

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY Tizi-ouzou



Faculté de génie électrique et informatique
DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

Mémoire de fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electronique Industrielle

Présenté par

Mohamed SMAIL

Toufik ALI-CHERIF

Thème

Manipulation des capteurs utilisés à la séparation des gaz (Oxygène, Azote, Argon) à l'unité de linde gas Algérie

Mémoire soutenu publiquement le 30/06/2015 devant le jury composé de :

M Mourad LAZRI

M.A.C (B), UMMTO, Président.

M Youcef ATTAF

M.A.C (A), UMMTO, Encadreur.

M Fethi OUALOUCHE

M.A.C (A), UMMTO, Examineur.

M Slimane HAMEG

M.A.C (B), UMMTO, Examineur.

REMERCIEMENT

Nous rendons avant tout au dieu tout puissant qui nous a aidés à surmonter les difficultés que nous avons rencontrées tout au long de notre travail.

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos vives gratitudee et notre profonde reconnaissance à notre promoteur Mr ATTAF YUCEF.

Nous adressons également nos sincères remerciements à notre encadreur NAIT MOHAND YACINE d'avoir proposé le thème et pour son encouragement qui permet le bon déroulement de notre stage, pour sa précieuse aide et ses conseils et sa disponibilité permanente, tout au long de notre travail afin de réaliser au mieux notre travail.

Nos remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire et qui se sont dévoués pour nous venir en aide. Enfin, nous tenons à remercier également les membres de jury qui nous ferons l'honneur de juger notre travail.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes chers parents qui ont su me donner du courage et du soutiens
tout au long de mon cursus.*

A mes chers frères et sœurs Md Arezki, Kenza, Fateh, Thanina.

*A mes grands parents maternel et à la pensée de mes deux grand mères WAWA et
THAHMANATS.*

*A mes oncles et tantes Ali, Lyes, Ouahiba, Hamou ainsi qu'aux petites qu'aux ptites anges
Zahra, Sabrina et Imène.*

*A tout mes amis notamment Achir Fouad et surtout à Hammouche myriem qui sont
toujours là aux moments difficiles.*

*Sans oublier mon binôme SMAIL MOHAMED la promotion de 2015, aux membres de
l'association « ECO-NATURE », et tout ceux qui me connaissent et ceux que j'aime*

ALI-CHERIF Toufik

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Vous mes chers parents, je dédie ce modeste travail qui est le fruit de vos interminables conseils ; assistance et soutien moral, en témoignage de ma reconnaissance et mon affection, dans l'espoir que vous en serez fiers.

Et pour mon frère Cherif, mes sœur Samia et Hanane, ma grand-mère

,Chabha Djeddis Sans oublie tout la famille Smail , Amichi

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes camarades :Ali chrif

toufik qui est mon binôme ,Samir Slimani , Zioui Brahim Teghrine Faredj

,Samir Mzali ,Samir Tazekrit.

Merci à toutes les personnes que je n'ai pas citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail. Merci pour leur sympathie et simplement pour le plaisir que j'ai eu à les côtoyer quotidiennement.

Smail Mohamed

Table des matières

I.	Histoire de la société Linde.....	4
II.	Secteurs/ Pôles d'activité de l'entreprise Linde.....	8
III.	Présence de Linde dans le monde.....	9
IV.	Direction de Linde	9
V.	Données financières de l'entreprise Linde	9
I.	Définition :	11
II.	Constitution générale d'un capteur	12
A.	Mesurande :	12
B.	Corps d'épreuve :	12
C.	Transducteur :	12
D.	Conditionneur :	12
E.	Transmetteur :	12
F.	Signal normalisé :	13
III.	Corps d'épreuve et Capteurs composites.....	13
IV.	Les capteurs actifs.....	13
A.	Effet thermoélectrique :	13
B.	Effet pyroélectrique :	13
C.	Effet piézoélectrique :	14
D.	Effet d'induction électromagnétique :	14
E.	Effet photoélectrique :	14
F.	Effet photoémissif :	14
G.	Effet photovoltaïque :	14
H.	Effet photo-électromagnétique :	14
I.	Effet de Hall :	14
V.	Les capteurs passifs.....	15
VI.	Grandeurs d'influences	17
VII.	Les capteurs intégrés.....	18
VIII.	Les capteurs intelligents	20
IX.	Caractéristique des capteurs	21
A.	L'étendue (bande passante)	21
B.	Sensibilité :	22

C.	Rapidité (temps de réponse) :	22
D.	Linéarité :	22
E.	Précision :	22
X.	Etalonnage d'un capteur	23
XI.	Types d'erreur d'un capteur	23
A.	Erreur de linéarité :	23
B.	Erreur d'hystérésis :	23
C.	Erreur de zéro ou « offset » :	24
D.	Erreur d'échelle ou de gain :	24
I.	Capteurs de niveau :	26
A.	Mesure par un capteur de pression différentielle :	27
1.	Principe	27
2.	Avantages :	27
3.	Inconvénients :	28
II.	Capteurs de température :	28
A.	Température :	28
B.	Echelles de température (grandeur intensive) :	28
1.	Kelvin :	28
2.	Celsius :	29
3.	Fahrenheit :	29
C.	Types de capteurs de température :	29
1.	Les thermocouples :	29
2.	Les sondes RTD : (Resistance Temperature Detectors - capteurs de température à résistance) :	33
3.	Les thermistances :	35
III.	Capteurs de pression :	37
A.	Définition de la pression	37
B.	Définition des différentes pressions	38
1.	La pression absolue :	38
2.	La pression atmosphérique ou pression barométrique :	38
C.	Pression pour les fluides (liquide et gaz)	39
1.	Pression hydrostatique	39
2.	Pression due à des forces extérieures :	39
3.	Pression totale - Charge :	39

D.	Manomètres hydrostatiques	40
1.	Fonction remplie	40
.....(8)	40
2.	Présentation technique du dispositif :	40
E.	Les capteurs à membrane.....	41
1.	Principe de fonctionnement	41
F.	Les capteurs à jauges extensométriques :	41
1.	Avantages :	42
2.	Inconvénients :	42
IV.	Capteurs de débit	43
A.	Mesure de débit :	43
1.	Débit volumique :	43
2.	Débit massique :	43
B.	Le débitmètre à pression différentielle :	43
1.	Principe :	43
C.	Les venturis :	44
D.	Les organes déprimogènes:	45
E.	Les plaques orifices :	47
F.	Les tuyères :	48
G.	Mesure par vitesse linéaire :	49
1.	Les débitmètres électromagnétiques.....	49
2.	Les débitmètres à ultrasons :	50
H.	Les débitmètres à vortex :	53
I.	Débitmètres à turbine :	54
J.	Mesure par Débit de masse :	55
1.	Débitmètre-masse à effet Coriolis :	55
2.	Débitmètre massique thermique :	55
V.	Capteurs de vibration :	57
A.	Capteur de déplacement :	57
1.	Principe de fonctionnement :	58
2.	Avantages :	59
3.	Inconvénients :	59
I.	Description.....	62
A.	Détails.....	62

B.	Avantages	62
II.	Aperçu	64
A.	Avantages	65
III.	Composition :	66
IV.	Domaine d'application	66
V.	Transmetteur de pression relative :	67
VI.	Transmetteur de pression absolue	67
VII.	Transmetteurs de pression différentielle et de débit	68
VIII.	Construction :	68
IX.	Fonctions :	70
A.	Fonctionnement de l'électronique avec communication HART :	70
B.	Fonctionnement de l'électronique avec communication PROFIBUS PA :	71
C.	Fonctionnement de l'électronique avec communication FOUNDATION Fieldbus :	73
X.	Fonctionnement de la cellule de mesure :	74
A.	Cellule de mesure pour pression relative :	74
B.	Cellule de mesure de pression absolue Type "Pression différentielle" :	75
XI.	Paramétrage DS III :	76
A.	Paramétrage par touches intégrées (commande locale) :	76
B.	Paramétrage via communication HART :	76
C.	Paramètres librement déterminables pour DS III HART :	77
D.	Fonctions de diagnostic pour DS III HART :	77
E.	Unités physiques disponibles pour l'afficheur du DS III HART	78
F.	Paramétrage via communication interface PROFIBUS	78
G.	Paramétrage via interface FOUNDATION Fieldbus	78
H.	Paramètres librement déterminables pour DS III PA et FF	79
I.	Fonctions de diagnostic pour DS III PA et FF	79
J.	Unités physiques disponibles à l'affichage :	80
XII.	Commande sur place et affichage :	80
A.	Afficheur numérique :	82
B.	Visualisation de la valeur de mesure	82
C.	Affichage de l'unité/bargraphe :	84
XIII.	Définir/régler le début de mesure, la fin de mesure :	85
A.	Explications théoriques	85
1.	Entrer via consigne de pression	85

2.	Régler avec l'aide d'une pression de référence :	87
XIV.	Réglages.....	89
A.	Définir le début de mesure et la fin de mesure :	89
B.	Régler le début de mesure et la fin de mesure :	89
	Conclusion générale.....	91
	Bibliographie.....	93

Plan de travail :

Introduction générale.....	2
Chapitre I : Présentation de linde Gas.....	4-9
Chapitre II : Etude des capteurs.....	11-24
Chapitre III : Les capteurs utilisés au sein de l'unité.....	26-60
Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII.....	62-89
Conclusion générale.....	91
Bibliographie.....	93

Introduction générale

Avec les progrès scientifiques et techniques, il nous est possible de mesurer les grandeurs physiques en leur associant une valeur numérique est de définir les interactions entre ces grandeurs physiques liées aux phénomènes.

Il est évident que la mesure a un rôle de plus en plus important dans le développement du monde industriel avec la robotique, le perfectionnement de l'automatisme entre autres. Ayant de nombreuses applications dans multiples secteurs, la mesure doit être considérée avec une attention particulière très soutenue.

Ainsi les remarquables performances techniques, de nouveaux matériaux et des dispositifs sont créés afin de faciliter à l'homme son intervention dans beaucoup de domaines tout en ménageant ses efforts.

La réalisation de ces dispositifs nécessite que l'on attribue à leurs éléments constitutifs des caractéristiques que la mesure permet d'ajuster aux valeurs appropriés.

Un dispositif ou une machine doit être l'objet de contrôle des qualités de fabrication, des normes de sécurité et d'installation, or qui dit, contrôle dit vérification par mesure d'un certain nombre de grandeurs physiques ont leurs valeurs assignés.

Une bonne mesure impose une transmission à distance de l'information délivrée du point de sa saisie, une protection contre les phénomènes parasites avant toute exploitation de quelques manières que ce soit. De ce fait, pour la mesure de tout type de grandeur physique, il est préférable de traduire sous forme de signal électrique chacune des grandeurs physiques considérées.

Ainsi le rôle du capteur est de délivrer au point où se fait la mesure, à partir d'une grandeur physique non électrique, une autre grandeur souvent électrique (courant, tension,...), fonction de la première, est directement utilisable pour la mesure ou la commande.

Dans l'étude des capteurs qui sont différents par les grandeurs physiques qu'ils mesurent, Notamment dans l'industrie des gaz on donne le choix aux principes physiques qui sont à leurs bases. Hormis les principes physiques, on mettra l'accent dans cette étude sur les propriétés spécifiques des capteurs.

Chapitre I

*« Présentation de Linde
Gas »*

I. Histoire de la société Linde

L'entreprise Linde a été fondée par Carl von Linde, un ingénieur spécialisé en mécanique. Sa première entreprise était spécialisée dans les locomotives. En 1868, il devient professeur à l'université Polytechnique de Munich, où il développe le réfrigérateur. En 1872, il crée avec d'autres entrepreneurs la Gesellschaft für Linde's Eismaschinen AG. La vente des premiers réfrigérateurs à des professionnels est un tel succès que le groupe est obligé de se lancer dans la production de réfrigérateurs pour la consommation personnelle. Ces machines ont aussi été utilisées pour les bateaux, les patinoires, la réfrigération dans les laiteries ainsi que pour la liquéfaction d'acide carbonique et de chlore. Par ailleurs, une autre entreprise utilisant le processus de séparation de l'oxygène est fondée par Arthur et Léon Brin. Cette entreprise s'appellera Brin's Oxygen Company et a été fondée en 1886. De 1879 à 1890, l'oxygène est très utilisé dans les théâtres en particulier dans les lanternes. A partir de 1891, Linde lance un nouveau processus qui consiste à mettre de l'air compressé dans une machine. L'air compressé qui est pré-rafraîchi se refroidit de plus en plus dans un contrecourant avec le froid produit par l'expansion de l'air jusqu'à ce qu'il soit liquéfié à moins de 190 degrés Celsius. Les débuts furent difficiles parce qu'il avait des problèmes pour réussir à séparer l'air de ses constituants qui sont l'oxygène, l'azote et certains gaz inertes. Mais il fallut attendre 1902 pour voir le processus se réaliser grâce à la méthode de distillation d'alcool. La première entreprise de fabrication de cet air fut installée à Höllriegelskreuth près de Munich. Dans les années 1880, le groupe est représenté aux États-Unis grâce à son concessionnaire Fred Wolf qui est situé à Chicago. Avant la première guerre mondiale, Linde installe de nombreuses filiales et des co-entreprises dans plusieurs pays d'Europe et à l'étranger comme aux États-Unis.

Linde deviendra par la suite un membre du conseil d'administration de BOC. Comme Carl von Linde retourne à l'université, il confie le département qu'il avait à ses deux fils Friedrich et Richard. En 1912, les frères Linde et leur beau-frère Rudolf Wucherer construisent un appareil à deux colonnes qui pourrait produire à la fois de l'oxygène et de l'azote. Pendant la première guerre mondiale, Linde construit des entreprises nécessaires à la production de Salpêtre utilisée pour les fertilisants et les explosifs. Le département de réfrigération est lui concentré sur la production de chambres froides pour le stockage et la conservation des aliments. Une réussite économique pendant la première guerre mondiale

reste le processus de séparation du gaz de coke afin de produire un mélange d'hydrogène et d'azote pour la synthèse d'ammoniac. Linde s'est appuyé sur les difficultés rencontrées pendant l'après-guerre pour moderniser ses opérations à gaz. Le gendre de Carl a construit près de 20 nouvelles entreprises et la production a quadruplé depuis la construction de l'entreprise. C'est lui le fondateur du segment gaz de Linde puisqu'il a réussi à faire fructifier le capital de départ sur le long terme. En effet, il a réussi à construire des usines de production de gaz et à commercialiser les gaz produits. L'entreprise familiale qui était au début une entreprise d'ingénierie se transforme en une société industrielle. En 1920, Linde a racheté l'entreprise Maschinenfabrik qui produisait des petites machines de réfrigération pour le secteur alimentaire ainsi que de l'air liquéfié. Pour produire ce gaz liquéfiant, Linde a acquis le G. H. Walb et Co située à Mainz-Kostheim. Par ailleurs, en 1922, le groupe acquiert des actions au sein de Heylandt-Gesellschaft puis acquiert en 1929, l'entreprise Guldner Motoren-Gesellschaft m.b. H.. Au Royaume-Uni, Boc joue un rôle dans l'effort industriel pour reconstruire la Grande Bretagne. Une autre méthode pour produire de l'oxygène voit le jour. Au début des années 30, un nouveau système de transport d'oxygène liquide voit le jour. On parle alors du système Heylandt, un système de navires citernes. A partir de 1933, l'Allemagne entre dans la marche vers la guerre. En effet, le groupe est intégré au processus de guerre grâce à ses produits et ses processus de fabrication mais les relations entre le comité exécutif et les membres de la famille Linde restèrent distants.

Grâce à son expansion internationale pendant les années 30, BOC a pu réduire sa dépendance en provisions de carbure de calcium pour produire de l'acétylène et développer la production en Australie, en Inde et en Afrique du Sud. BOC crée une nouvelle division médical en 1935 ce qui lui permet de diversifier ses activités et concepts comme l'oxygène par robinet dans les salles d'hôpitaux. BOC est aussi intégré au processus de guerre. En effet, une centrale d'hydrogène électrolytique au Royaume-Uni est construite pour alimenter les ballons de barrage. BOC ouvre également une entreprise d'électrode en Australie pour aider à l'effort de guerre. Friedrich, fils du créateur a été d'accord pour être nommé, directeur du groupe mais les nazis ont refusé sa nomination. Une nomination au poste de directeur de l'association allemande des ingénieurs de la réfrigération est refusée par Friedrich. Par ailleurs, plusieurs employés de confession juive sont exclus de l'entreprise. Cependant, ils la réintégreront après guerre. Près de 230 ouvriers étrangers ont été embauchés pendant la Seconde Guerre Mondiale pour faire face à l'effort de guerre. La plupart des usines de Linde ont été très endommagées voire détruites pour certaines. Cependant, malgré les dégâts la production a

vite repris. Un an après la capitulation allemande, l'entreprise est de nouveau rentable. Ce qui a fait repartir l'entreprise si rapidement, c'est le fait qu'elle ne se soit pas spécialisée dans une production de guerre et le fait aussi que peu d'usines de production se trouvaient en zone occupées. Linde a seulement eu des entreprises expropriées en zone soviétique et deux usines en Alsace-Lorraine. Un nouveau siège social est établi à Wiesbaden. L'Allemagne comme la France et les États-Unis entre dans une période faste qui se caractérise par une hausse du pouvoir d'achat, une hausse de la consommation ainsi qu'une forte croissance. Linde, quand à elle reçoit de nombreuses commandes venant de nombreux pays. Ces commandes concernent en priorité l'azote. Par ailleurs, les usines produisant de l'oxygène et de l'acétylène arrivent à leur limite de capacité de production, c'est pourquoi il est décidé de construire de nouvelles usines à Hambourg et Berlin. Pour satisfaire la demande accrue en oxygène dans les aciéries, BOC décide d'installer de nouvelles usines ainsi qu'un réseau de gaz qui est distribué par pipelines.

Par ailleurs, dans les années 50, l'entreprise a développé deux usines produisant de l'azote et de l'oxygène à Saint-Hélène au Royaume-Uni. Puis étant en pleine guerre Froide, l'entreprise Linde participe aux tests de fusée et à l'approvisionnement en gaz des missiles Thor. Cependant, dans la première moitié des années 1950, Linde rencontre des difficultés car les parts de marchés détenues dans le petit et grand équipement de réfrigération ont diminué à cause de la concurrence qui propose des prix nettement inférieurs. Théodore Linde se retire doucement alors du segment de réfrigération et l'activité sera réellement vendue en 2004. Dans la deuxième moitié des années 1950, le groupe fait une nouvelle découverte concernant l'hydrostatique. Linde a lancé sa première voiture fonctionnant à l'hydrostatique et fut appelé sous le nom de Hydrocar. L'ancienne usine d'ingénierie de Höllriegelskreuth est déplacée à cause des exigences des clients de l'industrie chimique et pétrochimique. Ce fut un risque économique au départ mais une grande réussite par la suite puisque au vu de l'avancée de la technologie. En 1952, Friedrich Linde quitte son poste de Président directeur général. Rudolf Wucherer lui succède et ce dernier démissionne deux ans plus tard, et il sera remplacé par Hugo Ohmbeck. En 1961, Johannes Wucherer fils de Rudolf Wucherer succède à Hugo Ohmbeck. La même année, l'entreprise change de nom pour prendre celui de Linde AG. Hermann Linde, petit fils du fondateur de l'entreprise devient alors représentant du comité de direction. Pendant ce temps là, BOC continue à se développer et développe ses activités dans de nouveaux domaines. En 1965, la découverte du pétrole sous la mer dans la mer du Nord a eu des conséquences sur la demande de plus en plus importante concernant les navires et les

composants soudés. BOC fait également l'acquisition de Murex, un fabricant d'équipement de soudure. En 1968, BOC acquiert aussi Edwards High Vacuum ce qui permet à l'entreprise de diversifier sa gamme de produits et d'ajouter des produits tels que de la soudure de faisceau électronique, des fines couches de films ainsi que de la technique de lyophilisation. Cependant, le cœur de métier de BOC est les gaz spéciaux qui sont la partie la plus importante de l'entreprise. A partir des années 1976, la tradition familiale n'est plus et c'est Hans Meinhardt qui reprend le poste de porte parole du comité de direction.

Il restructure l'entreprise qui devient à partir de cette période un groupe et lui donne une nouvelle orientation stratégique. Dans les 20 années suivantes, il a fait de Linde un des plus grands groupes allemand industriel avec une position de leader en ce qui concerne les marchés de la mécanique et de l'ingénierie. Par ailleurs, il développe la division du matériel avec 20 000 employés. Le développement à l'international se précise puisque des usines produisant de l'oxygène et de l'éthylène sont construites en Union soviétique, en Allemagne de l'est, en Pologne, en Roumanie. Par ailleurs, l'entreprise commence à gagner du terrain en Chine grâce à l'installation de nombreuses usines produisant de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote et d'autres gaz inertes. Après la réunification de l'Allemagne, le grand centre de production de gaz est établi à Leuna. Durant les années 1990, le groupe Linde intensifie sa présence aux États-Unis grâce à son usine Linde BOC Traitement des gaz. Le groupe est aussi très présent aux États-Unis dans le domaine des gaz techniques. Par ailleurs, l'entreprise récupère les droits de marque aux États-Unis qu'elle avait perdu durant la Seconde Guerre Mondiale. En 1999, le groupe rachète le producteur de gaz suédois Aktiebolag Gasaccumulator. En 1978, BOC double sa taille en faisant l'acquisition de AIRCO. BOC est alors une des plus grosses sociétés de gaz industriels. 4 ans plus tard, BOC détient 43 % du capital de la société japonaise OSK. Par ailleurs, en 2000, le groupe installe une de ses plus grosse entreprises au Mexique à Cantarell. Cette entreprise sera le plus grand gisement de pétrole en mer de l'entreprise. A la fin des années 80, BOC voit ses ventes explosées pour l'azote et les gaz spéciaux. BOC développe son activité grâce au développement des industries des plats cuisinés. Elle lance également une offre de loisirs en ce qui concerne l'approvisionnement de gaz pour la distribution de bière ainsi que les boissons non alcoolisées. En 2003, un nouveau directeur général prend les rennes de l'entreprise. Pour moderniser et dynamiser le groupe, il a été décidé de vendre la division Technologie de Linde. L'entreprise concentre alors l'essentiel de son activité sur les marchés en plein boom comme l'Asie, l'Europe de l'Est et les États-Unis.

