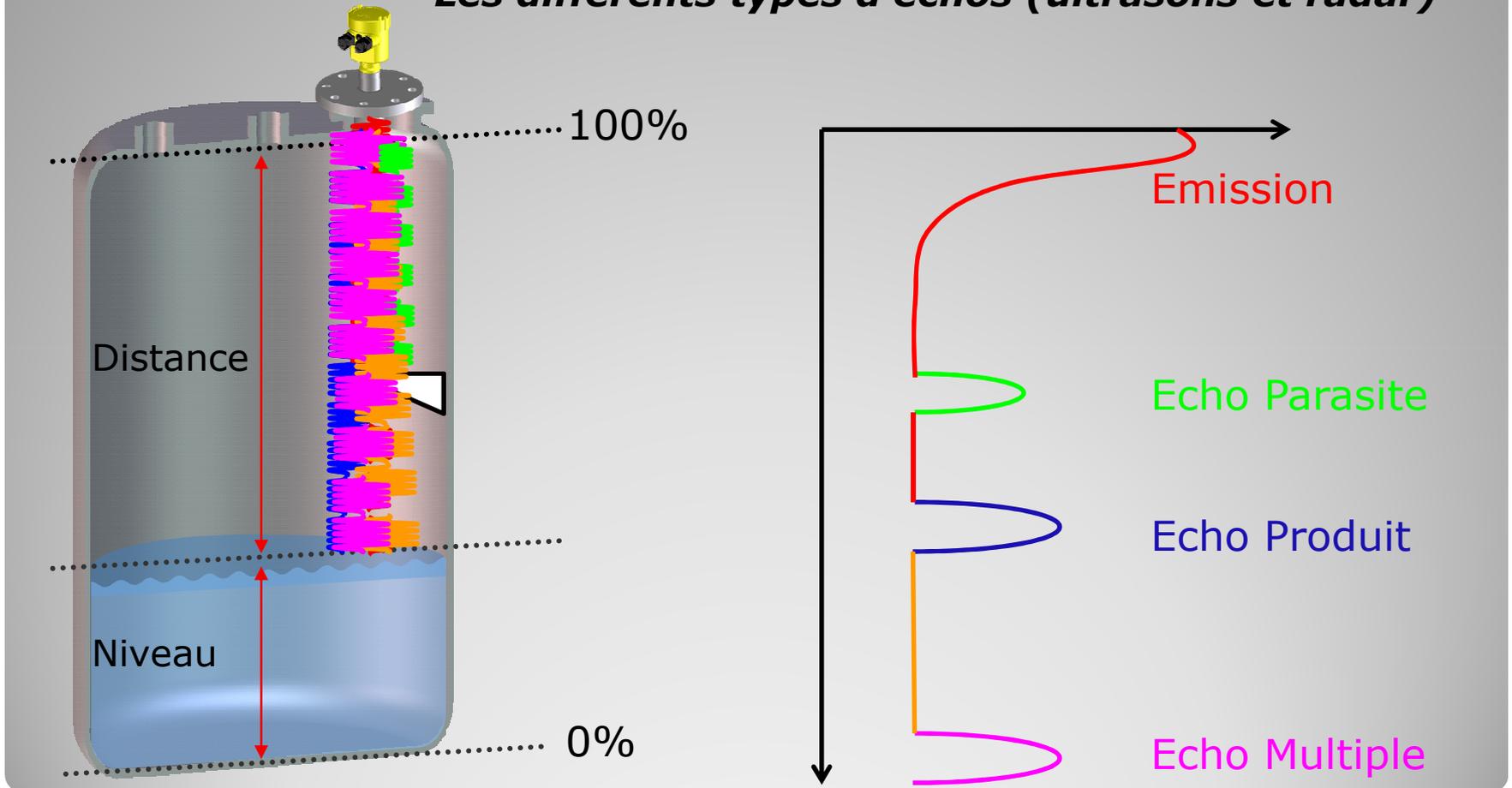
• **Echo Multiple :**

- Onde résiduelle réfléchi par l'environnement (toit, paroi, produit)
- Echo se déplaçant en fonction du niveau
- Echo se situant toujours après l'écho Produit



Mesures de niveau non intrusives

Les différents types d'échos (ultrasons et radar)