En janvier 2006, Linde manifeste un intérêt pour l'acquisition de la société britannique BOC qui se manifeste alors par un rachat en septembre de la même année, ce qui donne naissance au nouveau groupe Linde. En 2007, le groupe décide de vendre son activité sur les composants. Elle inaugure la même année sa deuxième entreprise de liquéfaction d'hydrogène. En Chine, le gouvernement inaugure une station de ravitaillement en combustible d'hydrogène à Shanghai.



Figure I.1 :Logo Linde

II. Secteurs/ Pôles d'activité de l'entreprise Linde

Le groupe Linde présente 3 divisions:

1. **Les gaz industriels et la santé** : gaz comprimés et médicaux, gaz de pétrole liquéfiés, hydrogène, oxygène, nitrogène, et argon destinés aux industries chimiques, au secteur de l'agroalimentaire, de la mécanique, de l'automobile et de la santé.
2. **L'ingénierie** : conception, réalisation et construction d'installations telles que des unités de traitement de gaz, raffineries de pétrole, usines chimiques, ainsi que la fabrication d'équipements et de systèmes de semi-conducteurs et de ventilation tels que pompes à vide, ventilateurs de pression, systèmes de refroidissement et de séchage, de transmission et échangeurs de chaleur
3. **la Gestion** : qui s'occupe essentiellement des prestations d'approvisionnement et de services logistiques.

III. Présence de Linde dans le monde

Le groupe est présent, actuellement, dans plus de 100 pays et compte environ 48 000 employés.

La division **GAZ**, à elle seule, est implantée dans : Europe, Moyen-Orient, Afrique, Asie Pacifique et Amérique.

IV. Direction de Linde

Le groupe Linde est dirigé par Wolfgang Reitzle. Le comité exécutif se compose du président directeur général ainsi que des membres suivants :

- Aldo Belloni
- Thomas Blades
- Georg Denoke
- Sanjiv Lamba

V. Données financières de l'entreprise Linde

Les données financières du groupe Linde sur les 5 dernières années avant 2011 sont comme suit:

Année	Chiffre d'affaires en €	Résultat en €
2007	12 306 000 000	1 013 000 000
2008	12 663 000 000	776 000 000
2009	11 211 000 000	653 000 000
2010	12 868 000 000	1 064 000 000
2011	13 787 000 000	1 244 000 000

Source : données issue de l'entreprise

Tableau I.1 : Données financières de l'entreprise Linde

Le groupe est coté en Bourse au sein du **DAX 30** .

Chapitre II

«Etude des capteurs »

I. Définition :

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

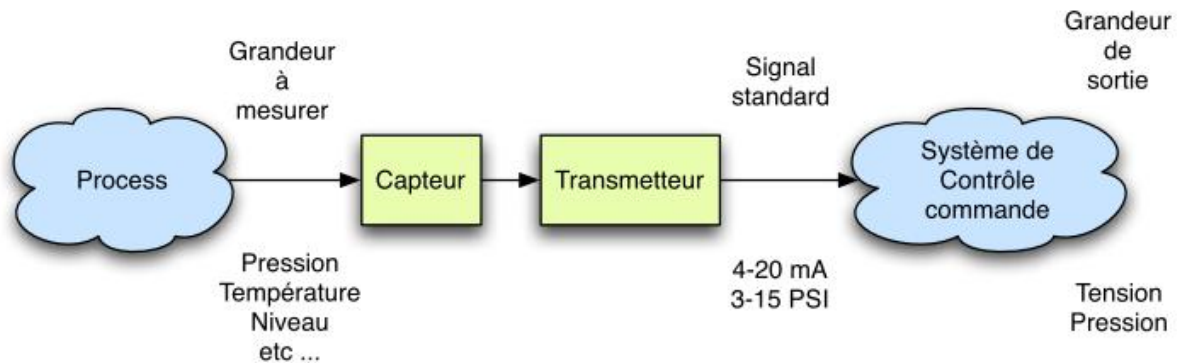


Figure II.1 : Capteur et transmetteur en situation

Le mesurande est la grandeur physique qui est l'objet d'une mesure. Elle est soit un déplacement, une température ou une pression etc. Son mesurage se constitue de l'ensemble des opérations expérimentales qui contribuent à la connaissance de la valeur numérique. Par définition un capteur est le dispositif qui lors d'une soumission à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, courant, tension ou impédance) désignée par « s » et qui en fonction du mesurande.

« s » est défini comme la grandeur de sortie ou la réponse du capteur.

« m » comme la grandeur d'entrée ou d'excitation, d'où le relation suivante :

$$S=F(m).$$

L'un des problèmes de conception et d'utilisation est la constante de sensibilité S qui doit répondre le moins possible :

- De la valeur « m » (linéarité) et de sa fréquence de variation (bande passante).
- De l'action des autres grandeurs physiques de son environnement qui ne sont pas l'objet de la mesure que l'on désigne comme grandeur d'influence.
- Du temps (vieillessement).

Vu à sa sortie, le capteur étant un élément de circuit électrique, se présente :

- Comme un générateur : la sensibilité du capteur « s » étant une charge, une tension ou un courant alors il s'agit d'un capteur actif.

- Comme une impédance : « s » étant une résistance, une inductance ou une capacité. Le capteur est dit passif.

Les informations sur le mesurande, amplitude et fréquence du signal doivent, sans ambiguïté être liées à l'amplitude et à la fréquence du mesurande.

Un capteur actif qui est une source, délivre immédiatement un signal électrique. Ce qui n'est pas le cas d'un capteur passif dont les variations d'impédances ne sont mesurables que par les modifications du courant ou de la tension qu'elles entraînent dans un circuit en l'occurrence alimenté par une source extérieure.

II. Constitution générale d'un capteur

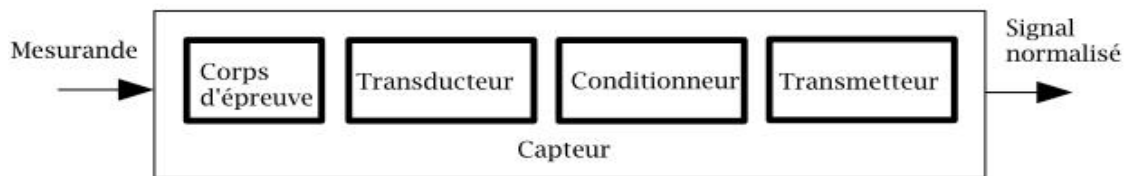


Figure II.2 : Constitution générale d'un capteur

A. Mesurande :

Grandeur physique ou objet de mesure.

B. Corps d'épreuve :

Élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer, il transforme cette dernière en une autre grandeur physique mesurable.

C. Transducteur :

Il traduit la réaction du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie.

D. Conditionneur :

Adaptation de la grandeur électrique afin d'avoir une image correcte de la grandeur physique.

E. Transmetteur :

Mise en forme, amplification, filtrage, mise à niveau du signal de sortie pour sa transmission à distance, il peut être incorporé ou non au capteur proprement dit.

F. Signal normalisé :

Directement exploitable sur l'unité de traitement.

III. Corps d'épreuve et Capteurs composites

Pour des raisons de coût ou de facilité d'exploitation on peut être amené à utiliser un capteur, non pas sensible à la grandeur physique à mesurer, mais à l'un de ses effets. Le corps d'épreuve est le dispositif qui, soumis à la grandeur physique à mesurer produit une grandeur directement mesurable par le capteur.

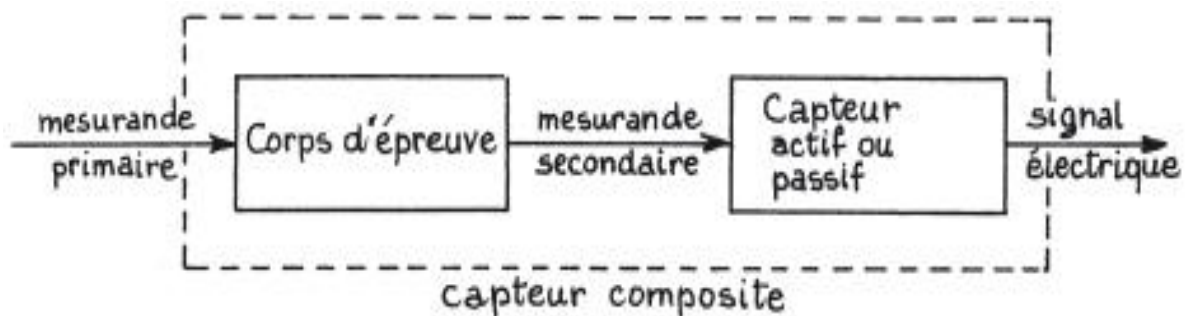


Figure II.3 : Capteur composite

IV. Les capteurs actifs

Son principe se base sur un effet physique qui fait la conversion en énergie électrique, l'énergie propre de mesure qui est une énergie thermique ou de rayonnement. On note certains effets dont les plus importants sont les suivants :

A. Effet thermoélectrique :

Deux conducteurs de nature chimique différente forment un circuit, leurs jonctions étant à des températures T_1 et T_2 est le siège d'une force électromotrice $e(T_1, T_2)$.

B. Effet pyroélectrique :

Les pyroélectriques sont des cristaux comme le sulfate de tri-glycine dont leur polarisation dépend de leur température et elle est spontanée. Leur surface est chargée électriquement et proportionnelle à cette polarisation et de signes contraires sur des faces opposées.

C. Effet piézoélectrique :

Une déformation suscitant l'apparition de charges électriques égales et opposées sur les faces opposées est entraînée par l'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique certains matériaux dits piézoélectriques comme le quartz.

D. Effet d'induction électromagnétique :

Un conducteur qui se déplace dans un champ d'induction fixe est le siège d'une force électromotrice qui est proportionnelle au flux coupé par unité de temps donc à sa vitesse de déplacement. Du fait de son déplacement ou celui de la source de l'induction, un circuit fermé est soumis à un flux d'induction variable. La force électromotrice f.e.m dont il est le siège est égale et de signe contraire à la vitesse de variation.

E. Effet photoélectrique :

On distingue plusieurs, leurs manifestations se différencient mais leur origine commune est la libération de charges électriques dans la matière sous influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement électromagnétique, dont la longueur d'onde est inférieure à une valeur seuil, caractéristique du matériau.

F. Effet photoémissif :

Un courant collecté par application d'un champ électrique est formé par des électrons libérés qui sont émis hors de la cible d'éclairage.

G. Effet photovoltaïque :

Au voisinage d'une jonction de semi-conducteur P et N illuminée sont libérés des électrons et des trous. La tension à ses bornes est modifiée par leur déplacement dans le champ électrique de la jonction.

H. Effet photo-électromagnétique :

Dans le matériau, l'apparition d'une tension électrique dans la direction normale au champ et au rayonnement est provoquée par l'application d'un champ magnétique au rayonnement.

I. Effet de Hall :

Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant I et soumis à une induction β faisant un angle θ avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant de tension v_H qui a pour expression :

$$v_H = K_H \cdot I \cdot \beta \cdot \sin \theta \dots (1)$$

Où K_H dépend du matériau et des dimensions des plaquettes.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Flux de rayonnement optique.	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photo-électromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Position (aimant)	Effet hall	Tension
Température	Thermoélectricité	Tension
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension

Tableau II.1 : Principe physique de base

V. Les capteurs passifs

Impédance, par son expression littérale, on note deux termes liés d'un coté aux propriétés électriques des matériaux c'est-à-dire résistivité (ρ), perméabilité (μ), constante diélectrique (ϵ), d'autre coté à sa géométrie et à sa ses dimensions. Les capteurs passifs sont des impédances et leur paramètre déterminant est sensible au mesurande.

L'action du mesurande peut être à l'origine de la variation d'impédance soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles, soit sur les propriétés électriques des matériaux ou plus rarement sur les deux simultanément.

Le capteur ayant soit un élément déformable soit un élément mobile, dans ce cas les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier.

Dans le premier cas, la mesure de l'impédance permet de connaître la position qui à chaque valeur de l'impédance correspond à une position de l'élément mobile.

Ce principe est le cas de la plupart des capteurs de position ou de déplacement : potentiomètre, inductance, à noyau mobile, condensateur à armure mobile.

Dans le second cas, la déformation résulte des forces, ou des grandeurs s'y ramenant (pression, accélération) appliquées soit directement soit indirectement aux capteurs : l'armature d'un condensateur soumise à une pression différentielle, jauge d'extensomètre liée rigidement à une structure soumise à une contrainte. La déformation d'un capteur entraîne la modification de l'impédance. Cette dernière est liée aux efforts auxquels se soumettent la structure intermédiaire ou le capteur, et elle en assure une traduction électrique.

Selon la nature des matériaux, leurs propriétés électriques sont plus sensibles à des grandeurs d'ordre physiques et très variés qui sont entre autre la température, l'éclairage, l'humidité, la pression... Il peut s'établir une correspondance claire entre la valeur d'une susceptibles d'évoluer et toutes les autres étant maintenues constantes. Cette correspondance est traduite par une courbe d'étalonnage qui avec la mesure de l'impédance permet la déduction de la valeur de la grandeur physique agissante qui n'est autre que le mesurande.

Les variations et l'impédance d'un capteur passif ne peuvent être mesurées que si le capteur est intégré à un circuit par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur. Les types de conditionneurs qui sont régulièrement utilisés sont :

- Le montage potentiométrique qui est réalisé avec une source associée en série avec un capteur d'une impédance qui peut être ou non du même type.
- Le pont d'impédance : son équilibre aide à déterminer l'impédance du capteur par contre son équilibre est une mesure de la variation de cette impédance.
- Le circuit oscillant qui est une partie d'un oscillateur opérationnel et contenant l'impédance du capteur.
- L'amplificateur opérationnel dont l'un des éléments essentiels pour déterminer le gain du capteur et son impédance.

L'association capteur-conditionneur détermine le signal électronique. C'est pour cette raison que le choix d'un conditionneur est très important dans la réalisation d'un ensemble de mesure. Un certain nombre des performances de ce dernier qui sont soit la sensibilité, la linéarité, l'insensibilité à certaines grandeurs dépendent de la construction du conditionneur.

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité électrique	Platine, Nickel, cuivre ...
Rayonnement optique	Résistivité électrique	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité électrique	Alliage de Ni, Si dopé
	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position	Résistivité électrique	Matériaux magnétorésistants (Bismuth, antimoine d'indium)
Humidité	Résistivité électrique	Chlorure de lithium

Tableau II.2 : Type de matériaux utilisés

VI. Grandeurs d'influences

Par ses conditions d'emploi, le capteur non seulement est soumis au mesurande mais aussi à d'autres grandeurs physiques. Leurs variations peuvent entraîner un changement de la grandeur de sortie ou de se trouver dans l'impossibilité de distinguer l'action du mesurande. Ces grandeurs considérées parasites dont la réponse du capteur peut être sensible sont des grandeurs dites d'influence.

Pour citer, le champ magnétique est une grandeur d'influence pour un capteur thermique comme la résistance de Germanium, de même que la température l'est pour un capteur optique comme la résistance photoconductrice. Mettons l'accent sur les principales grandeurs d'influences qui sont :

- La température modifiant les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.
- Certaines propriétés électriques soit la constante diélectrique ou la résistivité sont très souvent sensibles à l'humidité et la détérioration de l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement est un risque à prendre en compte.
- La pression, l'accélération et les vibrations peuvent créer des contraintes et des déformations dans certains éléments constitutifs du capteur qui altèrent la réponse.
- Les champs magnétiques sont soit variables soit statiques. Quand ils sont variables, ils créent des forces électromotrices (f.e.m) d'induction qui se

superposent au signal utile, dans l'autre cas, ils ont le pouvoir de modifier une propriété électrique comme une résistance lorsque le capteur utilise un matériau magnéto résistant.

- La tension d'alimentation, l'amplitude et la fréquence de par le principe du même capteur la grandeur de sortie en dépend comme dans le cas du transformateur différentiel.

Dans le cas idéal, une relation entre grandeur électrique de sortie et mesurande sera :

$$S=F(m) \dots(2)$$

$$S=F(m ;g_1 ;g_2)\dots(3)$$

Où g_1 et g_2 sont des grandeurs d'influence.

De la valeur de « s » pour en déduire la valeur « m » il faut donc :

- Soit de réduire au niveau du capteur, l'importance des grandeurs d'influence afin d'avoir un isolement adéquat tout en le protégeant : support antivibratoires, blindages magnétiques.
- Soit stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues et d'étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement : enceinte thermostatée ou à hygroscoPie contrôlée, sources d'alimentation réglées.
- Soit enfin d'utiliser des montages permettant la compensation de l'influence des grandeurs parasites : pont de Wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche adjacente au capteur de mesure.

VII. Les capteurs intégrés

Un composant qui regroupe sur substrat de Silicium commun d'un capteur, le corps d'épreuve éventuel, des circuits électroniques de conditionnement du signal est un capteur intégré.

Le fait de rendre un capteur intégré apporte plusieurs facettes avantageuses à ce dernier tel que la miniaturisation du point de vue dimensionnelle, la diminution des coûts par la fabrication en grande quantité, une fiabilité conséquente par son accroissement dû à la suppression de nombreuses connexions soudées, l'amélioration de l'interchangeabilité, une protection plus performante contre les parasites, le signal étant conditionné à la source.

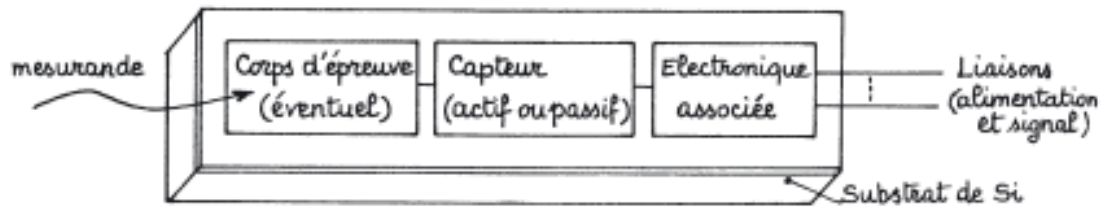


Figure II.4 : Structure générale d'un capteur intégré

Par contre, en utilisant le Silicium, on n'a pas une large fourchette de la plage d'emploi qui est de -50°C à 150°C . Le Silicium étant un matériau très sensible à de multiples grandeurs physiques, le capteur utilise ce fait à son profil. D'autre part, cette caractéristique du Silicium qui est la sensibilité étant déjà utilisée pour réaliser des capteurs isolés peut être mise en œuvre sous forme de capteur résistant, capacitif ou au moyen de diodes ou de transistors.

Certains matériaux étant plus appropriés que le Silicium au mesurande considéré mais aussi compatible avec le processus de fabrication technologique des circuits intégrés peuvent être employés en un fin film qui est déposé sur le substrat de Silicium pour réaliser un capteur.

Lorsque le capteur doit être un capteur composite, le corps d'épreuve est réalisé à partir du substrat de Silicium support de l'ensemble du capteur intégré. Par les propriétés mécaniques hors pair du cristal que cela soit dans le domaine élastique étendu, module d'Young comparable à celui de l'acier et la limite de fatigue très élevée justifiant l'emploi du corps d'épreuve en Silicium. Les techniques de micro-usinage chimique ont rendu possible la fabrication des corps d'épreuves. Le Silicium est très sensible à l'attaque de plusieurs produits chimiques plus particulièrement :

- Mélange éthylène diamine, pyrocathéchol et eau (E.D.P).
- Solution potasse (K.O.H) – eau.

Une couverture faite dans une couche superficielle de SiO_2 délimite la zone à attaquer, la couche n'étant pas attaquée. La vitesse d'attaque dépend des directions cristallographiques : pour E.D.P et K.O.H elle est respectivement trente cinq (35) et quatre cent (400) fois supérieure dans la direction cent (100) que dans la direction de cent onze (111). Elle dépend aussi du dopage, un important dopage de Bore réduit considérablement la vitesse ce qui permet de stopper l'attaque au niveau souhaité.

Par les techniques classiques de fabrication de circuits intégrés, les circuits électroniques associés au capteur sont réalisés. Et d'après les cas ils comportent des circuits de compensation thermique, de linéarisation, l'amplification, de transmission par conversion

tension-fréquence ou tension-courant, des registres de types D.T.C pour le transport et le stockage des informations.

Des problèmes bien spécifiques et délicats sont liés à la réalisation de capteurs intégrés dû à la proximité du capteur et de l'électronique associée. L'encapsulation doit permettre le contact du capteur avec le milieu extérieur qui est pour la plupart des cas hostile tout en protégeant efficacement les composants électroniques.

VIII. Les capteurs intelligents

Une chaîne de mesure pilotée par microprocesseur et une interface de communication bidirectionnelle constituent les deux parties d'une grandeur physique dont l'ensemble de mesure désigne un capteur intelligent.

La liaison du capteur à un ordinateur central via un bus partagé par plusieurs capteurs intelligents est assurée par l'interface de communication bidirectionnelle. Les messages porteurs de codes du capteur concerné transitent par l'interface soit dans le sens capteur vers ordinateur : résultat de mesure, état de la chaîne (étendue de mesure, dépassement de gamme de mesurande ou gradeur d'influence ...), soit dans le sens contraire, ordinateur vers capteur : configuration, auto-étalonnage.

La chaîne de mesure comporte :

- Le capteur principal spécifique de mesurande étudié et identifié grâce à un code stocké en PROM.
- Les capteurs secondaires propres aux grandeurs d'influences susceptibles d'effacer une réponse du capteur principal.
- Les dispositifs classiques permettant l'obtention sous forme numérique de la grandeur de sortie de chaque capteur, convertisseur analogique numérique.
- Un microprocesseur affecté aux tâches suivantes : gestion de l'acquisition, correction de l'effet des grandeurs d'influence au moyen des paramètres stockés en PROM et des données fournies par les capteurs secondaires, linéarisation, diagnostic des capteurs.

La crédibilité accrue des mesures, la configuration à distance et la maintenance grâce aux informations d'état fournies, la répartition des tâches, déchargeant le ordinateur central sont les avantages spécifiques offerts par le capteur intelligent.

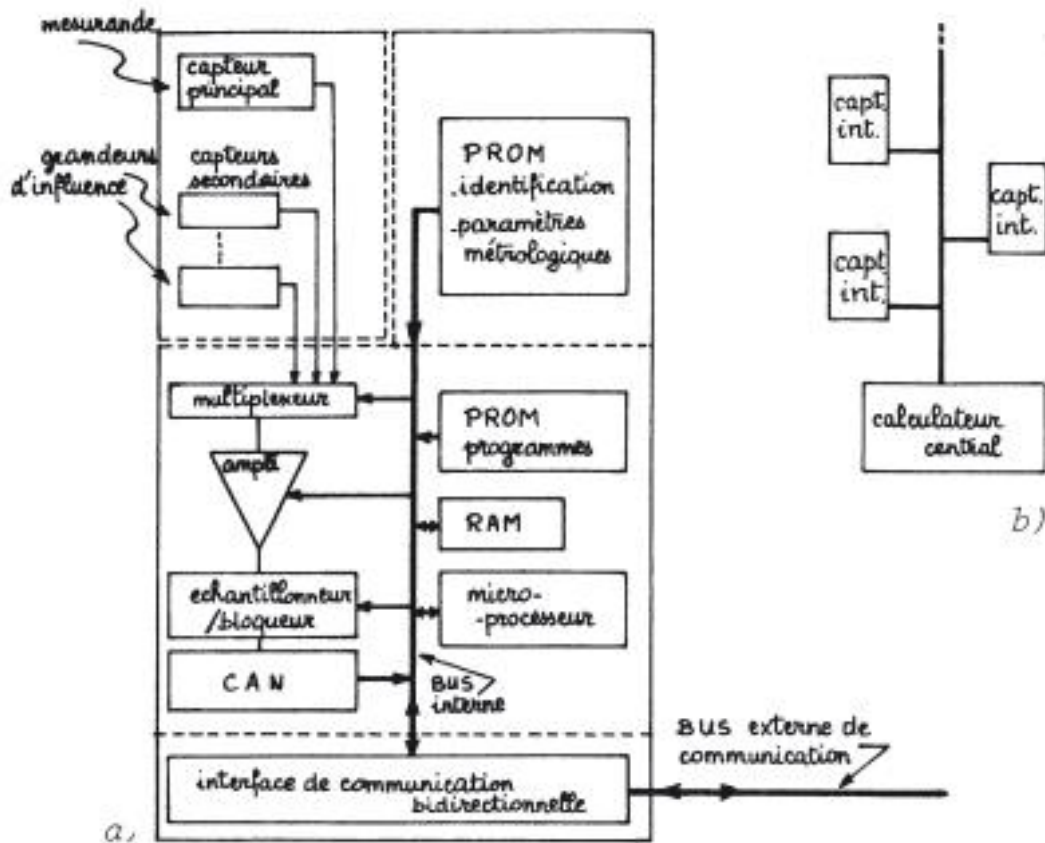


Figure II.5 : Capteur intelligent : a) Structure générale, b) Liaison par bus d'un ensemble de capteurs intelligents à un ordinateur central

IX. Caractéristique des capteurs

A. L'étendue (bande passante)

C'est la différence entre la limite supérieure et la limite inférieure de la grandeur mesurable par le capteur, lorsque le capteur fournit une valeur de la grandeur entre 0 et le maximum, ce maximum est appelé pleine échelle du domaine de non détérioration qui est lui-même inférieur au seuil de destruction.

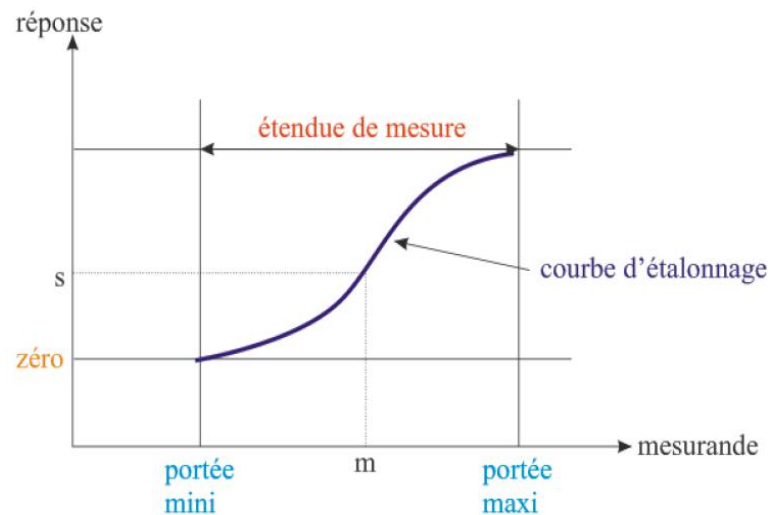


Figure II.6 : Etendue de mesure et courbe d'étalonnage

B. Sensibilité :

La grandeur électrique fournie par le capteur varie proportionnellement avec le paramètre mesuré, ainsi pour une grandeur de sortie variant de ΔS de telle sorte que : $\Delta S = S \cdot \Delta M$.

S : sensibilité du capteur, elle dépend de son vieillissement et de son environnement (variation des autres grandeurs).

ΔM : variation de la mesurande.

C. Rapidité (temps de réponse) :

La rapidité est la spécification d'un capteur qui permet de voir de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps la variation de la mesurande.

Donc la rapidité est liée au temps nécessaire pour que la contribution du régime transitoire par rapport à la grandeur de sortie soit négligeable. La grandeur utilisée pour définir quantitativement la rapidité et le temps de réponse.

D. Linéarité :

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

E. Précision :

C'est l'aptitude d'un capteur de donner les résultats qui sont proches de la valeur vraie du mesurande.

X. Etalonnage d'un capteur

L'étalonnage d'un capteur comprend l'ensemble des opérations qui permettent d'explicitier sous forme graphique (courbe d'étalonnage) ou algébrique (équation caractéristique du capteur) la relation entre les valeurs du mesurande et celle de la grandeur électrique de sortie et ceci compte tenu de tous les paramètres additionnels susceptible de modifier la réponse du capteur.

XI. Types d'erreur d'un capteur

A. Erreur de linéarité :

La courbe n'est pas linéaire

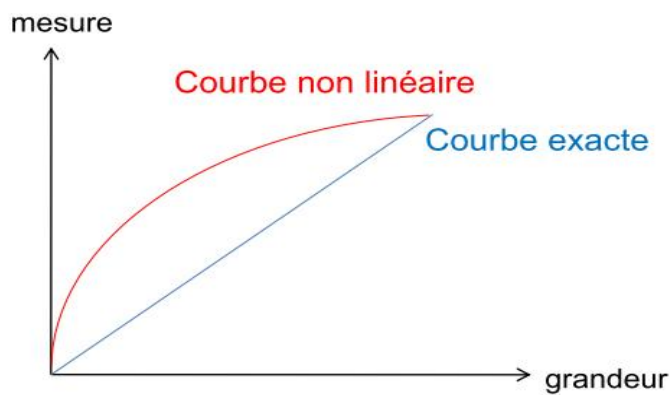


Figure II.7 : Erreur de linéarité

B. Erreur d'hystérésis :

Le résultat dépend de la mesure précédente.

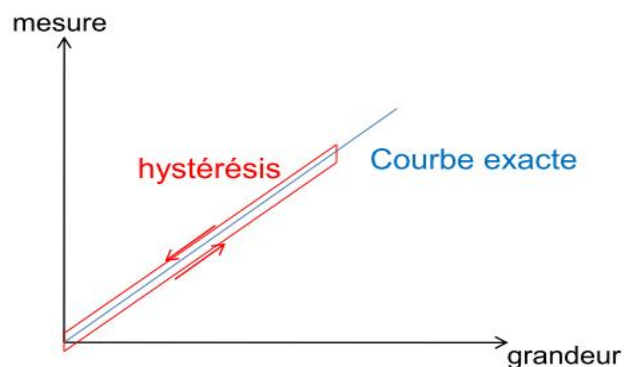


Figure II.8 : Erreur d'hystérésis

C. Erreur de zéro ou « offset » :

La courbe ne commence pas par l'origine

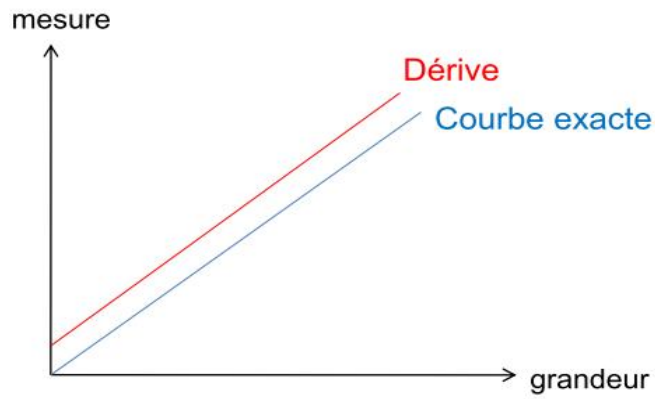


Figure II.9 : Erreur de zéro ou « offset »

D. Erreur d'échelle ou de gain :

La courbe dérive de la courbe exacte

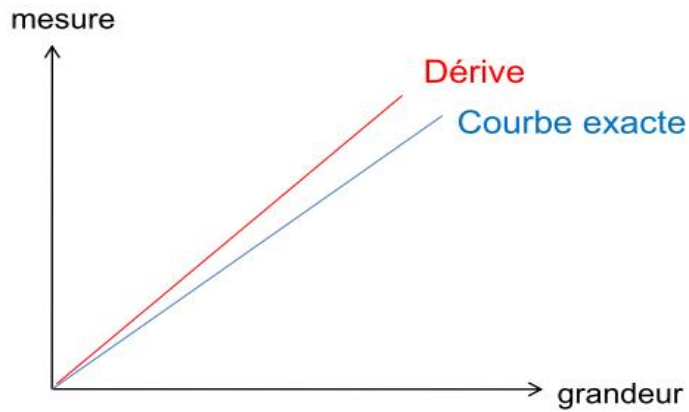


Figure II.10 : Erreur d'échelle ou de gain

Chapitre III

*« Les capteurs utilisés dans
l'unité »*

Les nouvelles exigences imposées aux systèmes industriels dans leur fonctionnement et dans la qualité de leur production, nécessitent une stratégie très élaborée dans la maîtrise de ces installations. Toute la difficulté est de posséder des informations pertinentes et fiables qui permettent de générer une action correctrice efficace. Les capteurs sont ces pourvoyeurs d'information.

Le développement des capacités de traitement de l'information permet le contrôle et l'automatisation de systèmes de plus en plus complexes. Les possibilités de calcul des parties commandes ne semblent limitées que par la quantité et la qualité des données qui leur sont fournies.

La première condition pour qu'un système soit maîtrisable est qu'il soit observable. Ce sont, à défaut d'être l'homme, les capteurs qui observent le système automatisé. Replaçons donc le capteur dans le schéma de tout système automatisé :

Au fur et à mesure que les parties commandes ont augmenté leur puissance de calcul et nécessite un flux d'informations de plus en plus grand, les capteurs se sont diversifiés, se sont perfectionnés, se sont miniaturisés. Ils sont devenus très fiables, au point qu'on en oublie leur existence et leur importance dans la chaîne de l'information.

Les capteurs utilisés par Linde Gas, au sein de son unité, sont étudiés dans les points suivants.

I. Capteurs de niveau :

Le mot "niveau" a de nombreux sens dans la langue française. En physique, le niveau correspond à la distance entre la surface d'un liquide et le fond du réservoir le contenant.

Le contrôle de niveau est utilisé dans de nombreux et divers domaines, afin de connaître l'état de remplissage de récipients, c'est-à-dire le niveau qu'y atteint le produit présent.

Il existe deux types d'informations relatives au niveau :

- la mesure continue.
- la détection de seuil.

La méthode la plus courante de la mesure de niveau dans l'industrie est par la pression différentielle.

A. Mesure par un capteur de pression différentielle :

Cela se fait en raccordant un robinet à la partie supérieure du récipient et à la base un transmetteur de pression différentielle.

1. Principe

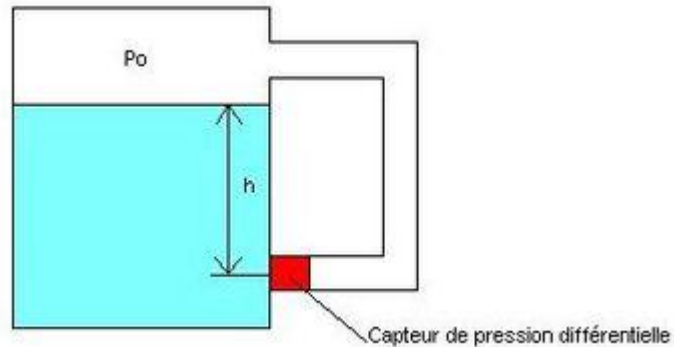


Figure III.1 : Mesure de niveau par pression différentielle.

On place un capteur de pression différentielle à la base du réservoir.

La pression mesurée par le capteur est égale à : $P = P_0 + \rho \cdot g \cdot h$

Avec :

- P_0 : pression au sommet du réservoir ;
- $\rho \cdot g \cdot h$: pression hydrostatique ;
- h : hauteur du liquide ;
- ρ : densité du liquide ;
- g : accélération de la pesanteur.

Dans un récipient fermé, la pression à l'intérieur du récipient doit être soustraite de la mesure.

Quelques précisions sur le capteur :

- Le corps d'épreuve du capteur est une membrane, soumise sur l'une de ses faces à la pression P et sur l'autre à la pression P_0 ;
- La déformation de la membrane est proportionnelle à la hauteur h .

2. Avantages :

- Petit encombrement.
- Pas ou peu de soucis dus à l'implantation du dispositif.

- Possibilité d'utiliser un agitateur dans le réservoir car la mesure est complètement indépendante des mouvements du liquide.

- coût raisonnable.
- grande étendue de mesure (quelques cm à plusieurs dizaines de m).
- loi linéaire et bonne précision.

3. Inconvénients :

- Contact entre l'appareil de mesure et le liquide.
- Le dispositif n'est valable que pour des liquides.

II. Capteurs de température :

Qualitativement, la température d'un objet détermine la sensation de chaud ou de froid ressentie en le touchant. Plus spécifiquement, la température est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules d'un échantillon de matière, exprimée en unités de degrés sur une échelle standard.

A. Température :

La température agit sur les propriétés physiques de la matière telles que :

- Pression ;
- Résistivité électrique ;
- Changement de phase et d'autres.

La mesure de température est importante en recherche et industrie. Elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des particules (agitation thermique).

B. Echelles de température (grandeur intensive) :

1. Kelvin :

« Le **kelvin** est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau »

0 K est le zéro absolu (aucune agitation thermique).

2. Celsius :

$T_{°C} = T_K - 273,15$, le zéro absolu vaut donc $-273,15°C$

3. Fahrenheit :

L'échelle fahrenheit attribue une plage de 180 °F entre la température de solidification de l'eau et sa température d'ébullition (solidification de l'eau à 32°F et point d'ébullition à 212°F).

Ainsi :

$$T_{°F} = 9/5 T_{°C} + 32 \quad ..(4) \quad \text{ou} \quad T_{°C} = 5/9(T_{°F} - 32) \quad(5)$$

C. Types de capteurs de température :

Il est possible de mesurer la température de plusieurs façons différentes qui se distinguent par le coût des équipements et la précision ainsi que le temps de réponse.

Les types les plus courants de capteurs sont les sondes RTD, les thermistances et les thermocouples.

1. Les thermocouples :



Figure III.2 : Les thermocouples.

1.1. Principe de fonctionnement :

Principe du thermocouple : Si $T_2 \neq T_1 \rightarrow$ apparition d'une tension U .

Un conducteur génère une tension lorsqu'il est soumis à une variation de température ; cette tension thermoélectrique est appelée tension Seebeck.

Chapitre III : Les capteurs utilisés dans l'unité

La mesure de cette tension nécessite l'utilisation d'un second matériau conducteur générant une tension différente pour une même variation de température (sinon la tension générée par le deuxième conducteur qui effectue la mesure annule tout simplement celle du premier conducteur).

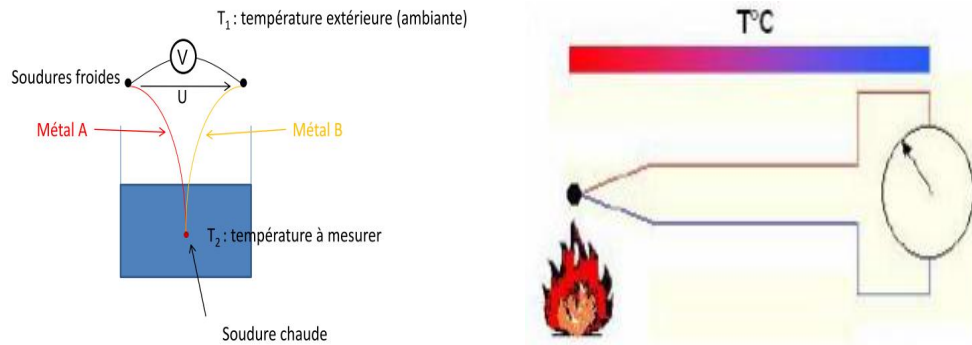


Figure III.3 : Structure générale d'un thermocouple.

En s'appuyant sur le principe de Seebeck, il est clair que les thermocouples ne peuvent mesurer que des différences de température entre le point de référence (soudure froide) et le point de mesure (soudure chaude).

1.2. Allure des caractéristiques :

On peut choisir parmi différents types de thermocouples désignés par des lettres majuscules qui indiquent leurs compositions selon les conventions ANSI (American National Standards Institute). Parmi les types de thermocouples courants, citons les B, E, J, K, N, R, S et T.

Type de thermocouple	Conducteurs – Positifs	Conducteurs – Négatifs
B	Platine rhodié à 30 %	Platine rhodié à 6 %
E	Alliage nickel/chrome	Alliage cuivre/nickel
J	Fer	Alliage cuivre/nickel
K	Alliage nickel/chrome	Alliage nickel/aluminium
N	Alliage nickel/chrome/silicone	Alliage nickel/silicone/magnésium
R	Platine rhodié à 13 %	Platine
S	Platine rhodié à 10 %	Platine
T	cuivre	Alliage cuivre/nickel

Tableau III.1 : Composition et lettres désignant les thermocouples normalisés.

On tient compte de la température attendue pour la mesure mais également de l'action corrosive du milieu ambiant (atmosphère oxydante, réductrice, sulfureuse, etc...) sur les constituants du couple pour arrêter son choix.

Type	Métaux utilisés (+) / (-) Couleurs fils	Plages de temp (°C)	Adaptés à : Inadaptés à
E	Chromel (Ni-Cr) / constantan (Ni-Cu) Violet / blanc	-270 à 1 100	Milieus oxydants et inertes Vide, milieux réducteurs
J	Fer / Constantan Noir / Blanc	0 à 750	Milieus réducteurs, inertes, vide Basse température
K	Chromel / Alumel (Ni-Al) Vert / Blanc	-250 à 1 250	Milieus oxydants et inertes Vide, milieux réducteurs
N	Nicrosil (Ni-Cr-Si) / Nisil (Ni-Si) Mauve / blanc	-270 à 1 300	Milieus oxydants à haute température et dans le vide
T	Cu / Cu-Ni Marron / blanc	- 250 à 400	Bonne précision à basse température Limité en hautes températures

Tableau III.2: Composition et lettres désignant les thermocouples normalisés et leurs milieu d'adaptation.