Mesures de niveau non intrusives

- **Capteur de niveau sans contact**

à ultrasons, à impulsions radar ou à ondes continues

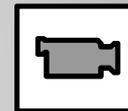
Principe du temps de parcours



Fonctionnement impulsions radar / radar FMCW



Avantages du radar FMCW



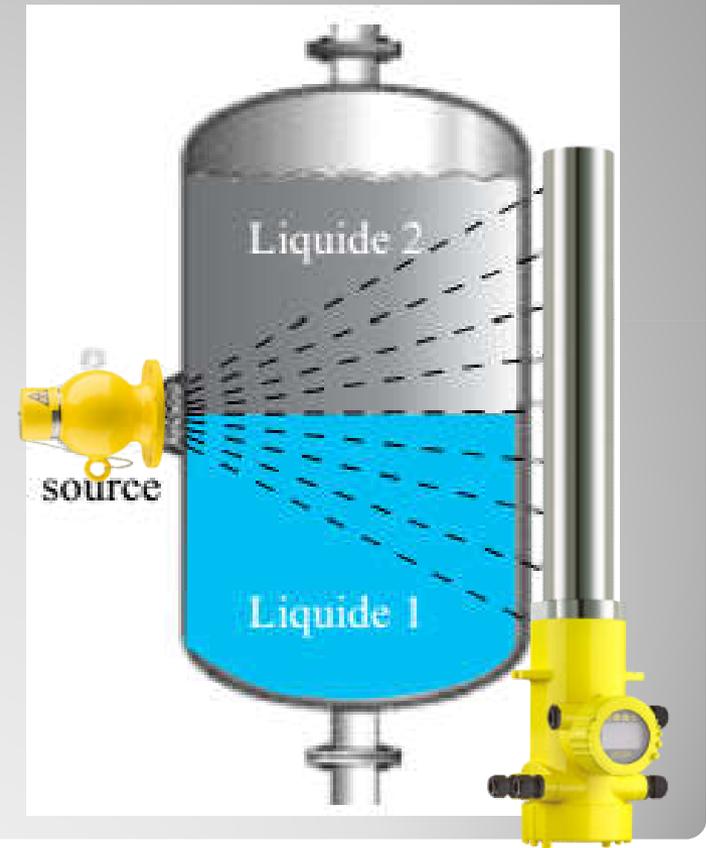
Mesures de niveau non intrusives

• Sonde à absorption de rayons gamma

Principe

Mesure par radio-isotopes basée sur l'absorption des rayons gamma lorsqu'il traversent un produit. Il s'applique à une mesure de niveau, une mesure d'interface entre deux liquides, une mesure de densité de produit.

Une source radioactive est un transmetteur sont montés sur des côtés opposés d'un réservoir, de sorte que les deux liquides 1 et 2 soient traversés par les photons du rayonnement gamma. Le transmetteur calcule la position de l'interface à partir de l'intensité du rayonnement reçu.



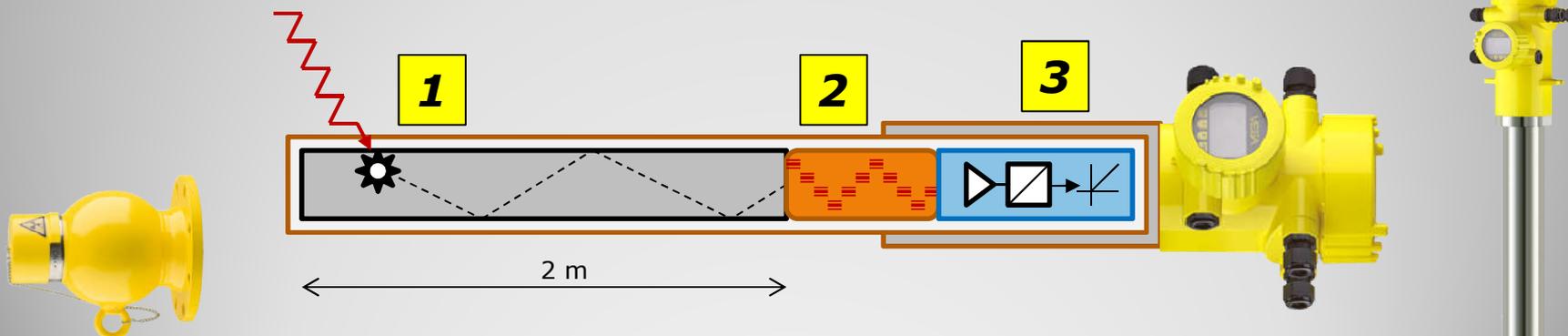
Mesures de niveau non intrusives

• Sonde à absorption de rayons gamma

L'ensemble de mesure radiométrique se compose d'une source radioactive (isotope Cs137 ou Co60 selon l'application), intégrée dans un conteneur de source radioactive, et d'un transmetteur composé d'un scintillateur, d'un photomultiplicateur et d'une électronique d'exploitation.