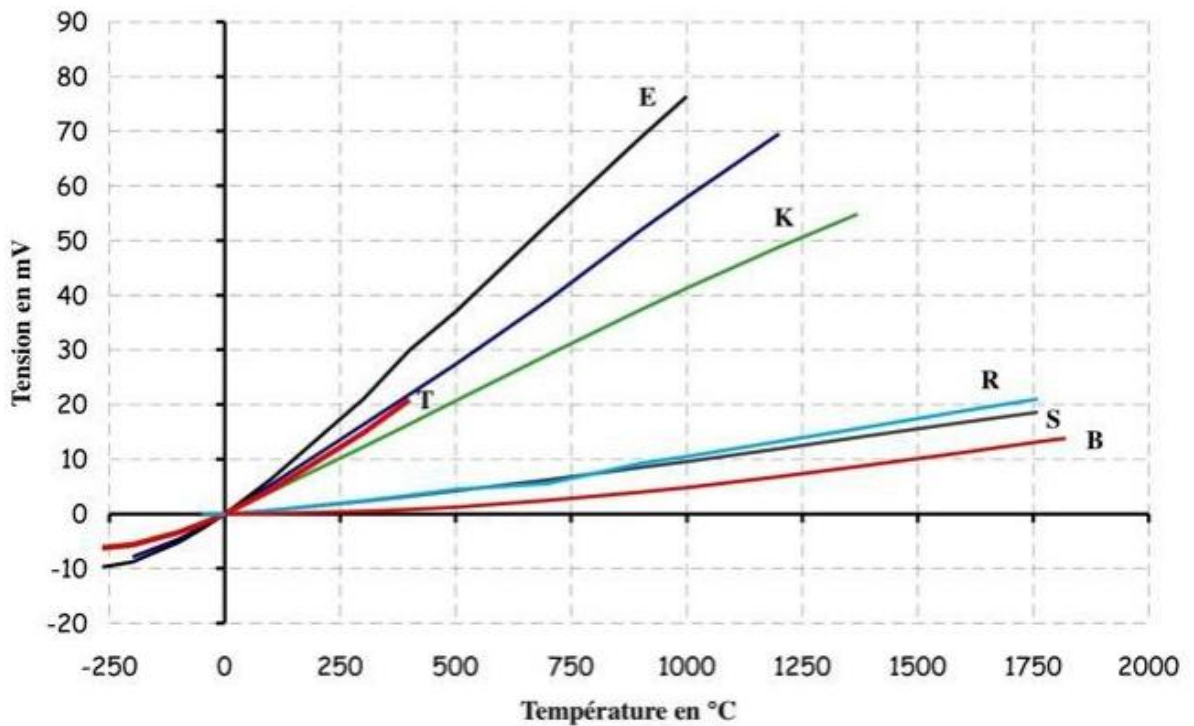


Figure III.4 : Courbe caractéristique pour différents thermocouples

1.3. Avantages :

- Grandes gammes de température : de 0 à 1 600 K ;
- Robustes : résistent aux chocs et aux vibrations ;
- Réponse rapide (ms à qq s) ;
- Fiables et précis ;
- Reproductibles

1.4. Inconvénients :

- Température de référence nécessaire ;
- Réponse non linéaire ;
- Faible sensibilité pour certains types de thermocouples.

2. Les sondes RTD : (Resistance Temperature Detectors - capteurs de température à résistance) :



Figure III.5 : Les sondes RTD

2.1. Principe de fonctionnement :

Les RTD fonctionnent sur le principe des variations de résistance électrique des métaux purs et se caractérisent par une modification positive linéaire de la résistance en fonction de la température.

Concrètement, une fois chauffée, la résistance du métal augmente et inversement une fois refroidie, elle diminue.

Les éléments types utilisés pour les RTD incluent le nickel (Ni) et le cuivre (Cu) mais le platine (Pt) est de loin le plus courant, en raison de l'étendue de sa gamme de températures, de sa précision et de sa stabilité.

Faire passer le courant à travers une sonde RTD génère une tension à travers la sonde RTD. En mesurant cette tension, vous pouvez déterminer sa résistance et ainsi, sa température.

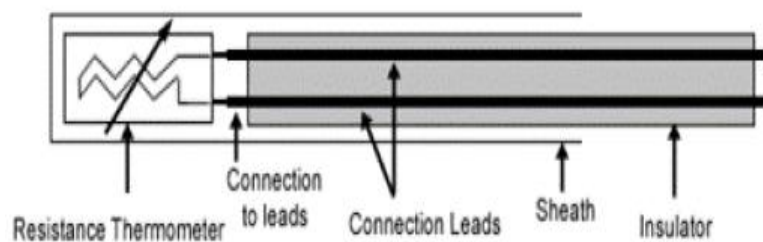


Figure III.6 : Architecture physique d'un RTD

2.2. Allure des caractéristiques :

Les RTD sont habituellement classés par leur résistance nominale à 0°C. Les valeurs de résistance nominale types pour les RTD à film fin en platine sont comprises entre 100 et 1000 Ω .

La relation entre la résistance et la température est presque linéaire et respecte l'équation suivante :

$$\text{Pour } T > 0 \text{ } ^\circ\text{C}, R_T = R_0 [1 + aT + bT^2]$$

Avec: R_T = résistance à la température T, R_0 = résistance nominale,

a et b = constantes utilisées pour mettre à l'échelle le RTD.

Exemple:

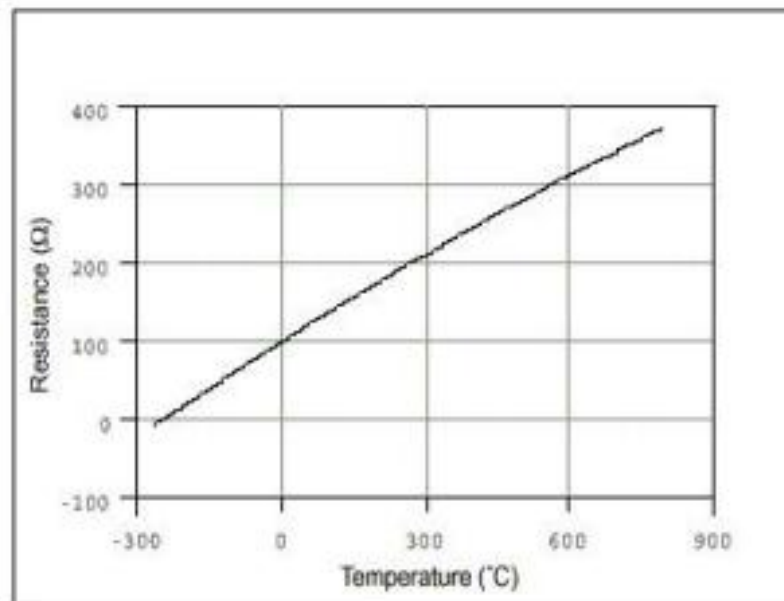


Figure III.7 : La courbe résistance/température pour un RTD en platine de 100 Ω , communément appelée Pt100.

2.3. Avantages et inconvénients :

Populaires pour leur stabilité, les RTD présentent le signal le plus linéaire de tous les capteurs électroniques en matière de température. Toutefois, ils coûtent généralement plus cher que leurs équivalents à cause de leur construction plus délicate et le recours au platine.

Les RTD se caractérisent aussi par un temps de réponse lent et par une faible sensibilité. En outre, parce qu'ils nécessitent une excitation en courant, ils sont sujets à une élévation de température.

Les RTD peuvent mesurer des températures pouvant atteindre 850°C.

3. Les thermistances :



Figure III.8 : Les thermistances

Mélanges d'oxydes métalliques. Leur résistance décroît avec la t° selon une loi du type :

$$R(T) = R_0 \exp(B(1/T - 1/T_0)) \dots (6)$$

Avec T en K. (et B entre 3000 et 5000K). Les thermistances sont généralement utilisables jusqu'à environ 300°C. Mais du fait de la forme de leur réponse, elles ne sont utilisées que sur une faible plage de température (100°C) où elles sont très sensibles (sensibilité environ 10 fois supérieure aux sondes métalliques).



Thermistance de précision à capsule de verre

Figure III.9 : Thermistance

3.1. Principe de fonctionnement :

Les thermistances, comme les capteurs de température à résistance (RTD), sont des conducteurs thermosensibles dont la résistance varie avec la température. Les thermistances sont constituées d'un matériau semi-conducteur d'oxyde métallique encapsulé dans une petite bille d'époxy ou de verre.

En outre, les thermistances présentent généralement des valeurs de résistance nominale plus élevées que les RTD (de 2 000 à 10 000 Ω) et peuvent être utilisées pour de plus faibles courants.



Figure III.10: Symbole communément utilisé pour représenter une thermistance

3.2. Allure des caractéristiques :

Chaque capteur a une résistance nominale propre qui varie de manière proportionnelle en fonction de la température selon une approximation linéaire.

Les thermistances ont soit un coefficient de température négatif (CTN), soit un coefficient de température positif (CTP).

Dans le premier cas(CTN), le plus courant, la thermistance a une résistance qui diminue lorsque la température augmente, tandis que dans le second (CTP), on constate une résistance accrue lorsque la température augmente.

La relation entre la résistance et la température n'est pas linéaire (exponentielle).

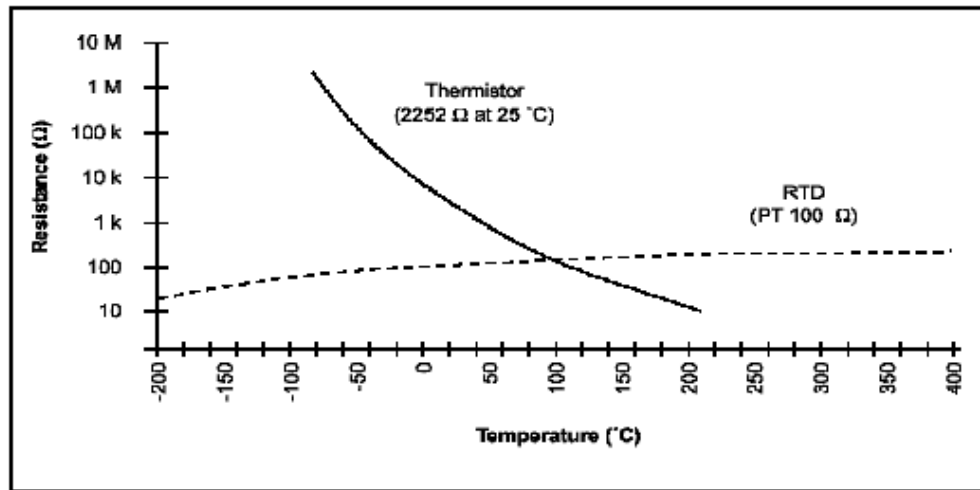


Figure III.11 : Résistance en fonction de la température pour une thermistance et un RTD

3.3. Avantages et inconvénients :

En règle générale, les thermistances ont une sensibilité de mesure très élevée ($\sim 200 \Omega/^{\circ}\text{C}$), ce qui les rend très sensibles aux variations de températures.

Bien qu'elles présentent un taux de réponse de l'ordre de la seconde, les thermistances ne peuvent être utilisées que dans une gamme de températures ne dépassant pas 300°C .

Cette caractéristique, associée à leur résistance nominale élevée, contribue à garantir des mesures précises dans les applications à basse température.

III. Capteurs de pression :

A. Définition de la pression

La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface.

La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée. $p_{PA} = FN/Sm^2$

B. Définition des différentes pressions

1. La pression absolue :

C'est la pression réelle, dont on tient compte dans les calculs sur les gaz.

2. La pression atmosphérique ou pression barométrique :

La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15 °C, est d'environ 1013 mbar. Elle peut varier, de avec la pluie ou le beau temps. Elle est fonction de l'altitude (hydrostatique).

3. La pression relative :

C'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique. Elle est le plus souvent utilisée, car la plupart des capteurs, sont soumis à la pression atmosphérique. Pour mesurer une pression absolue, il faut faire un vide poussé dans une chambre dite de référence.

4. Pression différentielle :

C'est une différence entre deux pressions, dont l'une sert de référence. Une pression différentielle peut prendre une valeur négative.

5. Le vide :

Il correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.

6. Pression de service ou pression dans la conduite :

C'est la force par unité de surface exercée sur une surface par un fluide s'écoulant parallèlement à la paroi d'une conduite.

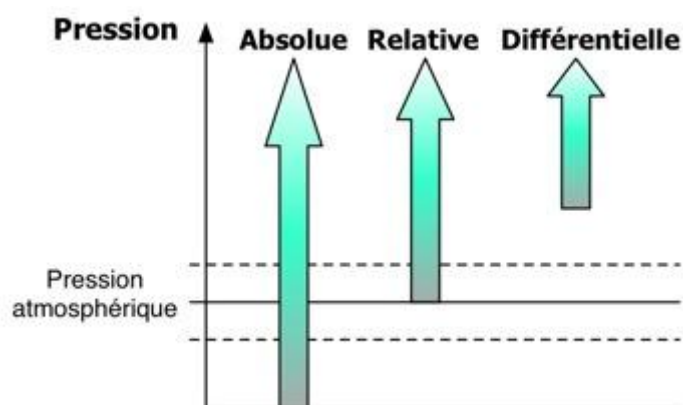


Figure III.12 : différent pression

C. Pression pour les fluides (liquide et gaz)

1. Pression hydrostatique

À l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la masse de fluide sur la surface considérée. Pour chacun des quatre récipients représentés sur la figure 11, la pression au fond de ceux-ci est identique est égal à :

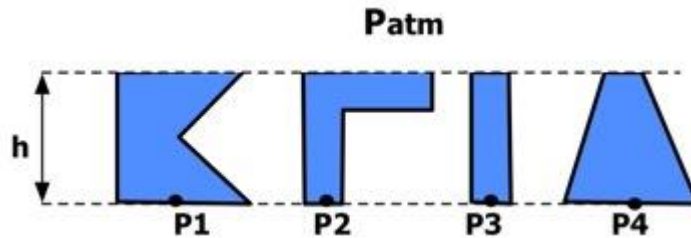


Figure III.13: Pression hydrostatique

2. Pression due à des forces extérieures :

Un fluide se déplaçant à une vitesse V crée une pression supplémentaire P :

$$P_{Pa} = 0,5 \times \rho_{Kg/m^3} \times V_{m/s}^2 \dots(7)$$

3. Pression totale - Charge :

C'est la somme de la pression hydrostatique, de la pression due aux forces extérieures et de la pression hydrodynamique. Celle-ci a la même valeur en tous points pour un fluide en mouvement horizontal (incompressible de viscosité négligeable), c'est le théorème de Bernoulli.

D. Manomètres hydrostatiques

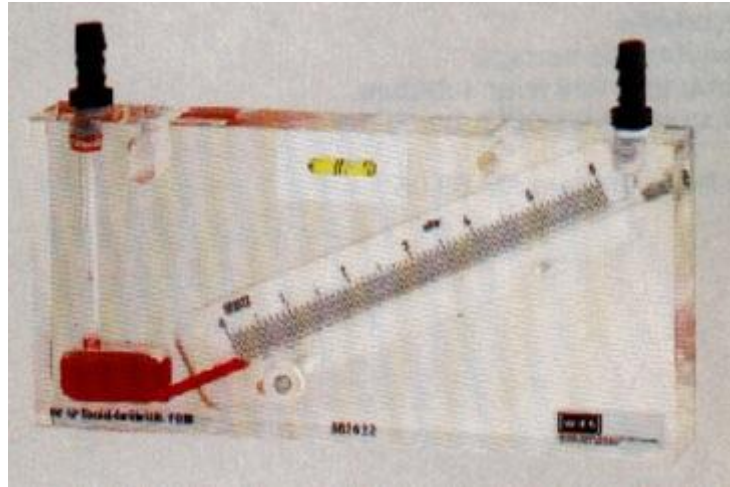


Figure III.14: Manomètre hydrostatique.

1. Fonction remplie

Comme le montre l'égalité hydroform :

$$h_m = \frac{P_{Pa}}{\rho_{Kg/m^3} \times g_{m/s^2}} \dots(8)$$

La hauteur du liquide fournit une mesure de la pression. La sensibilité de l'appareil est d'autant plus importante que la masse volumique du liquide est faible.

2. Présentation technique du dispositif :

Une chaîne de mesure de pression comprend :

- un corps d'épreuve associé ou non à un diaphragme (interface fluide-capteur),
- un détecteur et transducteur,
- des circuits électriques,
- des raccordements électriques,
- un boîtier ou corps.

Il faut distinguer les capteurs de pression qui mesurent une pression (éventuellement alarmés à certains seuils) et les pressostats qui détectent un ou deux seuils.

Les capteurs destinés à la mesure des pressions rapidement variables comme c'est le cas pour la mesure d'une surpression due à une explosion de poussières ou de gaz sont :

- Les capteurs à membrane,
- Les capteurs à éléments sensibles.

E. Les capteurs à membrane

1. Principe de fonctionnement

Le corps d'épreuve d'un capteur de pression est l'élément assurant la transformation de la pression en déplacement, déformation ou force.

Dans cette technologie, les capteurs sont formés d'un corps d'épreuve, généralement une membrane, sur lequel agit la pression.

On mesure cette dernière par la mesure de la déformation du corps d'épreuve.

Les capteurs à membrane se distinguent entre eux par les procédés de conversion utilisés pour mesurer la déformation.

Les différents capteurs à membrane sont :

- Les capteurs à jauges extenso métriques,
- les capteurs capacitifs,
- Les capteurs à fibres optiques,
- Les capteurs à variation d'inductance,
- Les capteurs à courants de Foucault.

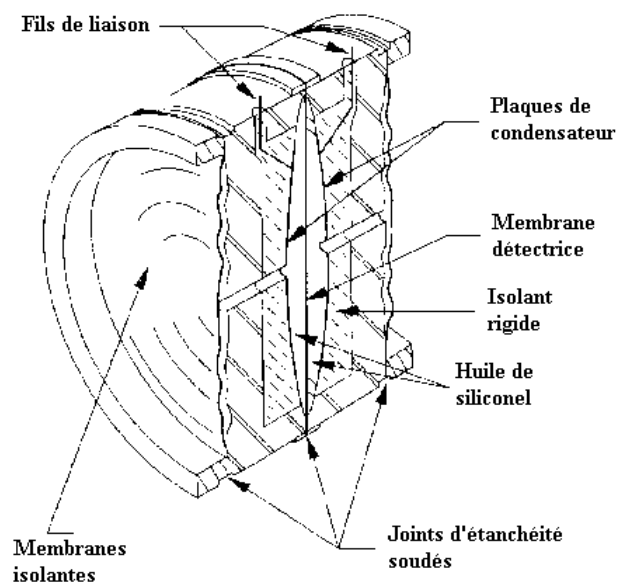


Figure III.15: Transmetteur de pression différentielle par membrane.

F. Les capteurs à jauges extensométriques :

Les jauges extensométriques les plus utilisées sont celles à *trame pelliculaire*. Les jauges (élément résistif) collées sur le corps d'épreuve assurent la conversion directe d'une déformation ε de la structure, en variation de résistance $\Delta R/R$. Associées en pont de

Wheatstone elles permettent une compensation en température, et parfois un accroissement de la sensibilité en additionnant les déformations dues à la striction.

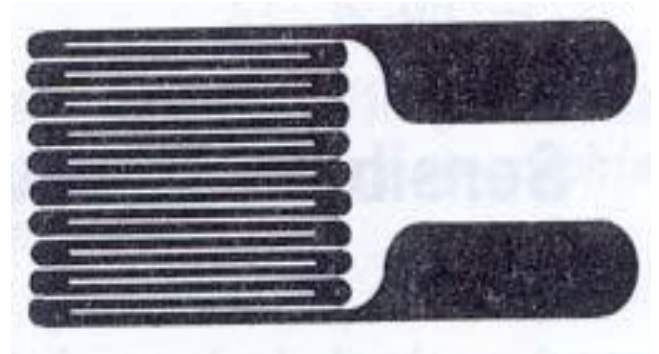
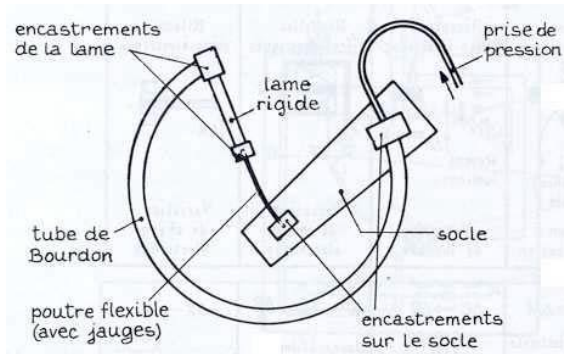


Figure III.16: capteur de pression avec élément **Figure III.17 :** jauge à trame pelliculaire

Les différentes caractéristiques métrologiques de ce capteur sont :

- *Linéarité et hystérésis* : +/- 0,2% à +/- 1% de l'étendue de mesure.
- *Résolution* : meilleure que 0,02% de l'étendue de mesure.
- *Précision* : 0,5 à 2% de l'étendue de mesure.
- *Rapidité* : fréquence propre, 1kHz à 100kHz selon le corps d'épreuve.
- *Signal de sortie* : quelques mV pour l'étendue de mesure.

1. Avantages :

- Bonne précision, faible sensibilité aux vibrations ainsi qu'à la température, par compensation thermique ;

2. Inconvénients :

- Signal de sortie faible, fluage possible ;
- Parmi les jauges extensométriques, on trouve également les jauges à trame déposée.
 - Elles limitent dans le temps les performances des capteurs par le vieillissement des colles et leur fluage. On y remédie par un dépôt direct sur le corps d'épreuve d'une couche résistante formant ainsi les jauges in situ.

IV. Capteurs de débit

A. Mesure de débit :

1. Débit volumique :

$$Q_v = S \cdot V$$

avec

S : la section de la conduite et

V : la vitesse du fluide.

L'unité est le $m^3 \cdot s^{-1}$.

2. Débit massique :

$Q_m = \rho \cdot Q_v$ avec S la section de la conduite et v la vitesse du fluide. L'unité est le $kg \cdot s^{-1}$.

La technologie de mesure dépend de :

- nature du fluide.
- vitesse du fluide.
- régime d'écoulement.
- viscosité.

B. Le débitmètre à pression différentielle :

1. Principe :

Un resserrement de la conduite ou un changement de direction créent entre amont et aval une différence de pression Δp liée au débit par une relation de la forme :

$$Q_v = k \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad \dots(9)$$

Avec ρ la masse volumique du fluide, et k un coefficient fonction de l'organe déprimogène.

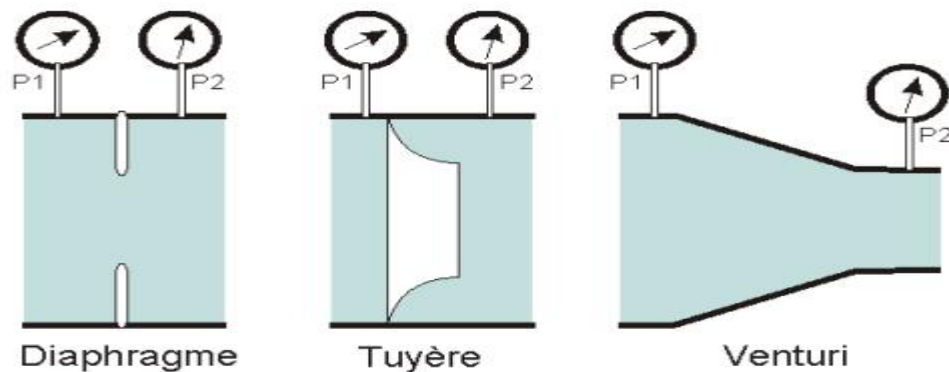


Figure III.18 : Les débitmètres

C. Les venturis :

Le venturi est un autre type d'organe déprimogène disponible. Le venturi fait en sorte de diminuer progressivement de diamètre de celui de la conduite (D) à celui de la restriction (d). Cela permet une transition moins brusque pour le liquide, ce qui réduira les pertes de charge générées par ce débitmètre par rapport la plaque orifice.

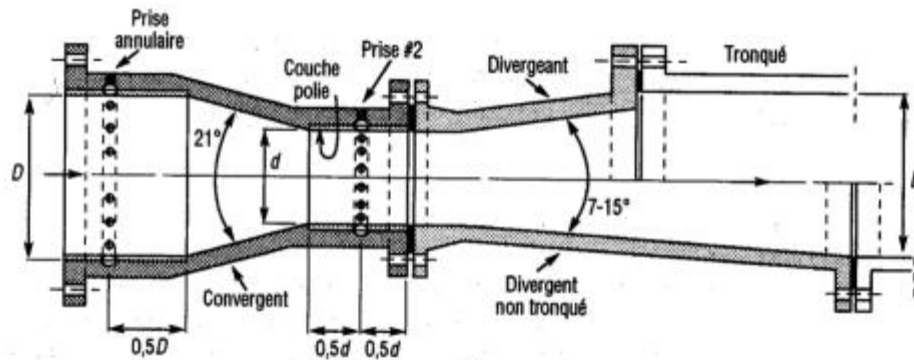


Figure III.19 : Débitmètre à venturi

Le convergent avant la restriction est d'un angle de 21°. Après la restriction, on ré- augmente progressivement le diamètre pour revenir au diamètre de la conduite. Le divergeant est généralement d'un angle variant de 7 à 15°.

La présence du convergeant et du divergeant fait en sorte qu'un venturi est une pièce d'équipement encombrante. Parfois, le divergeant est tronquée pour réduire l'encombrement.

Comme la variation du diamètre est très progressive, le liquide peut contenir des particules en suspensions.

La prise haute pression est située à une distance de 0.5D en amont du convergent et la prise basse pression est située au milieu de la restriction qui à une longueur égale à son diamètre d.

Ce capteur exige un liquide d'une bonne turbulence, car il faut que $Re \geq 150000$. Il faut prévoir une perte de charge maximale de 15 % avec ce capteur.

Avec :

$$R_e = \frac{v\rho D}{\mu} \dots(10)$$

Avec v la vitesse d'écoulement du fluide (en m/s) ; ρ la masse volumique du liquide (en kg/m³) ; D le diamètre intérieur de la conduite (en mètres) et μ la viscosité du liquide en Pa-s.

Ce débitmètre est autonettoyant et permet le transport d'un fluide ayant des matières en suspension.

D. Les organes déprimogènes:

La mesure de la vitesse d'écoulement d'un organe déprimogène est une méthode répandue de mesure d'un débit. Elle est basée sur la loi de Bernoulli :

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho g z + p = \text{constante} \quad \dots(11)$$

En vertu du principe de conservation de masse, le débit massique Q_m est constant sur toute la longueur de la conduite :

$$Q_m = \rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2$$

Avec ρ la masse volumique du liquide ; v_1 la vitesse du fluide en conduite ; v_2 la vitesse du fluide à la restriction ; A_1 la surface de la conduite (de diamètre D) et A_2 la surface à la restriction (de diamètre d).

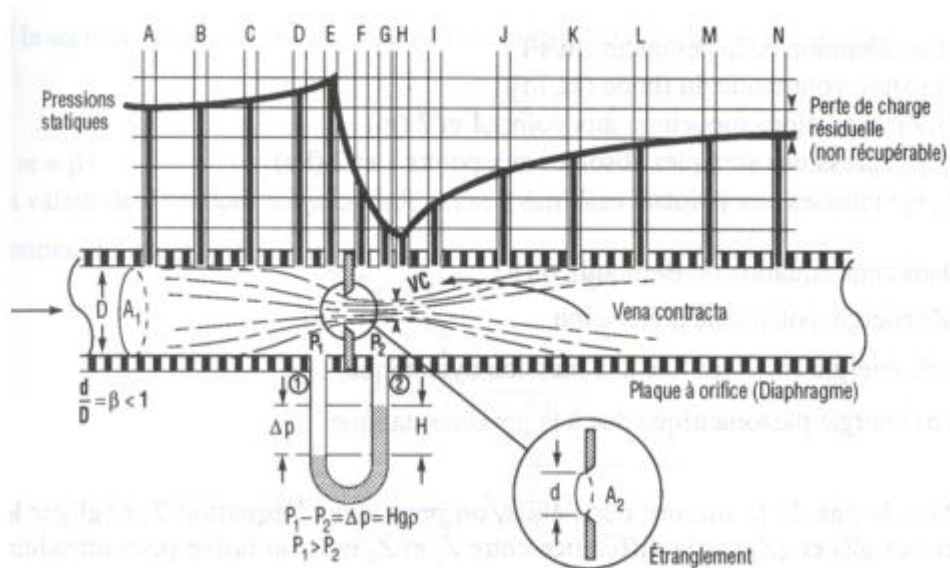


Figure III.20 : Mesure de vitesse d'écoulement par organe déprimogène

Du principe de conservation de masse, on peut écrire :

$$v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1} = v_2 \left(\frac{d}{D} \right)^2 = v_2 \beta^2 \quad \dots(12)$$

avec $\beta = d/D < 1$ le rapport entre le diamètre de la restriction et celui de la conduite.

La loi de Bernoulli nous permet d'écrire :

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g z_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g z_2 + p_2 \quad \dots(13)$$

La différence entre z_1 et z_2 étant négligeable, on peut écrire :

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 \quad \dots(14)$$

La différence de pression statique Δp dépend de la différence du carré des vitesses :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2)$$

Puisque $v_1 = \beta_2 v_2$, alors on peut écrire :

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} v_2^2 \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right) = \frac{\rho}{2} v_2^2 (1 - \beta^4) \quad \dots(15)$$

Donc en mesurant la chute de pression statique Δp , on peut calculer la vitesse d'écoulement dans l'orifice :

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{(1 - \beta^4)} \frac{2}{\rho} \Delta p} = E \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad \dots(16)$$

Avec $E = 1/\sqrt{(1 - \beta^4)}$. Cette relation est non-linéaire.

On peut passer de la vitesse au débit volumique en multipliant celle-ci par la surface de la restriction A_2 :

$$Q = v_2 A_2 = A_2 E \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad \dots(17)$$

En pratique, il y a des pertes de charges et pour les prendre en compte on ajoute un coefficient de correction $C < 1$:

$$Q = C A_2 E \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad \dots(18)$$

Ce coefficient de correction est le produit du coefficient de contraction C_c et du coefficient de décharge C_d .

Pour simplifier l'écriture, définissons $\alpha = CE$:

$$Q = \alpha A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad \dots(19)$$

En pratique, puisque l'on fait le dimensionnement de la restriction de l'organe déprimogène, on ne connaît donc pas la surface A_2 . Toutefois, la dimension D de la conduite (et sa surface $A_1 = \pi D^2 / 4$) ou l'on installe ce débitmètre est connue. Ainsi, on peut écrire finalement :

$$Q = \alpha \beta^2 A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad \dots(20)$$

Le dimensionnement de l'organe déprimogène comporte deux inconnues : le diamètre de la restriction d et les chutes de pression Δp . Il faut trouver le couple $d/\Delta p$ qui correspond à une dimension standard de restriction et à une étendue de mesure du capteur de pression disponible sur le marché.

Plusieurs solutions étant possibles le choix est fait pour minimiser les pertes de charges.

E. Les plaques orifices :

Le plus simple des organes déprimogènes est la plaque orifice. Cela consiste simplement en une plaque percée d'un trou qui est insérée entre deux sections de conduites.

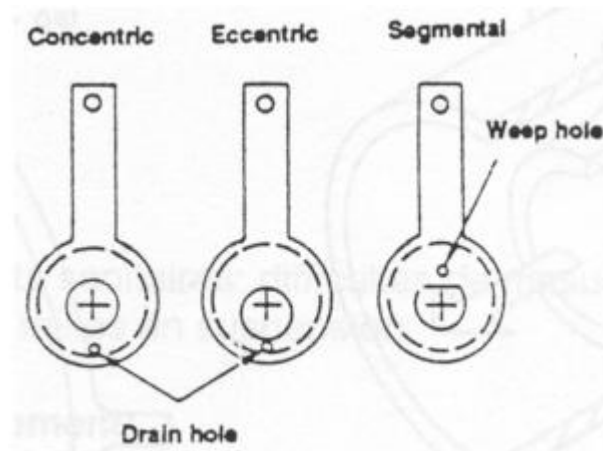


Figure III.21 : plaques orifices

Il existe diverses variantes de la plaque orifices selon la nature du liquide transportée.

Cette technique exige que le liquide transporté soit propre pour éviter l'accumulation de matière en amont et en aval de la plaque orifice, changeant ainsi ses caractéristiques.

La chute de pression Δp est mesurée en installant un capteur de pression différentielle. Il existe plusieurs configurations pour l'emplacement des connexions des prises de pression sur la conduite :

- Prises dans les coins des brides ;
- Prises à $0.5 D/0.5 D$;
- Prises à $0.5 D/8 D$.

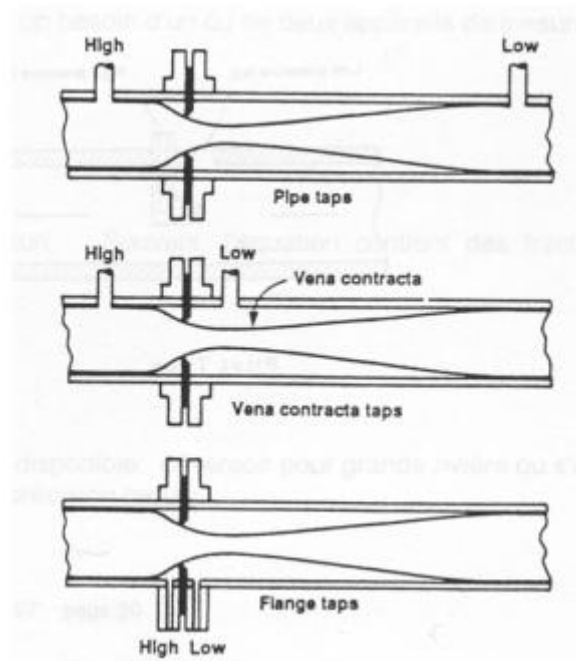


Figure III.22: Les différentes façons de mesurer la chute de pression

Les pertes de charges d'un débitmètre à plaque orifice sont très élevées et peuvent aller jusqu'à 70 %. Ainsi, on recommande de ne pas choisir une plaque dont le diamètre soit moins de 20 % du diamètre de la conduite. Donc le beta devrait être entre 0.2 et 0.7.

Le nombre de Reynolds requis est de 15000 ou plus. En fait, si la conduite est d'un diamètre inférieur à 0.1 m et que le beta est inférieur à 0.5 on recommande $R_e > 15000$, sinon il faut que $R_e > 45000$.

Il faut prévoir une longueur de conduite rectiligne (et horizontale) de 10D à 50D en amont et de 10D en aval. Le recours à un amortisseur de turbulence peut permettre de réduire la longueur requise.

Le fluide ne doit pas avoir de matières en suspension. Le risque est que ces matières en suspension se déposent en amont et en aval de la plaque et modifient les caractéristiques du débitmètre.

La précision de ce capteur est celle des capteurs de pression, soit $\pm 0.2\%$ de l'étendue de mesure.

F. Les tuyères :

Une autre façon de mesurer le débit est l'utilisation de la tuyère qui est une alternative intéressante au venturi, car beaucoup moins encombrant.

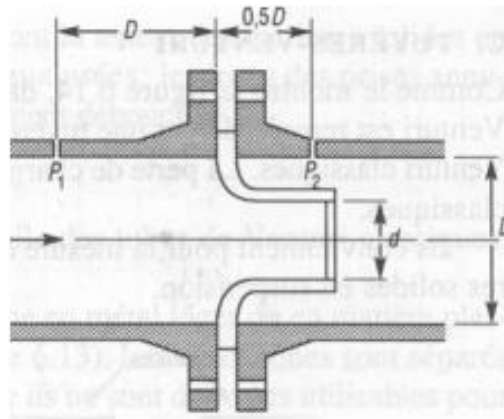


Figure III.23 : Débitmètre à tuyère

La perte de charge est de seulement 5% dans une tuyère et le nombre de Reynolds requis est de 50000 ou plus. Il fonctionne aussi avec des liquides ayant des matières en suspension.

G. Mesure par vitesse linéaire :

1. Les débitmètres électromagnétiques

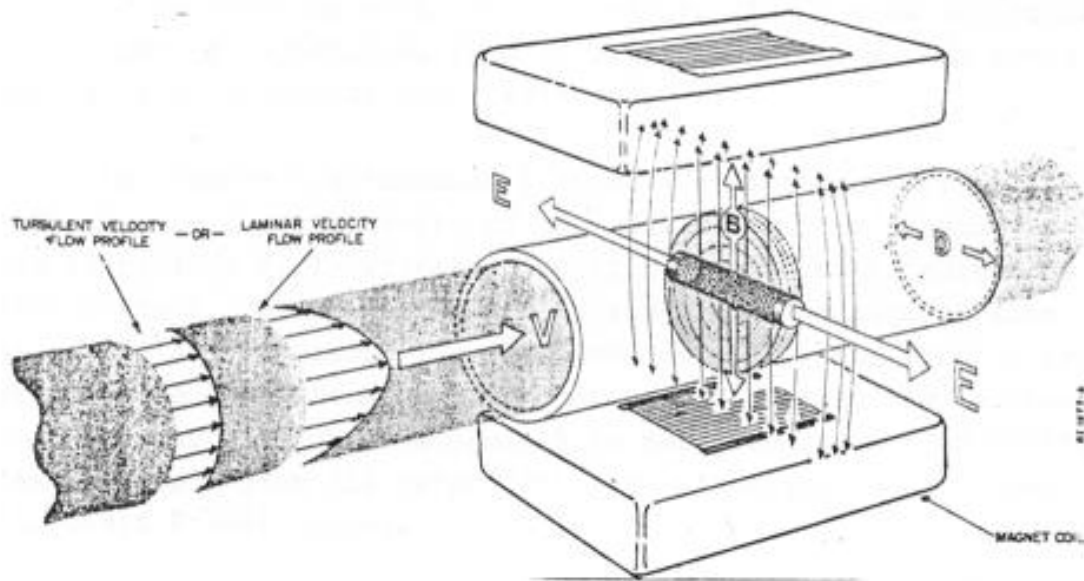


Figure III.24: Principe de fonctionnement d'un débitmètre électromagnétique

Le principe du débitmètre électromagnétique est basé sur la loi de Lenz.

Un conducteur en mouvement dans un champ magnétique constant verra une force électromotrice apparaître. L'amplitude de cette force électromotrice est proportionnelle à la vitesse de déplacement du conducteur :

$$FEM = kBDv \dots(21)$$

Avec B l'intensité du champ magnétique ; D le diamètre de la conduite ; v la

vitesse d'écoulement du fluide et k une constante.

Pour mesurer cette "FEM", il faut que la conduite soit isolée, pour ne pas court-circuiter cette "FEM". Le débitmètre électromagnétique est en matériau isolant pour cette raison. Deux électrodes sont placées de part et d'autre de la conduite au niveau du débitmètre pour mesurer la "FEM".

Lors de l'installation de ce débitmètre, il faut s'assurer que la ligne entre ces, électrodes soit horizontale.

Le débitmètre électromagnétique peut être installé sur une conduite horizontale, verticale ou oblique. Dans le cas où la conduite est verticale, il faut que le débit du fluide soit du bas vers le haut pour assurer une bonne continuité électrique. Aucune longueur minimale de conduite rectiligne n'est exigée.

Ce débitmètre fonctionne quelque soit le régime d'écoulement, en autant que la vitesse du liquide soit supérieur à 1 mètre par seconde. La rangeabilité est de 20 :1 et la perte de charge est nulle.

Tous ces points positifs ont un prix, ce débitmètre est relativement couteux.

2. Les débitmètres à ultrasons :

Les ultrasons peuvent être utilisés pour la mesure de débit. Deux approches sont disponibles :

- Débitmètre à temps de parcours ;
- Débitmètre à effet Doppler.

Le choix entre ces deux approches sera fait en fonction du fluide transporté. Si le fluide est propre, sans particules en suspension et sans bulles, le débitmètre à temps de parcours doit être choisi.

Si le fluide contient une bonne proportion de particules en suspension ou de bulles, on utilisera le débitmètre à effet Doppler.

2.1. A temps de parcours :

Le principe de ce débitmètre est relativement simple (Figure). Deux sources ultrasoniques émettent l'une en direction amont, l'autre en direction aval. Deux récepteurs reçoivent le signal ultrasonique de la source correspondante.

Le signal ultrasonique orienté vers l'amont sera ralenti en raison du fluide porteur qui circule en direction inverse. Le temps de propagation de ce signal est calculé comme suit :

$$t_1 = \frac{L}{c - v \cos(\theta)} \dots(22)$$

Avec v la vitesse d'écoulement du fluide ; c la vitesse du son ; L la longueur du parcours fait par l'onde ultrasonique et θ l'angle entre le parcours des ultrasons et l'axe de la conduite.

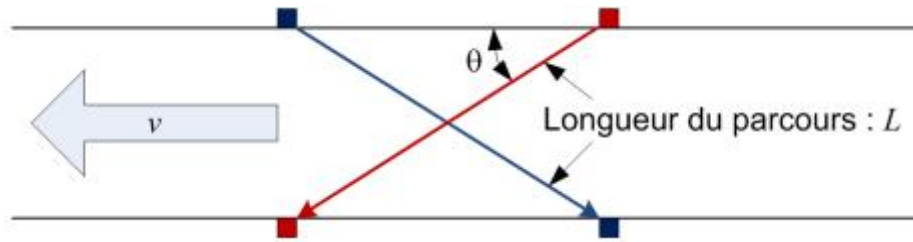


Figure III.25 : Principe du débitmètre ultrasonique à temps de parcours.

Le signal ultrasonique orienté vers l'aval sera accéléré en raison du fluide porteur qui circule dans la même direction. Le temps de propagation est :

$$t_2 = \frac{L}{c + v \cos(\theta)} \quad \dots(23)$$

La différence entre ces deux temps de propagation $\Delta t = t_1 - t_2$ est :

$$v = \frac{\sqrt{L^2 + c^2 \Delta t^2} - L}{\Delta t \cos(\theta)} \quad \dots(24)$$

Que l'on peut approximer à :

$$v \approx \Delta t \frac{c^2}{2L \cos(\theta)} \quad \dots(25)$$

Ce qui fait que la vitesse d'écoulement v à peu près proportionnelle à la différence des temps de parcours Δt .