Le taux d'impulsion est converti par l'électronique en signal de niveau dont l'échelle maximale est d'environ 2 m.

- 1) Les rayons gamma génèrent des éclairs de lumière dans le scintillateur
- 2) Le photomultiplicateur convertit ces éclairs en impulsions électriques et les amplifie
- 3) L'électronique calcule la valeur mesurée à partir des taux d'impulsion



Mesures de niveau non intrusives



La mesure de débit

Les économies de matières premières, semi-finies, et d'énergie demandent une évaluation de plus en plus précise des quantités disponibles de la part des gestionnaires, avec pour conséquence un nombre croissant d'installation de débitmètres. Les méthodes les plus utilisées sont,

Mesure de débit par pression différentielle

Mesure de débit par la vitesse

Mesure de débit par organe déprimogène

Mesure de débit par méthode directe

Débitmètre électromagnétique

Débitmètre à effet vortex

Débitmètre à ultrason

Débitmètre à effet de Coriolis

Débitmètre thermique

Mesure de débit sur canaux ouverts

La mesure de débit

Mesures de débit par pression différentielle



Débit par Pression différentielle

• Mesures du débit par la vitesse

Principe, la mesure de la pression dynamique P_d permet de connaître la vitesse U et d'en déduire le débit Q_v à l'aide de

l'équation de continuité : $Q_v = S \cdot \sqrt{(2 \cdot P_d / \rho)}$

Tube de Pitot

$P_d = P_{s1} - P_{s2} = \Delta P$ par mesure du transmetteur de pression différentielle

Avec $P_{p1} = P_{p2} = \rho \cdot g \cdot z$

Le point 1 est un point d'arrêt

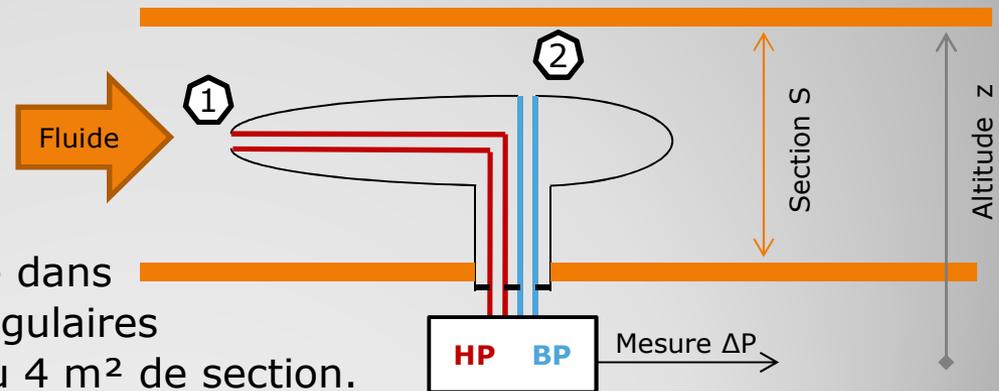
$U_1 = 0$ et $P_{d1} = 0$

L'équation de Bernoulli donne:

$Q_v = S \cdot \sqrt{(2 \cdot \Delta P / \rho)}$ ou $Q_v = K \cdot \sqrt{\Delta P}$

La sonde de Pitot peut être placée dans des conduites cylindriques, rectangulaires ou d'autres formes et jusqu'à 3 ou 4 m² de section.

Toutes les conditions d'application de mesure d'un débit par tube de Pitot sont décrites dans les normes NF X 10-112 et NF X 10-113.



Débit par pression différentielle

- **Mesures du débit par la vitesse**

Sonde Annubar (sonde de Pitot moyennée)

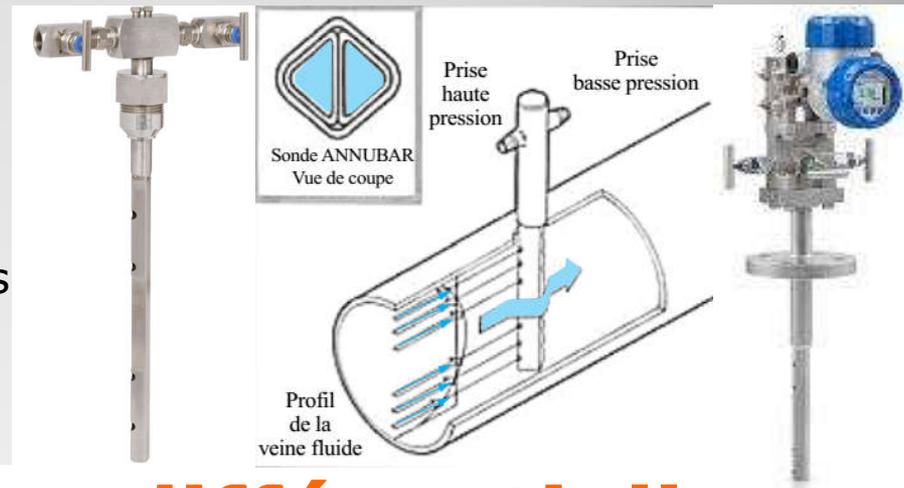
La sonde possède plusieurs orifices pour la prise de mesure de la pression dynamique, la répartition de la vitesse débitante U dans la conduite est mieux prise en compte qu'avec la sonde de Pitot, c'est une sonde « *multipitot* ».

En fonction de la dimension de la conduite, un coefficient de sonde K , dépendant du positionnement et du nombre de ses orifices, est donné par le fabricant pour la détermination du débit à partir de la ΔP mesurée par un transmetteur de pression

Différentielle : $Qv = K \cdot \sqrt{\Delta P}$

En l'absence de normes concernant les sondes Annubar, il est conseillé de se référer aux indications données par les fabricants.

Les sondes peuvent atteindre 12m
De longueur.



Débit par pression différentielle



• Mesures du débit par organe déprimogène

Principe :

Une restriction dans une conduite contracte la veine fluide et provoque un changement de la pression statique.

Cette dépression entre l'amont et l'aval de cette restriction, appelée **organe déprimogène**, dépend du débit.

L'équation de Bernoulli entre 1 et 2 est : $P_{s1} + P_{d1} + P_{p1} = P_{s2} + P_{d2} + P_{p2}$

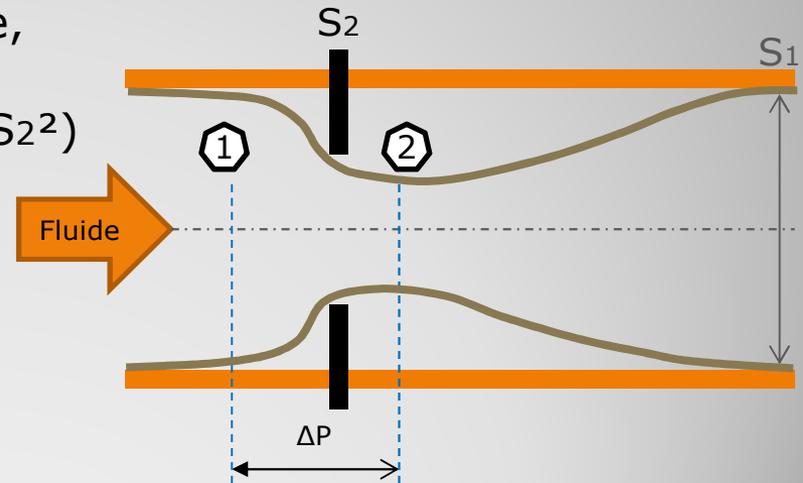
On a $P_{p1} = P_{p2} = \rho \cdot g \cdot z$ et la mesure de la différence des pressions statiques donne,

$$\Delta P = P_{s1} - P_{s2} = 0,5 \cdot \rho \cdot U^2 = (0,5 \cdot \rho \cdot Q_v^2) / (S_1^2 - S_2^2)$$

Soit, $Q_v = \sqrt{(S_1^2 - S_2^2) \cdot 2 \cdot \Delta P / \rho}$

donc **$Q_v = K \cdot \sqrt{\Delta P}$**

avec S_1 la section de la conduite
et S_2 la section de passage de
l'organe déprimogène.



Débit par pression différentielle

- **Mesures du débit par organe déprimogène**

Les différents organes déprimogènes :

Diaphragme, Tuyère et **Venturi** sont les principaux organes utilisés.

Chacun possède ces qualités et limites, mais dans 85% des cas, c'est le diaphragme ou plaque à orifice qui est utilisé (fabrication simple et prix).

Tuyères et Venturis perturbent moins la veine fluide et engendrent de faibles pertes de charge et donc d'énergie.

Un débitmètre à diaphragme peut être utilisé pour des transactions commerciales si il est installé en respect des règles de la norme ISO 5167, contrairement aux tuyères et venturis.



Diaphragme

Tuyère

Venturi

Débit par pression différentielle



Mesures de débit par méthode directe



Débit par méthode directe

• Débitmètre électromagnétique

Principe :

Le fluide électriquement conducteur s'écoule à la vitesse V perpendiculairement à un champ magnétique β engendré par deux bobines d'induction.