La présence de particules en suspension nuit à la mesure puisqu'elles bloquent la propagation du signal ultrasonique qui ne se rend pas au détecteur.

Bilan :

- Echelle linéaire et réponse instantanée ;
- Rangeabilité élevée 20 :1 ou plus ;
- Débits de 0.03 à 30 m/s ;
- Précision de l'ordre de ± 1 % EM ;
- Mesure dans des conduits de 3 à 5000 mm ;
- Mesure dans les deux sens ;
- Sensible à la température, la viscosité, la densité du liquide (qui change la vitesse du son dans le liquide) ;
- Exige des conduites rectilignes sur 10D en amont et 5D en aval (avec D le diamètre de la conduite) ;

- Fréquence de la sonde de 7 Mhz ;
- Impossible de mesurer le débit des gaz ;
- Bulles d'air ou de gaz non tolérées ;
- Pas de matières en suspension.

2.2. A effet Doppler :

Le principe de ce débitmètre, c'est d'utiliser l'effet Doppler pour mesurer la vitesse du débit, la même technique que les policiers utilisent pour mesurer la vitesse des véhicules routiers.

Mais, on ne peut mesurer directement la vitesse du fluide qui transporte le signal ultrasonique (Figure 26). Il faut plutôt mesurer la vitesse d'une particule transportée par le fluide. Donc, cette technique ne peut fonctionner avec un liquide propre. Il faut obligatoirement des particules en suspension, car c'est la vitesse de ces particules qui est mesurée. On assume que les particules se déplacent à la même vitesse que le fluide.

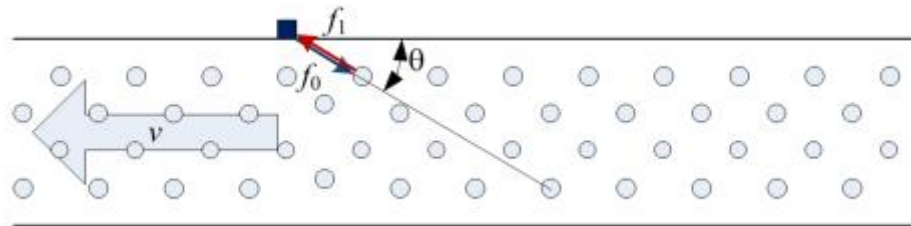


Figure III.26 : Principe du débitmètre ultrasonique à effet Doppler

La vitesse v des particules (et du fluide) est proportionnelle à la variation de fréquence Δf provoqué par l'effet Doppler :

$$v = k\Delta f \quad \dots(26)$$

Avec k une constante. Cette constante k est calculée comme suit :

$$k = \frac{c}{2f_0 \cos(\theta)} \quad \dots(27)$$

Avec f_0 , la fréquence des ultrasons émis par le capteur, c la vitesse du son et θ l'angle du signal ultrasonique avec l'axe de la conduite.

Si la proportion de particules en suspension est trop élevée, il y a un risque que la vitesse de ces particules soit trop différente de celle du liquide pour que la mesure soit fiable.

Bilan :

- Méthode destinée aux liquides contenant des bulles ou des matières en suspension (entre 2 et 60 % de matière solide).
- Imprécision de l'ordre de ± 3 % EM.

H. Les débitmètres à vortex :

Lorsqu'un fluide se déplace et rencontre un obstacle il se produit en aval des tourbillons. Ce phénomène est bien visible en aval des piliers d'un pont traversant une rivière ayant un bon débit (en autant que le pilier est dans l'eau).

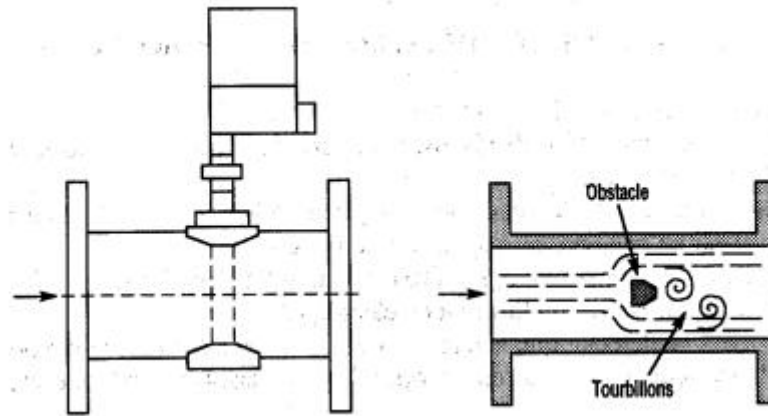


Figure III.27: Débitmètre à vortex.

Strouhal a montré qu'il existe une relation entre la fréquence f de détachement de ces tourbillons et la vitesse v d'un fluide :

$$f = \frac{S_t v}{d} \dots (28)$$

Avec S_t le nombre de Strouhal et d la largeur du corps perturbateur. La fréquence de ces tourbillons est mesurée en mesurant la variation de pression provoquée par ces tourbillons.

Cette méthode de mesure s'applique aux gaz comme aux liquides. Strouhal a d'ailleurs découvert la relation fréquence/vitesse lors d'une expérience avec un fil tendu dans l'air. La fréquence de sifflement du fil est proportionnelle à la vitesse du vent.

Bilan :

- Le capteur est simple et robuste ;
- La précision est de l'ordre de ± 0.5 % EM ;
- Le temps de réponse est très rapide (de l'ordre du millième de seconde) ;
- Ce capteur est disponible pour faire des mesures dans des conduites de 5 à 60 cm de diamètre ;
- Le nombre de Reynolds requis est dans la plage entre 10000 et 300000, car c'est la zone où le nombre de Strouhal est relativement constant (car il dépend de façon non-linéaire avec le nombre de Reynolds) ;
- L'obstacle permettant de générer les fameux tourbillons entraîne une perte de charge ;

- Le capteur est sensible aux variations de la température, de la viscosité et de la pression ;
- Ce capteur requiert des longueurs rectilignes de 10D en amont et de 5D en aval (D = diamètre de la conduite) ;
- La rangeabilité du capteur est excellente de l'ordre de 30 : 1.

I. Débitmètres à turbine :

Le débitmètre à turbine permet la mesure de débit en comptant le passage des ailettes montées sur un rotor. Le fluide en se déplaçant vient frapper les ailettes, ce qui provoque une surpression sur la face aval des ailettes et une dépression sur la face amont. Cela entraîne l'apparition d'un couple forçant la rotation de la turbine.

Plus le débit est élevé pour la turbine tourne rapidement, car les forces subies par les ailettes seront plus élevées. La turbine prélève de l'énergie du fluide, ce qui implique de ce débitmètre provoque une perte de charge.

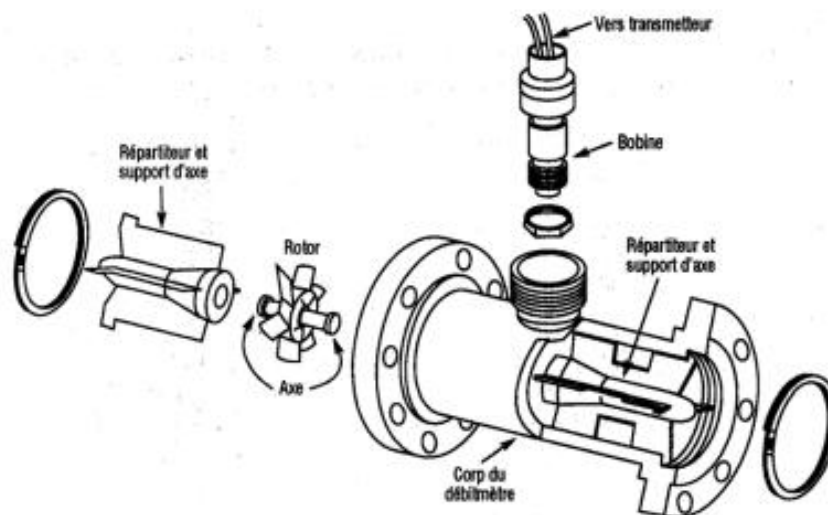


Figure III.28 : Débitmètre à turbine.

Bilan :

- E.M. de 25 L/h à 10 000 m³ / h ;
- Mesure dans conduits de 5 à 600 mm ;
- Précision de ± 0.1 % EM ;
- Perte de charge non-nulle (≈ 15 kPa) ;
- Problèmes si les liquides sont corrosifs ou chargés de matières en suspension ;
- Rangeabilité de 10 : 1 à 100 : 1 ;

- Conduite rectiligne requise : en amont 10D, en aval 5D.

J. Mesure par Débit de masse :

1. Débitmètre-masse à effet Coriolis :

Un objet en mouvement dans un milieu en rotation sera soumis à une force inertielle agissant perpendiculairement à son mouvement. Cette force, nommée "force de Coriolis" est une force fictive au même titre que la force centrifuge.

Ainsi, pour obtenir une force de Coriolis sur un liquide en mouvement, il faut déplacer la conduite sur un arc de cercle pour lui donner un mouvement circulaire.

Comme on ne peut faire tourner la conduite de 360° autour d'un centre de rotation, car l'installation serait trop compliquée, on fait simplement osciller la conduite de quelques fractions de degrés dans un mouvement circulaire.

On donne une certaine forme à la conduite pour amplifier cet effet et le rendre plus facilement mesurable.

La force de Coriolis subie par une masse m en mouvement à une vitesse \vec{v} est calculée par le produit vectoriel de la vitesse de l'oscillation $\vec{\omega}$ et de cette vitesse :

$$\vec{F}_c = 2m(\vec{\omega} \times \vec{v}) \dots(29)$$

La mesure de cette force est faite par une mesure de la torsion subie par une conduite. Dans une conduite en U avec une oscillation du bout du U, la force de Coriolis d'une branche du U est l'inverse de celle de l'autre branche, car $\vec{\omega} \times \vec{v} = -(\vec{\omega} \times -\vec{v}) \dots(30)$

Les débitmètres à effet de Coriolis ayant des tubes en B permettent d'augmenter la longueur du parcours et ainsi d'avoir des torsions plus importantes.

Bilan :

- La rangeabilité du capteur est de 20 : 1 ;
- Les étendues de mesure disponibles sont de 0.1 kg/minute à 3000 kg/minute.

2. Débitmètre massique thermique :

La mesure de débit avec un débitmètre massique thermique est relativement simple.

On chauffe une électrode exposée au fluide dont on désire mesurer le débit (ou une section de la conduite - Figure). La chaleur est transportée par le fluide vers un capteur de température localisé en aval (température mesurée T_2). Un capteur de température mesure la

température du fluide en amont (température mesurée T_1). La différence de température $T_2 - T_1$ entre les deux capteurs permet de connaître le débit massique du fluide.

Une autre approche utilisée consiste à chauffer une électrode à une température constante. Le déplacement du fluide refroidit cette électrode et un asservissement de température est nécessaire pour maintenir l'électrode à température constante. Le signal de mesure de débit est alors basé sur l'intensité du courant y circulant chauffant l'électrode par effet Joule.

Lorsque ce débitmètre mesure le débit massique d'un gaz, certains l'identifient sous le nom d'anémomètre à fil chaud.



Figure III.30 : Débitmètre massique thermique.

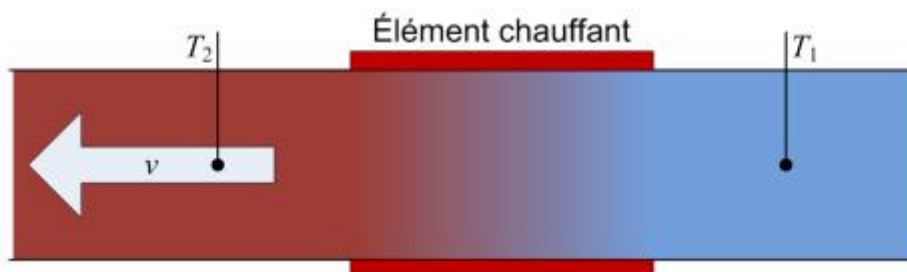


Figure III.31: Principe du débitmètre massique thermique

Bilan :

- Mesure de débit massique de liquides et de gaz ;
- Précision de l'ordre de $\pm 1 \% \`a \pm 2 \%$;
- E.M. de 0.5 gr/m `a 20 000 kg/h ;
- Rangeabilité de 20 :1.

V. Capteurs de vibration :

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibrations consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations. On retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le **capteur de déplacement**, le **capteur de vitesse** ...

Les capteurs de vibrations se divisent en deux catégories caractérisées par le type de mesure à effectuer. S'agit-il d'une mesure de vibration absolue ou bien d'une mesure de vibration relative ? Dans le premier cas, le capteur de vibrations est monté en un point quelconque sur la machine (figure ci-dessous).

La mesure effectuée tient alors compte de tous les phénomènes vibratoires transmis par la structure de la machine au point de montage du capteur. Dans le deuxième cas, seule la vibration produite par le mouvement de l'arbre ou du rotor par rapport à une position de référence est mesurée. La figure ci-après vous montre les capteurs de vibrations associés à chacun des types de mesures.

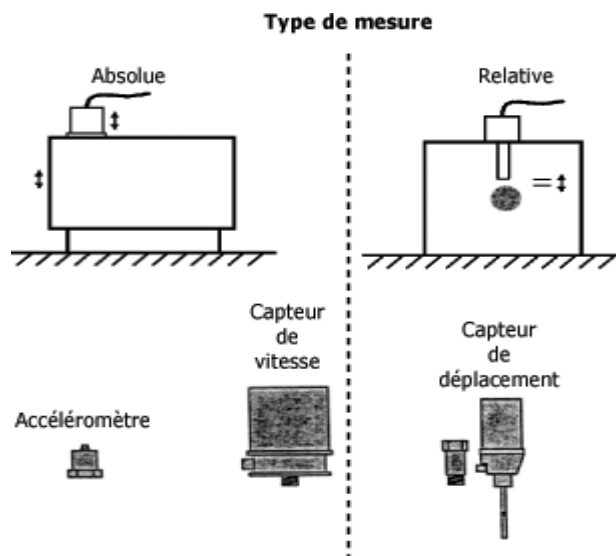


Figure III.32 : Capteurs de vibrations

A. Capteur de déplacement :

Le capteur de déplacement est un instrument qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Il est

monté en permanence à l'intérieur du palier (figure suivante). Il s'agit d'un capteur "non-contact", c'est-à-dire que le capteur n'entre jamais en contact avec la surface en vibration.

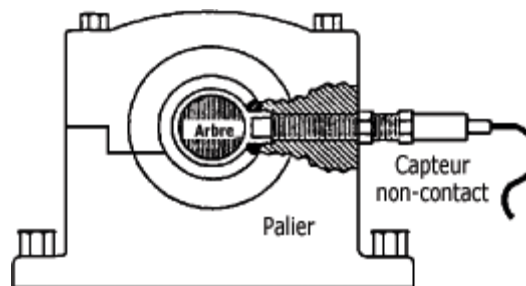


Figure III.33 : Capteur de déplacement

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère essentielle. C'est pourquoi l'on retrouve des capteurs de déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques et des turbomachines.

1. Principe de fonctionnement :

Un oscillateur (appareil qui génère un signal oscillatoire) envoie un signal d'amplitude constante à très haute fréquence au capteur. Le signal, appelé signal porteur, produit un champ magnétique en passant au travers de la petite bobine située à l'extrémité du capteur (figure suivante).

L'arbre situé à proximité absorbe une partie de l'énergie du champ magnétique qui, à son tour, produit une réduction proportionnelle de l'amplitude du signal porteur (modulation).

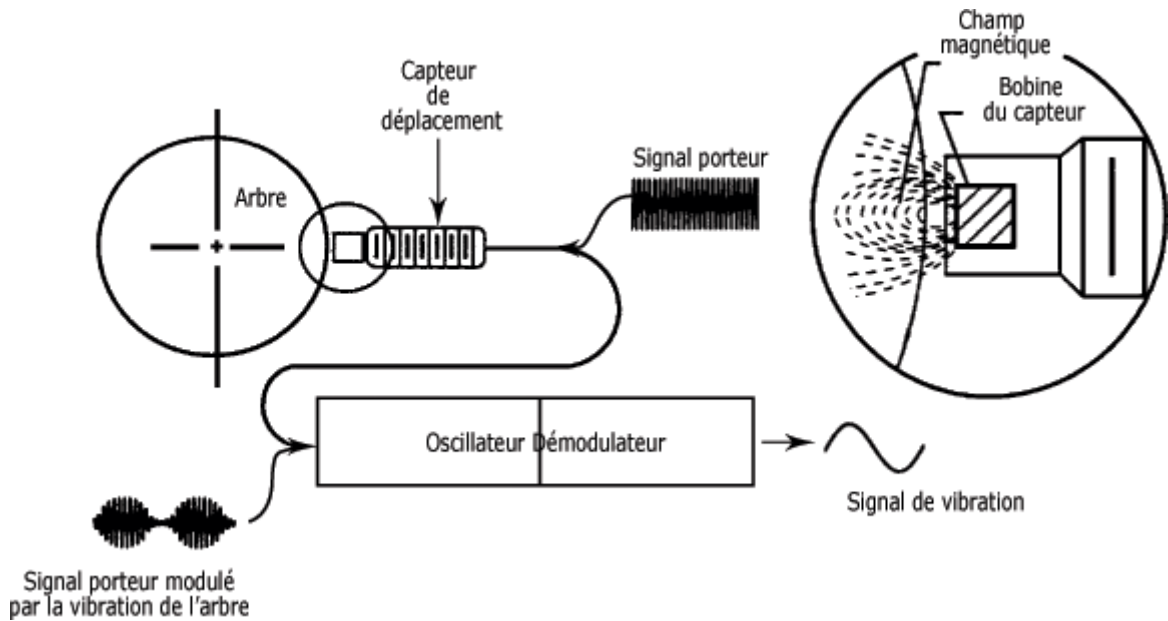


Figure III.34 : Schéma de fonctionnement d'un capteur de déplacement

Plus l'arbre se rapproche du capteur, plus l'amplitude du signal s'en trouve affectée. La modulation du signal porteur traduit donc l'importance du déplacement relatif de l'arbre par rapport au palier. Le signal est ensuite démodulé et la vibration, déplacement de crête-à-crête, est mesurée.

L'unité utilisée est le μm (10^{-6} m) ou le mils (10^{-3} pouce) : 1 mils = 25,4 μm .

2. Avantages :

Les principaux avantages associés à l'emploi du capteur de déplacement sont :

- la mesure directe du mouvement de l'arbre ;
- l'absence d'usure (aucun élément mobile) ;
- la mesure faite directement en unités de déplacement ;
- le fonctionnement jusqu'à des fréquences extrêmement faibles.

3. Inconvénients :

Les principaux désavantages associés à l'emploi du capteur de déplacement sont :

Chapitre III : Les capteurs utilisés dans l'unité

- la mauvaise qualité du signal occasionnée par la présence d'irrégularités à la surface des arbres ;
- l'installation minutieuse requise ;
- la très faible gamme dynamique du capteur (la gamme dynamique est le rapport de l'amplitude la plus élevée à l'amplitude la plus faible qui puisse être mesurée) qui est de l'ordre de 100/1 ;
- la gamme de fréquences limitée du capteur qui n'excède pas en pratique 200 Hz.

Chapitre IV

*«Etude d'un capteur
transmetteur de pression
SIEMENS SITRANS P DSIII »*

I. Description



Figure IV.1 : Transmetteur de pression siemens Sitrans P DSIII

Le SITRANS P de la série DS III est un transmetteur de pression numérique servant à mesurer la pression relative, la pression absolue, la pression différentielle, le débit et le niveau.

L'appareil standard offre déjà de nombreuses fonctions de diagnostic et de simulation ainsi qu'une fiabilité élevée. Son adéquation à l'utilisation dans des circuits de mesure SIL2 a été attestée par des instituts de certification externes.

Pour les transmetteurs de mesure Profibus, la nouvelle technologie PROFISAFE garantit une sécurité de bout en bout, du système de conduite au transmetteur de mesure.