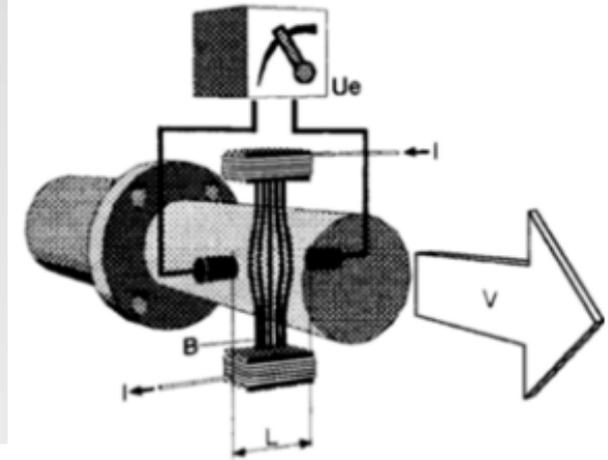
Une tension U_e induite par ce champ est captée par deux électrodes distantes d'une longueur L . La loi de Faraday conduit à : $U_e = L \cdot \beta \cdot V$

Le transmetteur délivre un signal de mesure 4-20 mA proportionnel au débit volumique.

Application : interdit aux gaz et vapeurs, réservé aux liquides conducteurs $> 1 \text{ mS/cm}$.

Les nombreux revêtements possibles permettent de s'adapter aux liquides visqueux, pâteux, chargés d'impuretés, corrosifs ou abrasifs.

Montage : longueurs droites amont et aval Doivent être respectées (4 à 5 x DN).



Débit par méthode directe



• Débitmètre à effet vortex

Principe :

A partir d'une certaine vitesse, lorsqu'un fluide rencontre un obstacle, des tourbillons appelés **vortex** se forment puis se détachent sur les côtés en générant des variations de pression.

Les variations oscillatoires de pression sont détectées par un **capteur de force** situé derrière l'obstacle, permettant le comptage des vortex.

Le **nombre** de vortex générés par unité de temps est proportionnel à la vitesse débitante **U** moyenne du fluide.

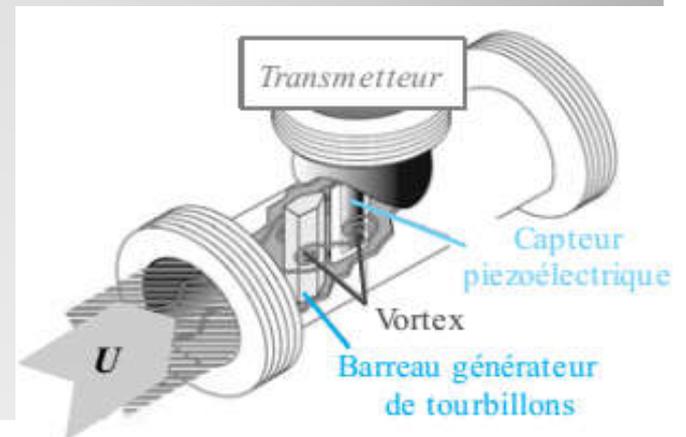
Le signal de mesure 4-20 mA du transmetteur est proportionnel au débit volumique.

Application : capable de mesurer des débits de liquide, gaz et vapeur, son domaine d'application est vaste, et tolère des températures et pressions aussi bien hautes que basses.

Il concurrence les organes déprimogènes (meilleure rangeabilité, installation et entretien moins contraignants pour les débits vapeur ou gaz).

Montage :

Longueurs droites en amont (15 à 40 x DN).



Débit par méthode directe



• Débitmètre à ultrason (à temps de parcours)

Principe :

Pour les **liquides propres**, le temps de parcours d'une onde ultrasonore se propageant à la vitesse **C** obliquement d'une **sonde A** à une **sonde B** par rapport à l'axe de l'écoulement du fluide dépend de la vitesse **U** de ce fluide.

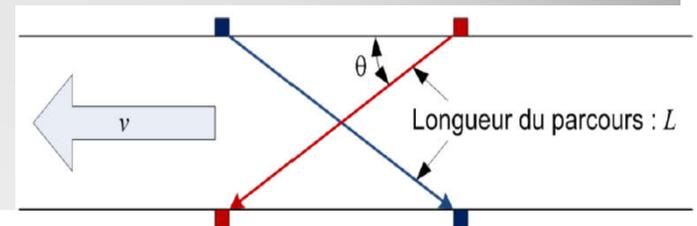
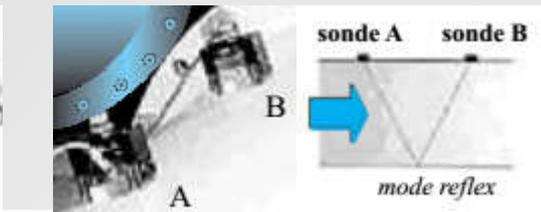
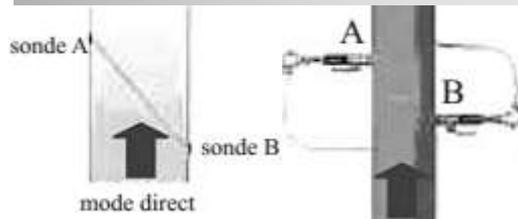
La différence entre les temps t_{AB} et t_{BA} est proportionnel à la vitesse débitante **U**, et le débit volumique $Q_v = S \cdot U$

Le signal de mesure 4-20 mA du transmetteur est proportionnel au débit volumique.

Montage : En mode direct ou mode reflex

Sondes externes sont fixées à l'extérieur de la conduite à titre provisoire ou définitif, les règles d'installations recommandées par le fabricant doivent être scrupuleusement respectées pour obtenir la précision annoncée.

Les sondes internes à insertion sont économiques pour les diamètres >400mm



Débit par méthode directe



• Débitmètre à ultrason (effet doppler)

Principe :

Méthode destinée aux liquides contenant des bulles ou des matières en suspension (entre 2 et 60% de matière solide). L'appareil est basé sur la réflexion des ondes acoustiques sur les particules présentes dans le fluide. Il ne peut fonctionner que sur des fluides chargés. Un émetteur piézo-électrique émet un signal à l'intérieur de la conduite.

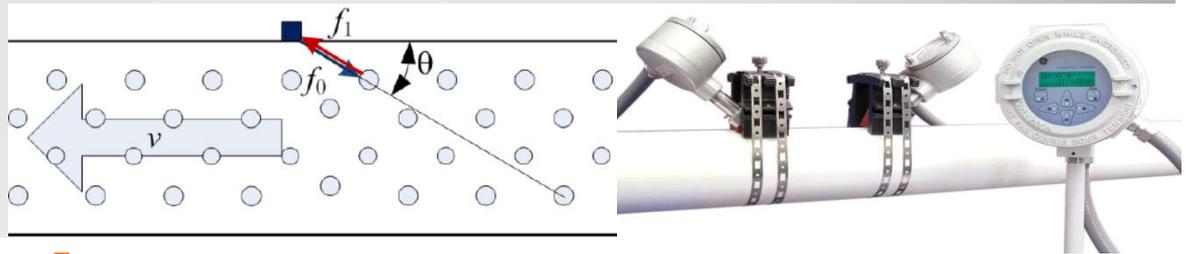
Les particules véhiculées par le fluide réfléchissent une partie de ce signal vers un récepteur. La différence de fréquence entre émetteur et récepteur est fonction de la vitesse de déplacement des particules donc de la vitesse de l'écoulement.

Connaissant la section de la conduite, on accède ensuite au débit.
Imprécision de l'ordre de $\pm 3\%$.

Vitesse d'écoulement : $V = k \cdot \Delta f$

avec $k = C / 2 \cdot f_0 \cdot \cos(\theta)$

On en déduit $Q_v = S \cdot V$



Débit par méthode directe

• Débitmètre à effet de Coriolis

Principe :

Le fluide circule dans le tube (courbé) de mesure qui est soumis à une excitation vibratoire. Cette vibration engendre une **force de Coriolis F_c** s'exerçant sur la masse **M** du fluide présent dans le tube.

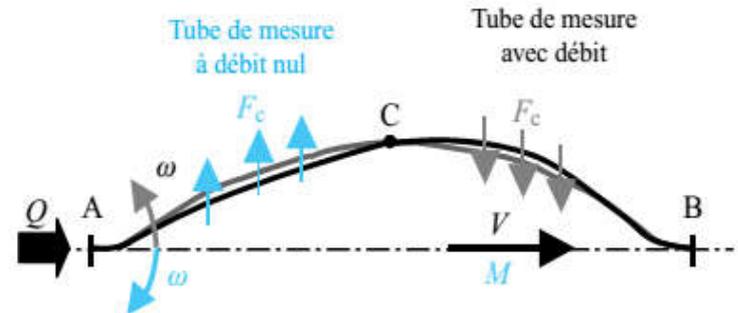
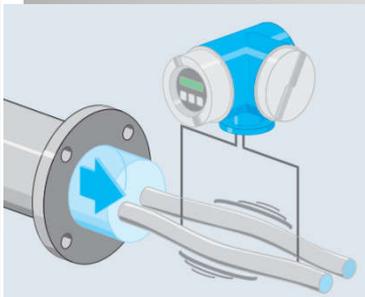
$F_c = -2.M.\omega.V$ avec ω étant la vitesse angulaire du tube (excitation vibratoire)

Cette force est proportionnelle au produit **$M.V$** donc au débit masse **Q_m** .