A. Détails

- Incertitude de mesure $\leq 0.065\%$;
- Dérive à long terme $\leq 0.125\%$ / 60 mois ;
- Etendue de mesure 0 - 1 mbar à 0 - 700 bar

B. Avantages

- Nombreuses fonctions de simulation et de diagnostic, La technologie avancée des nouveaux transmetteurs de mesure SITRANS P se traduit par les atouts suivants:
 - Surveillance des valeurs limites par un compteur d'événements. Celui-ci signale le nombre, la durée et la taille des dépassements des seuils de pression, ainsi que la nécessité d'émission d'un signal d'erreur Vous obtenez ainsi une vue d'ensemble sur le processus;

Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII

- Enregistrement des dépassements de l'étendue de mesure à partir des mémoires min/max de la pression d'entrée, de la température du capteur et la température de l'électronique. Ils renseignent sur l'état du nouveau SITRANS P, du processus et de la température ambiante;
 - Timer de maintenance signalant la date du calibrage pour garantir en permanence une précision maximale;
 - Fonction de simulation, placée directement en aval du capteur, qui vérifie l'électronique du transmetteur et l'ensemble de la boucle en fonction d'une valeur définie, en vue d'obtenir des informations essentielles : L'électronique du transmetteur est-elle correcte ? A quel niveau de pression la détection de seuil réagit-elle ? La boucle de régulation fonctionne-t-elle correctement, les affichages fonctionnent-ils...?
 - Si l'appareil signale une défaillance de l'électronique ou de la cellule de mesure, il suffit de remplacer la pièce endommagée sur place, par enfichage. Un ré-étalonnage n'est pas nécessaire.
- Adapté à un montage dans les circuits de mesure SIL 2 selon IEC 61508 / IEC 61511. Dans l'exécution PROFIsafe, la plus grande sécurité de communication est garantie jusqu'au niveau du système de commande
 - Nombreux certificats et homologations par ex. ATEX EEx ia, EEx ib, protection contre la poussière, FM, CSA
 - Possibilité d'affecter les valeurs souhaitées pour un circuit de mesure via une fonction de simulation
 - Nombreuses possibilités différentes de communication de bus : HART, PROFIBUS PA, PROFIsafe ou FF

II. Aperçu



Figure IV.2 : transmetteur de pression Sitrans DS III

Les transmetteurs de pression numériques SITRANS P, Série DS III, garantissent un grand confort d'utilisation et une précision élevée. Le paramétrage est réalisable soit à l'aide des touches de fonction, soit par la communication HART soit par PROFIBUS PA soit par l'interface FOUNDATION Fieldbus.

Leur fonctionnalité étendue permet une adaptation idéale des transmetteurs de pression aux exigences spécifiques de tout type d'installation. La multiplicité des possibilités de réglage n'affecte en aucun cas l'extrême simplicité de service et de commande.

Les transmetteurs type "sécurité intrinsèque" et "enveloppe antidéflagrante" peuvent être utilisés en zone à atmosphère explosive (Zone 1) ou en Zone 0. Les transmetteurs détiennent un certificat de conformité CE et satisfont aux normes européennes harmonisées correspondantes (ATEX).

Dans certains cas d'application particuliers, comme par ex. la mesure de fluides haute viscosité, les transmetteurs peuvent être livrés avec des séparateurs de différents types.

Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII

Les transmetteurs de pression DS III existent en différentes variantes pour les mesures de :

- Pression relative ;
- Pression absolue ;
- Pression différentielle ;
- Niveau ;
- Masse ;
- Volume ;
- Débit-volume ;
- Débit-masse.

A. Avantages

- Haute qualité et longue durée de vie ;
- Extrême fiabilité de fonctionnement même sous les sollicitations chimiques et mécaniques les plus sévères ;
- Pour les mesures des gaz, vapeurs et liquides corrosifs et non corrosifs ;
- Multiples fonctions de diagnostic et de simulation ;
- Remplacement de la cellule de mesure et de l'électronique indépendamment l'une de l'autre sans recalibrage ;
- Erreur de conformité minimale
- Faible dérive à long terme ;
- Pièces en contact avec le fluide en matériaux de très haute qualité (acier inoxydable, hastelloy, or, monel, tantale) ;
- Etendue de mesure paramétrable en continu de 0,01 bar à 700 bars (0.145 à 10153 psi g) pour DS III avec communication HART ;
- Plages de mesure nominales de 1 à 700 bars (14.5 à 10153 psi g) pour DS III PA (PROFIBUS PA) et FF (FOUNDATION Fieldbus) ;
- Précision de mesure élevée ;
- Paramétrage par touches de commande et via communication HART ou interfaces soit PROFIBUS PA soit FOUNDATION Fieldbus.

III. Composition :

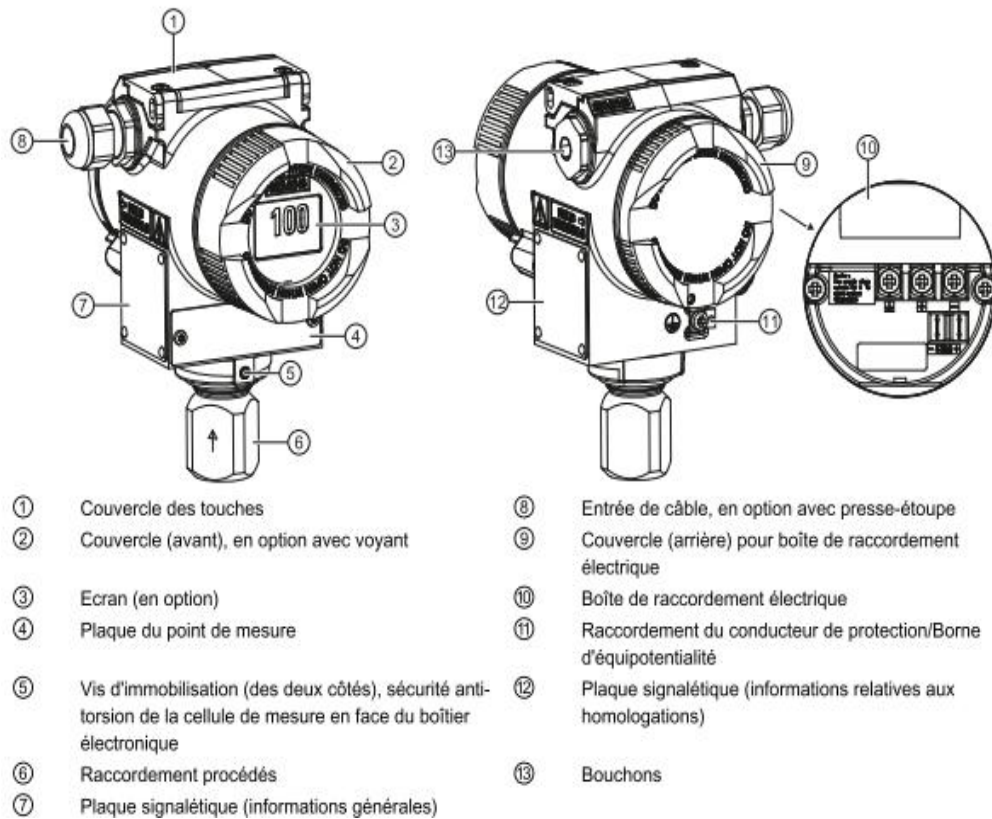


Figure IV.3 : Composition du transmetteur SITRANS DSIII

IV. Domaine d'application

Les transmetteurs de la Série DS III sont conçus pour l'exploitation dans des secteurs industriels caractérisés par des conditions chimiques et mécaniques particulièrement sévères. Leur plage de compatibilité électromagnétique étendue de 10 kHz à 1 GHz permet l'utilisation des DS III dans des implantations à hautes perturbations électromagnétiques.

Les transmetteurs type "sécurité intrinsèque" et "enveloppe antidéflagrante" peuvent être utilisés en zone à atmosphère explosive (Zone 1) ou en Zone 0. Les transmetteurs détiennent un certificat de conformité CE et satisfont aux normes européennes harmonisées correspondantes (ATEX).

Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII

Les transmetteurs disposant du mode de protection "sécurité intrinsèque" pour l'utilisation en Zone 0 peuvent être utilisés en association avec des appareils d'alimentation de catégorie "ia" et "ib".

Dans certains cas d'application particuliers, comme par ex. la mesure de fluides à haute viscosité, les transmetteurs peuvent être livrés avec des séparateurs de différents types.

La programmation du transmetteur peut se faire en local au moyen de 3 touches ou à distance via communication HART ou via interfaces soit PROFIBUS PA, soit FOUNDATION Fieldbus.

V. Transmetteur de pression relative :

- **Grandeur de mesure** : Pression relative des gaz, vapeurs et liquides corrosifs et non corrosifs.
- **Etendue de mesure (réglage continu)** Pour DS III HART : 0,01 à 700 bars g (0.145 à 10153 psi g)
- **Plage de mesure nominale** Pour DS III PA et FF : 1 à 700 bars g (14.5 à 10153 psi g)

VI. Transmetteur de pression absolue

- **Grandeur de mesure** : Pression absolue des gaz, vapeurs et liquides corrosifs et non corrosifs.
- **Etendue de mesure (réglage continu)** : Pour DS III HART : 8,3 mbars a à 100 bars (0.12 à 1450 psi a) ;
- **Plage de mesure nominale** Pour DS III PA et FF : 250 mbars a à 100 bars (3.63 à 1450 psi a).

Il existe deux types de transmetteurs de pression absolue :

- Type "Pression relative" ;
- Type "Pression différentielle"

VII. Transmetteurs de pression différentielle et de débit

Grandeurs de mesure :

- Pression différentielle, par ex. pression effective ;
- Faible pression relative positive ou négative ;
- Débit $q \sim \sqrt{\Delta p}$ (en association avec un organe déprimogène (cf. Chapitre "Débitmètres").

Etendue de mesure (réglage continu) : Pour DS III HART : 1 mbar à 30 bars (0.0145 à 435 psi).

Plage de mesure nominale : Pour DS III PA et FF : 20 mbar à 30 bars (0.29 à 435 psi).

VIII. Construction :



Figure IV.4 : vue de face

Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII

Le transmetteur se compose de différents éléments suivant la configuration commandée par l'utilisateur. Les variantes possibles sont déterminables sur la base des tableaux de références de commande. Les composants décrits ci-après sont identiques pour tous les appareils.

Le boîtier porte sur son côté une plaque signalétique (3, Fig. "Vue de face de l'appareil") avec le numéro de référence. A l'aide de ce numéro et des indications des tableaux de références de commande, on peut définir des détails optionnels de construction et les plages de mesure exploitables (propriétés physiques du détecteur incorporé).

Du côté opposé se trouve l'étiquette d'agrément.

Le boîtier est réalisé en aluminium coulé sous pression ou en acier inoxydable. Les faces avant et arrière comportent chacune un couvercle rond dévissable. Le couvercle avant (6) peut être doté d'un regard permettant la lecture directe de l'affichage numérique. Sur le côté, à gauche ou à droite, se trouve l'arrivée (4) réservée pour le raccordement électrique. L'ouverture non utilisée (du côté opposé) est obturée par un cache. La borne du conducteur de protection est au dos du boîtier.

En dévissant le couvercle arrière, on accède au raccordement de l'alimentation électrique et au blindage. Sur la partie inférieure du boîtier se trouve la cellule de mesure avec raccord process (1). La cellule de mesure est sécurisée contre la rotation par une vis de blocage (8). Cette conception modulaire permet de remplacer l'électronique et/ou la cellule de mesure indépendamment l'une de l'autre. Les paramètres par défaut sont conservés.

Sur le dessus de l'appareil se trouve un couvercle en matière plastique (5) qui protège les touches de commande.

IX. Fonctions :

A. Fonctionnement de l'électronique avec communication HART :

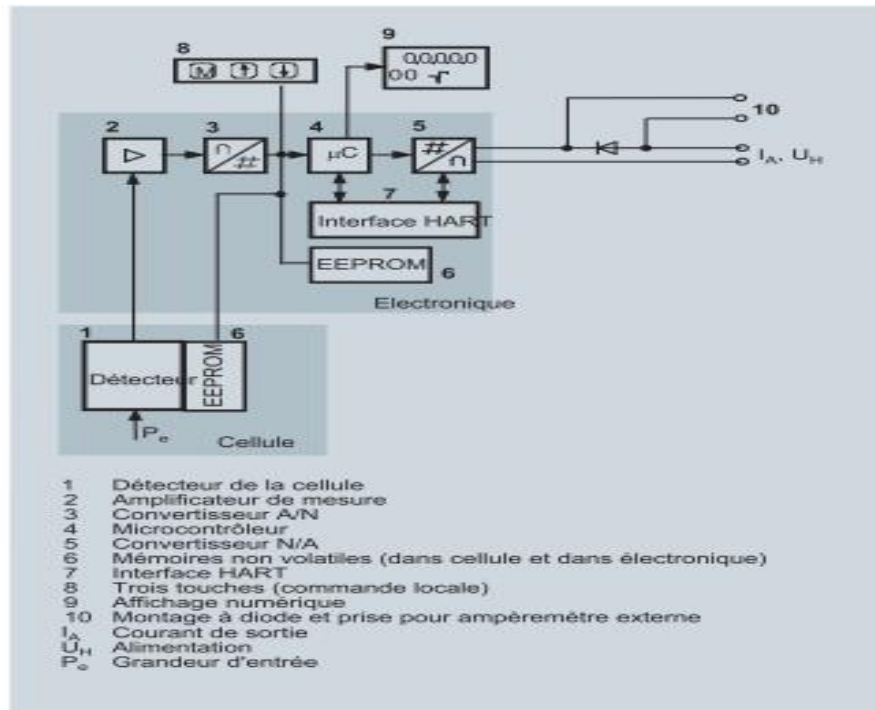


Figure IV.5 : Schéma fonctionnel et Electronique.

La tension de sortie sur pont générée par le capteur (1, Fig. "Schéma fonctionnel Electronique") est amplifiée par l'amplificateur de mesure (2) et numérisé par le convertisseur A/N (3).

L'information numérique est évaluée par un microcontrôleur qui en assure la correction de linéarité et de température avant de l'appliquer à un convertisseur numérique/analogique (5) qui fournit en sortie un courant 4 à 20 mA.

Le circuit à diodes (10) réalise la protection contre l'inversion de polarité.

Les caractéristiques spécifiques de la cellule de mesure, les caractéristiques de l'électronique et les données de paramétrage sont conservées dans deux mémoires non volatiles (6). La première mémoire est associée à la cellule de mesure et la deuxième à l'électronique. Cette conception modulaire permet de remplacer l'électronique et/ou la cellule de mesure indépendamment l'une de l'autre.

Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII

Les trois touches de commande (8) permettent de paramétrer le transmetteur de pression directement au lieu d'implantation.

Ces touches permettent également de visualiser sur l'affichage numérique (9) les résultats de mesure, les signalisations de défaut et les modes de fonctionnement.

Le modem HART (7) permet un paramétrage à distance par l'intermédiaire d'un protocole conforme aux spécifications HART.

Les transmetteurs à plages de mesure ≤ 63 bars mesurent la pression d'entrée par rapport à l'atmosphère, les transmetteurs à plages ≥ 160 bars par rapport au vide.

B. Fonctionnement de l'électronique avec communication PROFIBUS PA :

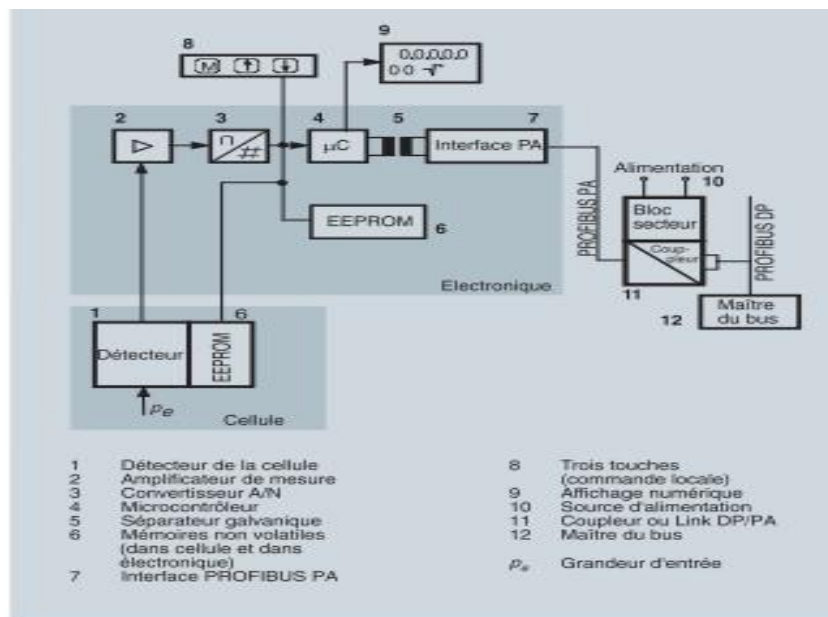


Figure IV.6 : Schéma fonctionnel et Electronique

La tension de sortie sur pont générée par le capteur (1, Fig. "Schéma fonctionnel - Electronique") est amplifiée par l'amplificateur de mesure (2) et numérisé par le convertisseur A/N (3).

Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII

L'information numérique est exploitée dans un microcontrôleur, corrigée en température et en linéarité, et délivrée via une interface PA à séparation galvanique (7) sur le PROFIBUS PA.

Les caractéristiques spécifiques de la cellule de mesure, les caractéristiques de l'électronique et les données de paramétrage sont conservées dans deux mémoires non volatiles (6). La première mémoire est associée à la cellule de mesure et la deuxième à l'électronique. Cette conception modulaire permet le remplacement de l'électronique et de la cellule de mesure indépendamment l'une de l'autre.

Les trois touches de commande (8) permettent de paramétrer le transmetteur de pression directement au lieu d'implantation.

Ces touches permettent également de visualiser sur l'affichage numérique (9) les résultats de mesure, les signalisations de défaut et les modes de fonctionnement.

Les résultats de la mesure, avec valeurs d'état et diagnostic, sont fournis par la transmission cyclique des données du PROFIBUS PA. La transmission des paramètres et des messages d'erreur s'effectue en mode acyclique. Cette opération exige la disposition de logiciels spécialisés tel par exemple que SIMATIC PDM.

**C. Fonctionnement de l'électronique avec communication
FOUNDATION Fieldbus :**

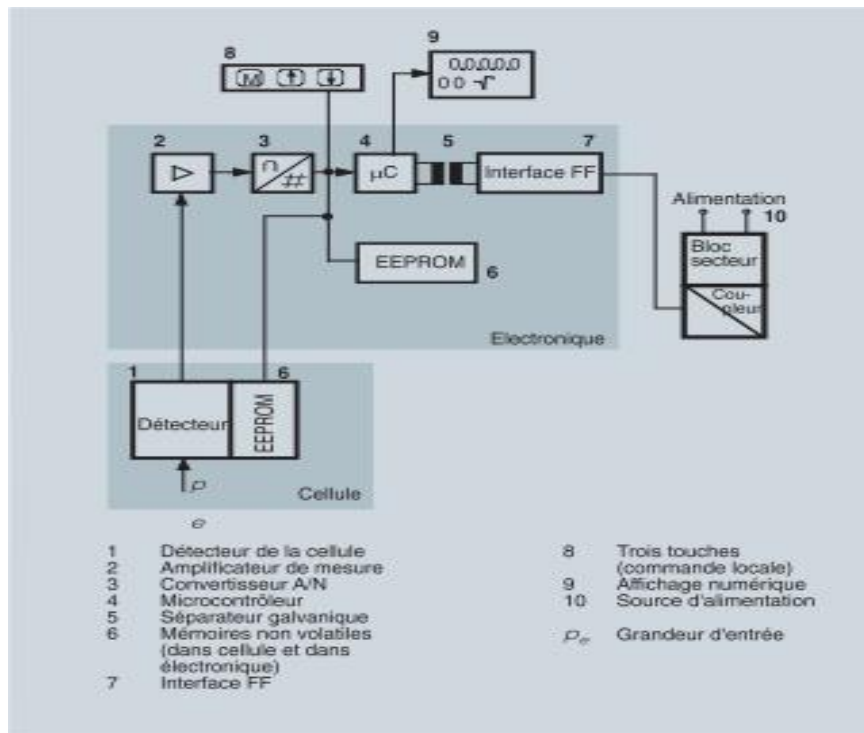


Figure IV.7 : Schéma fonctionnel – Electronique

La tension de sortie sur pont générée par le capteur (1, Fig. "Schéma fonctionnel - Electronique") est amplifiée par l'amplificateur de mesure (2) et numérisé par le convertisseur A/N (3).

L'information numérique est exploitée dans un microcontrôleur, corrigée en température et en linéarité, et délivrée via une interface FOUNDATION Fieldbus à séparation galvanique (7) sur le FOUNDATION Fieldbus.

Les caractéristiques spécifiques de la cellule de mesure, les caractéristiques de l'électronique et les données de paramétrage sont conservées dans deux mémoires non volatiles (6). La première mémoire est associée à la cellule de mesure et la deuxième à l'électronique. Cette conception modulaire permet de remplacer l'électronique et/ou la cellule de mesure indépendamment l'une de l'autre.

Les trois touches de commande (8) permettent de paramétrer le transmetteur de pression directement au lieu d'implantation.

Ces touches permettent également de visualiser sur l'affichage numérique (9) les résultats de mesure, les signalisations de défaut et les modes de fonctionnement.

Les résultats de la mesure, avec valeurs d'état et diagnostic, sont fournis par la transmission cyclique des données du FOUNDATION Fieldbus. La transmission des paramètres et des messages d'erreur s'effectue en mode acyclique. Cette opération exige la disposition de logiciels spécialisés tel par exemple que National Instruments Configurator.

X. Fonctionnement de la cellule de mesure :

A. Cellule de mesure pour pression relative :

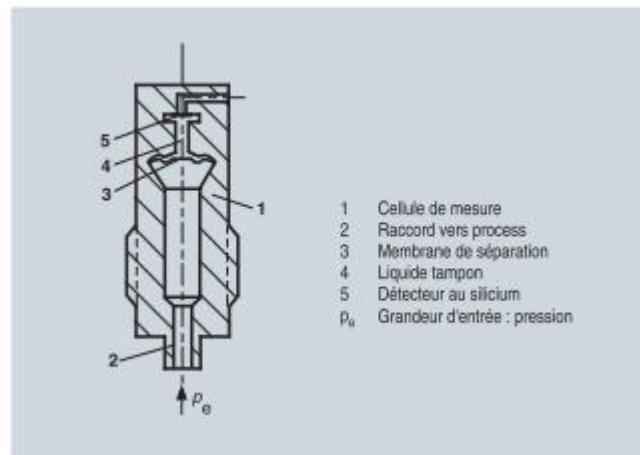


Figure IV.8 : Cellule de mesure de pression relative, schéma fonctionnel.