Le tube de mesure vibre à sa fréquence de résonance, et dès que la masse **M** change, elle modifie les oscillations de l'ensemble tube et fluide, et la fréquence s'autorégule automatiquement.

En mesurant la **légère déformation** du tube soumis à cette force de Coriolis, on obtient la mesure de débit massique **Q_m** .

Le signal de mesure 4-20 mA du transmetteur est proportionnel au débit massique.



Débit par méthode directe



• Débitmètre thermique

Principe :

Dans la section de mesure, le fluide passe sur deux thermo-résistances, l'une d'entre elles sert de sonde de température, l'autre d'élément chauffant régulé à une différence de température constante par rapport à la température du fluide mesurée.

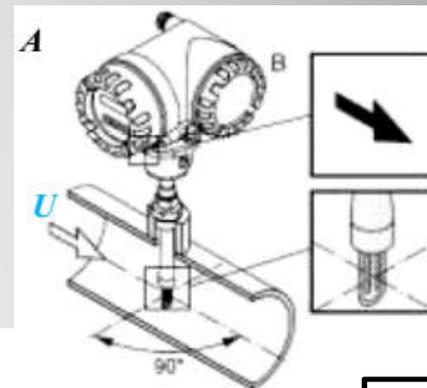
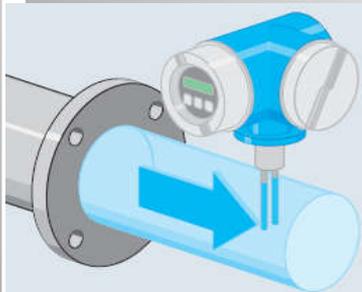
L'intensité mesurée du courant pour maintenir cette température constante est d'autant plus grande que le débit masse est grand, et donne de ce fait une mesure directe du débit massique.

Le transmetteur délivre un signal de mesure 4-20 mA proportionnel au débit massique.

Applications générale et montage :

Mesures sur les gaz ou l'air comprimé, et sur les faibles plages pour les liquides.

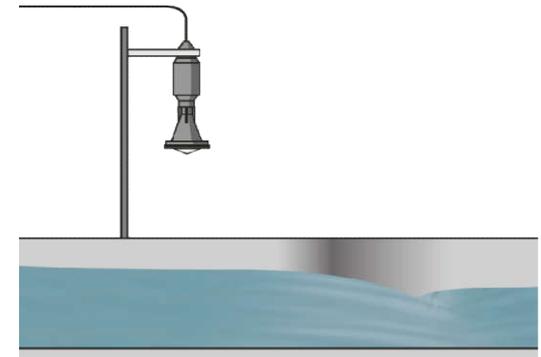
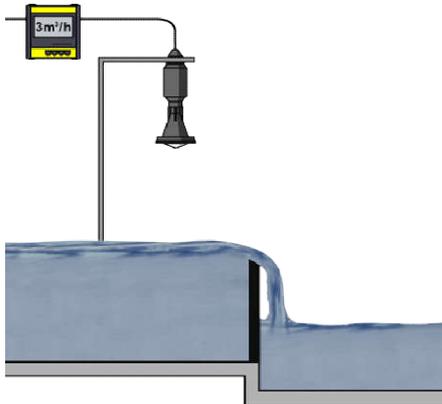
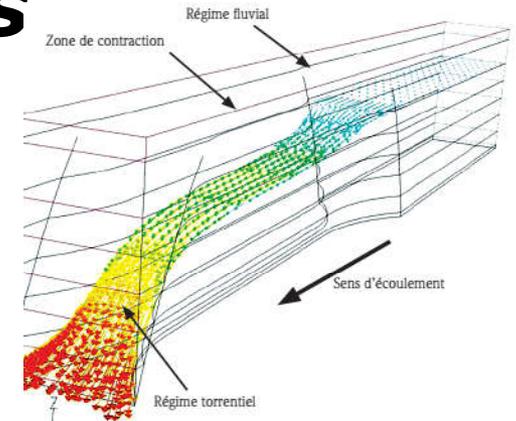
Conduite horizontale, verticale ou oblique. Dans le cas de sonde à insertion, les positions à respecter pour le sens d'écoulement (flèche) et l'orientation de l'élément chauffant sont indiquées, tout écart peut engendrer des erreurs.



Débit par méthode directe



Mesures de débit sur canaux ouverts



Débit sur canaux ouverts

- **Débitmètre à écoulement libre**

Principe : La mesure de débit peut être faite sur canaux ouverts, les débitmètres à écoulement libre peuvent être des **déversoirs** ou des **canaux jaugeurs**.

Un déversoir est un organe déprimogène, c'est l'équivalent pour les canaux ouverts de la plaque à orifice en conduite fermée.

C'est un barrage perpendiculaire à l'écoulement du liquide dans le canal. Le trop plein du barrage s'écoule par un déversoir, ce qui fait qu'en amont du barrage, il y a une augmentation du niveau par rapport à l'aval.

La mesure de ce **niveau** en amont permet de déduire le débit. Il existe des déversoirs **rectangulaires**, **trapézoïdales** ou **triangulaires**.

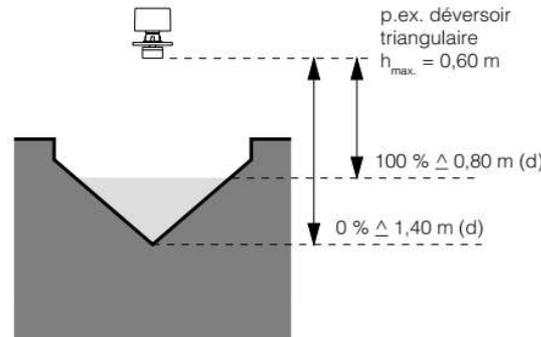
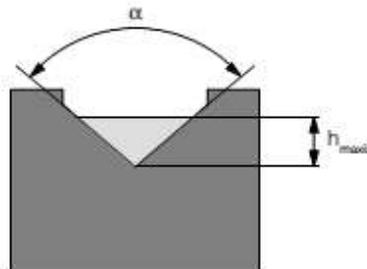
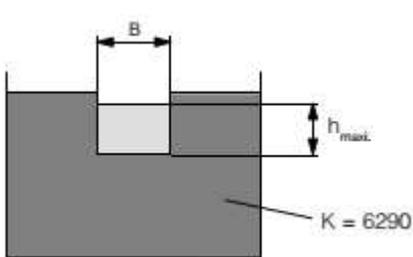
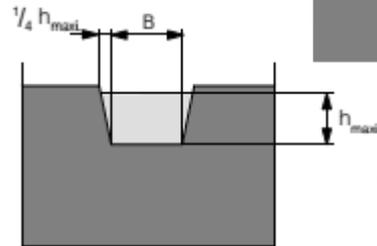
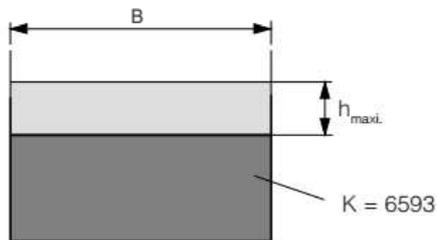
Débit sur canaux ouverts

• Les principaux déversoirs

Réglage

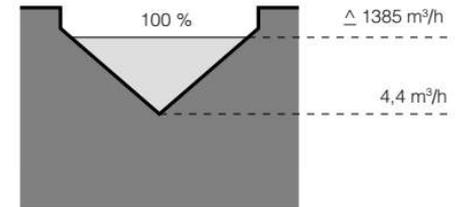
- Application
- Capteurs

Mesure de débit à ultrasons à impulsions radar

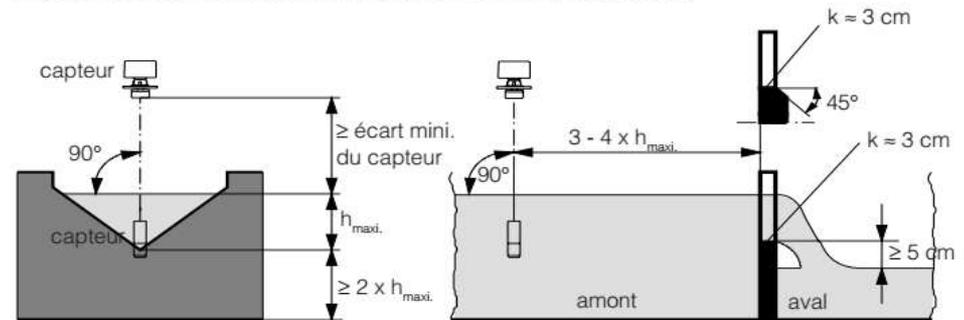


Exemple se rapportant au déversoir triangulaire (voir page 31):

- débit maxi. 1385 m³/h
- débit mini. 4,4 m³/h



Canal avec paroi de mesure (p.ex. déversoir triangulaire)



Débit sur canaux ouverts