La pression p_e est appliquée à la cellule de mesure (1) via le raccord process (2, Fig. "Cellule de mesure de pression relative, schéma fonctionnel"). Elle est ensuite transmise au détecteur au silicium (5) par l'intermédiaire de la membrane de séparation (3) et du liquide tampon (4). C'est ainsi que s'effectue la modification de la valeur de quatre résistances piézoélectriques diffusées dans la membrane de mesure, montées en pont. Cette modification de la valeur de résistance génère en sortie du pont une tension proportionnelle à la pression d'entrée.

B. Cellule de mesure de pression absolue Type "Pression différentielle" :

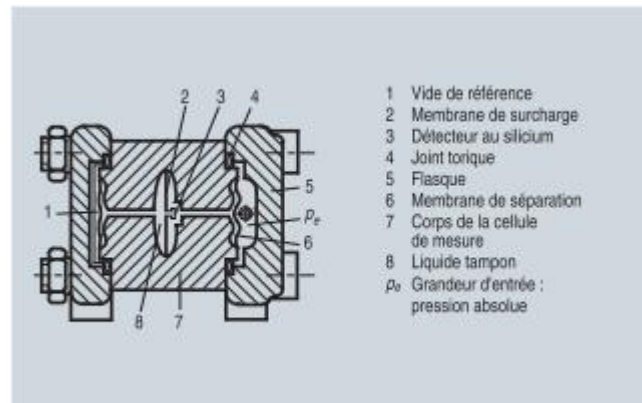


Figure IV.9 : Cellule de mesure de pression absolue Type "Pression différentielle", schéma fonctionnel

La pression d'entrée p_e est transmise au détecteur de pression au silicium (3) par l'intermédiaire de la membrane de séparation (6, Fig. "Cellule de mesure de pression absolue Type "Pression différentielle", schéma fonctionnel") et du liquide tampon (8).

La différence de pression entre la pression d'entrée p_e et le vide de référence (1) du côté basse pression déforme la membrane de mesure. C'est ainsi que s'effectue la modification de la valeur de quatre résistances piézoélectriques diffusées dans la membrane de mesure, montées en pont. Cette variation génère en sortie du pont une tension proportionnelle à la pression absolue.

Une membrane spéciale de sécurité assure la protection contre les surcharges. En cas de dépassement des limites de mesure, la membrane anti-surcharge (2) se déforme jusqu'à ce que la membrane de séparation se plaque contre le corps de la cellule de mesure (7), protégeant ainsi le détecteur de pression au silicium contre toute surcharge.

XI. Paramétrage DS III :

Suivant le modèle, on dispose de différentes possibilités de paramétrage du transmetteur de pression ainsi que de réglage et de contrôle des paramètres.

A. Paramétrage par touches intégrées (commande locale) :

Les touches intégrées du transmetteur permettent un réglage aisé, sans autre auxiliaire, des principaux paramètres.

B. Paramétrage via communication HART :

Le paramétrage via communication HART s'effectue à l'aide d'une pocket HART ou d'un PC.

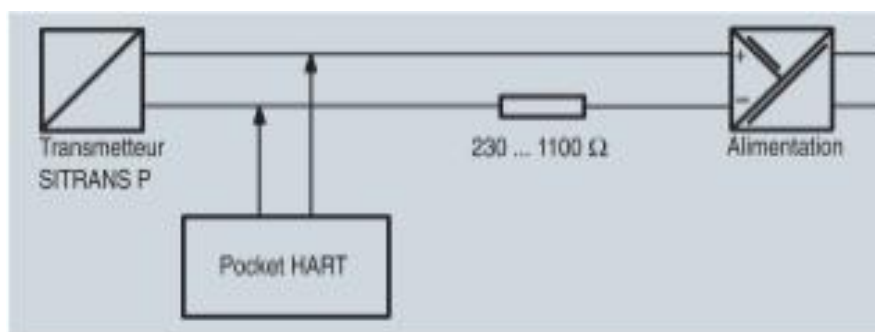


Figure 9 : Communication HART entre la pocket HART et le transmetteur

Dans le cas du paramétrage avec la pocket HART, celle-ci se branche directement sur la ligne bifilaire.

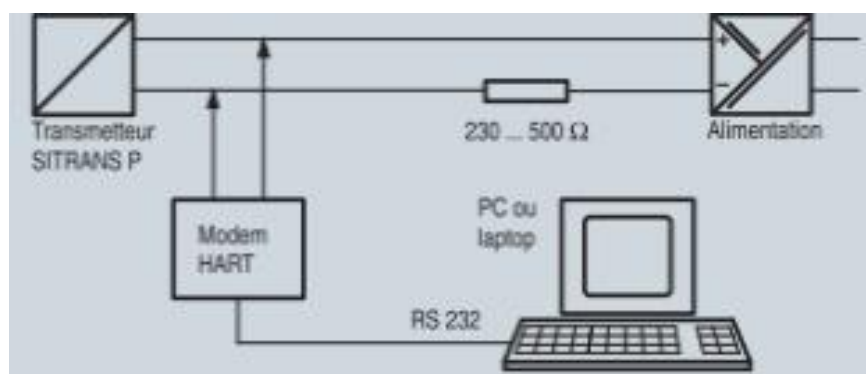


Figure IV.10 : Communication HART entre le PC et le transmetteur.

Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII

Pour le paramétrage avec un PC, un modem HART assure la liaison entre les deux éléments

Les signaux nécessaires à la communication conforme aux protocoles HART 5.x ou 6.x se superposent au courant de sortie par application du procédé de modulation par déplacement de fréquence (FSK - Frequency Shift Keying).

C. Paramètres librement déterminables pour DS III HART :

Paramètres	Touches de commande (DS III HART)	Communication HART
Début de plage de mesure	x	x
Fin de plage de mesure	x	x
Amortissement électrique	x	x
Début de plage en aveugle	x	x
Fin de plage en aveugle	x	x
Compensation du zéro	x	x
Générateur de courant	x	x
Courant de défaut	x	x
Blocage de clavier et d'écriture	x	x ¹⁾
Type d'unité, unité	x	x
Caractéristique (linéaire / rac. carrée)	x ²⁾	x ²⁾
Paramètres de caractéristique		x
Affichage LCD librement programmable		x
Fonctions de diagnostic		x

1) Sauf annulation de la protection en écriture

2) Uniquement pression différentielle

D. Fonctions de diagnostic pour DS III HART :

- Affichage de compensation du zéro ;
- Compteur d'événements ;
- Indicateur de valeurs limites ;
- Alarme de saturation ;
- Index glissant ;
- Fonctions de simulation ;
- Indicateur d'intervalles d'entretien

E. Unités physiques disponibles pour l'afficheur du DS III HART

Grandeurs physiques	Unités physiques
Pression (préréglages et paramétrages sortie usine possibles)	Pa, MPa, kPa, bar(s), mbar(s), Torr, ATM, psi, g/cm ² , kg/cm ² , inH ₂ O, inH ₂ O (4 °C), mmH ₂ O, ftH ₂ O (20 °C), inHg, mmHg
Niveau (hauteur)	m, cm, mm, ft, in
Volume	m ³ , dm ³ , hl, yd ³ , ft ³ , in ³ , US gallon, Imp. gallon, bushel, barrel, barrel liquid
Masse	g, kg, t, lb, Ston, Lton, oz
Débit volumique	m ³ /d, m ³ /h, m ³ /s, l/min, l/s, ft ³ /d, ft ³ /min, ft ³ /s, US gallon/min, US gallon/s
Débit massique	t/d, t/h, t/min, kg/d, kg/h, kg/min, kg/s, g/d, g/h, g/min, g/s, lb/d, lb/h, lb/min, lb/s, LTon/d, LTon/h, STon/d, STon/h, STon/min
Température	K, °C, °F, °R
Divers	%, mA

F. Paramétrage via communication interface PROFIBUS

La communication intégralement numérique via PROFIBUS PA Profil 3.0 se caractérise par son très haut confort. Le PROFIBUS associe le DS III PA à un système de conduite de procédés, tel par exemple que SIMATIC PSC 7. Cette communication est également réalisable dans des environnements caractérisés par des risques d'explosion.

Le paramétrage via PROFIBUS exige l'utilisation d'un logiciel correspondant, par exemple SIMATIC PDM (Process Device Manager).

G. Paramétrage via interface FOUNDATION Fieldbus

La communication intégralement numérique via FOUNDATION Fieldbus se caractérise par son très haut confort. Le FOUNDATION Fieldbus associe le DS III FF à un système de conduite de procédés. Cette communication est également réalisable dans des environnements caractérisés par des risques d'explosion.

Le paramétrage via FOUNDATION Fieldbus exige l'utilisation d'un logiciel correspondant, par exemple National Instruments Configurator.

H. Paramètres librement déterminables pour DS III PA et FF

Paramètres	Touches de commande	PROFIBUS PA et interface FOUNDATION Fieldbus
Amortissement électrique	x	x
Compensation du zéro (correction de position)	x	x
Blocage des touches et/ou inhibition des fonctions	x	x
Source de l'affichage de mesure	x	x
Unité physique de l'affichage	x	x
Position de la virgule décimale	x	x
Adresses bus	x	x
Réglage de la caractéristique	x	x
Paramètres de caractéristique		x
Affichage LCD librement programmable		x
Fonctions de diagnostic		x

I. Fonctions de diagnostic pour DS III PA et FF

- Compteur d'événements ;
- Index glissant ;
- Indicateur d'intervalles d'entretien ;
- Fonctions de simulation ;
- Affichage de compensation du zéro ;
- Indicateur de valeurs limites ;
- Alarme de saturation

J. Unités physiques disponibles à l'affichage :

Grandeurs physiques	Unités physiques
Pression (préréglages et paramétrages sortie usine possibles)	MPa, kPa, Pa, bar(s), mbar(s), Torr, ATM, psi, g/cm ² , kg/cm ² , mmH ₂ O, mmHg, inHg, inH ₂ O, inHg, ftH ₂ O (20 °C), mmHg, inHg
Niveau (hauteur)	m, cm, mm, ft, in, yd
Volume	m ³ , dm ³ , hl, yd ³ , ft ³ , in ³ , US gallon, Imp. gallon, bushel, barrel, barrel liquid
Masse	g, kg, t, lb, STon, Lton, oz
Débit volumique	m ³ /s, m ³ /min, m ³ /h, m ³ /d, l/s, l/min, l/h, l/d, Ml/d, ft ³ /s, ft ³ /min, ft ³ /h, ft ³ /d, US gallon/s, US gallon/min, US gallon/h, US gallon/d, bbl/s, bbl/min, bbl/h, bbl/d
Débit massique	g/s, g/min, g/h, g/d, kg/s, kg/min, kg/h, kg/d, t/s, t/min, t/h, t/d, lb/s, lb/min, lb/h, lb/d, STon/s, STon/min, STon/h, STon/d, LTon/s, LTon/min, LTon/h, LTon/d
Débit massique cumulé	t, kg, g, lb, oz, LTon, STon
Température	K, °C, °F, °R
Divers	%

XII. Commande sur place et affichage :

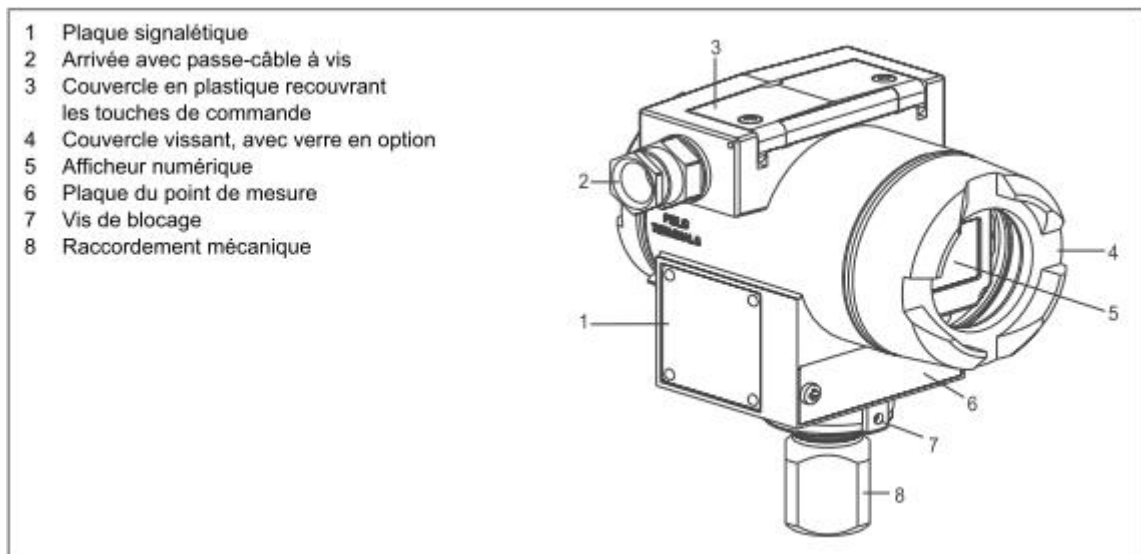


Figure IV.11 : Vue avant de l'appareil Transmetteur SITRANS P, série DS III, série Pression

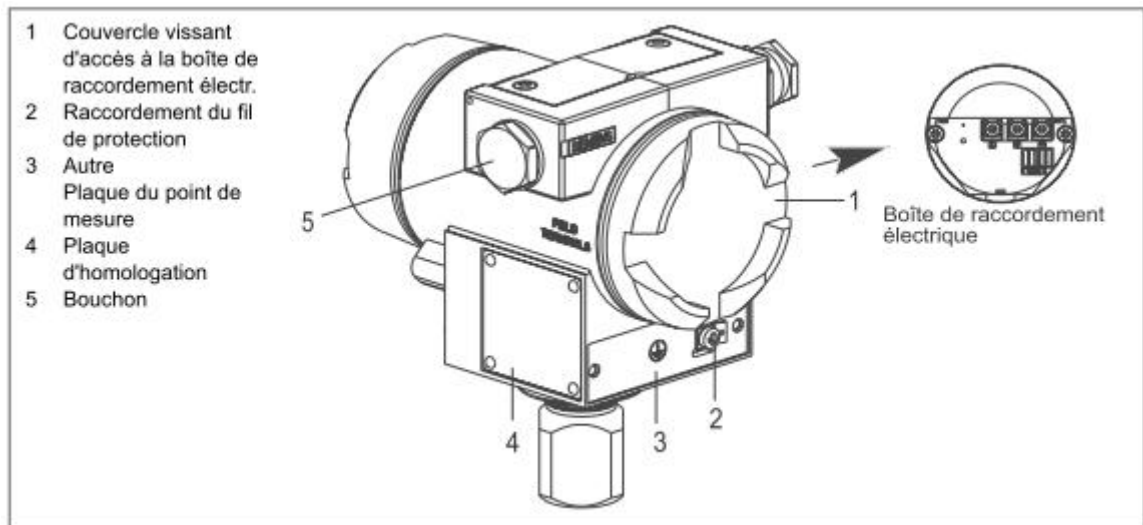


Figure IV.12: Vue arrière de l'appareil Transmetteur SITRANS P, série DS III, série Pression

L'utilisation de l'appareil se fait avec les touches [M], [↑] et [↓] (Figure IV.11).

Pour accéder à ces touches, dévisser les deux vis du couvercle de protection (3 ; Figure IV.11) et remontez ce dernier. Une fois l'intervention terminée, le couvercle doit être refermé.

L'appareil se trouve normalement dans le mode d'affichage des valeurs de mesure.

On peut sélectionner une option avec la touche [M] et modifier une valeur avec [↑] et [↓]. Actionnez une nouvelle fois la touche [M] pour valider l'option sélectionnée ou la valeur modifiée. Les exceptions à cette manière de procéder sont décrites dans les explications relatives aux différentes fonctions de l'appareil.

D'une manière générale, le réglage des valeurs numériques se fait toujours en partant de la position la plus faible encore affichée. En cas de dépassement dans le mode de répétition des touches, la position immédiatement supérieure est affichée et seule celle-ci continue d'être comptée. Ce procédé sert au réglage approché sur une large plage de valeurs. Pour le réglage fin, relâchez la touche ([↑] ou [↓]) souhaitée et actionnez-la de nouveau. Les dépassements de la valeur de mesure par le haut ou le bas sont signalés sur l'afficheur par ↑ ou ↓.

Pour l'utilisation du clavier, le verrouillage des touches doit être supprimé. Si on utilise le transmetteur en mode local, les tentatives d'écriture effectuées pendant ce temps via HART sont refusées mais la lecture de données, par ex. de valeurs de mesure reste toujours possible.

A. Afficheur numérique :

Un afficheur standard enfiché sert à l'affichage local de la valeur de mesure (Figure 13) avec l'unité (2), le signe (6), l'état (5, 7) et le mode (4). Le signe racine (3) est utilisé pour la variante "Pression différentielle et débit" de l'appareil.

Une communication active, par ex. avec un HART-Communicator, est signalée par le clignotement du témoin de communication (8).

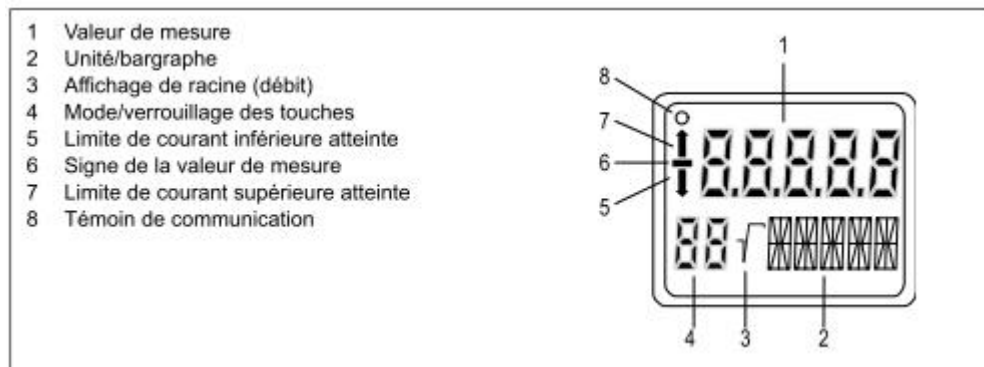


Figure IV.13: Composition de l'afficheur numérique.

B. Visualisation de la valeur de mesure

La représentation de la mesure indique, en fonction du réglage du client, le courant de sortie du transmetteur, le pourcentage de la valeur de mesure du mode de mesure réglé (niveau, débit etc.) relatif à l'étendue de mesure réglée ou la valeur de mesure exprimée en une unité physique sélectionnable.

Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII

Mode de fonctionnement	↑ (7, Figure 13)	↓ (5, Figure 13)
Mode 4 (réglage de l'amortissement)	lorsque la valeur est supérieure à la limite d'amortissement supérieure ¹⁾	Lorsque la valeur est inférieure à la limite d'amortissement inférieure ¹⁾
Mode 5 (réglage aveugle DM)	lorsque la valeur est supérieure à la limite supérieure du capteur ¹⁾	lorsque la valeur est inférieure à la limite inférieure du capteur ¹⁾
Mode 6 (réglage aveugle FM)	lorsque la valeur est supérieure à la limite supérieure du capteur ¹⁾	lorsque la valeur est inférieure à la limite inférieure du capteur ¹⁾
Mode 7 (correction de position)	en cas de dépassement de plus de 5% de la plage max., en cas de dépassement de la limite supérieure du courant	En cas de dépassement de la limite inférieure du courant
Mode 12 (point d'application de racine)	lorsque la valeur est supérieure au point d'application de racine de 15%	lorsque la valeur est inférieure au point d'application de racine de 5%
Utilisation du clavier (mode 2, 3, 5, 6)	lorsque l'étendue à régler est plus grande que l'étendue maximale	lorsque l'étendue à régler est plus petite que l'étendue minimale
Mode normal	Le courant est supérieur à la limite supérieure de saturation. La pression est supérieure à la limite supérieure du capteur.	Le courant est inférieur à la limite inférieure de saturation. La pression est inférieure à la limite inférieure du capteur.
Mode 2 (réglage D.M.*)	lorsque la valeur est supérieure à la limite de courant supérieure	lorsque la valeur est inférieure à la limite de courant inférieure
Mode 3 (réglage F.M.*)	lorsque la valeur est supérieure à la limite de courant supérieure	lorsque la valeur est inférieure à la limite de courant inférieure

Tableau IV .1 : de Signification des flèches

1) Pour la variable "Pression" de l'appareil

* DM = début de mesure, FM = fin de mesure

❖ Témoin de communication

Communication HART active.

C. Affichage de l'unité/bargraphe :

L'affichage de l'unité comprend cinq champs de 14 segments pour l'indication du type d'unité sous forme de pourcentage, d'unité physique ou de valeur électrique. Un bargraphe qui indique la valeur de mesure en pourcentage dans une plage de 0 à 100 % peut être affiché en alternance avec l'unité. Avec le réglage standard, la fonction "Bargraphe" est désactivée.

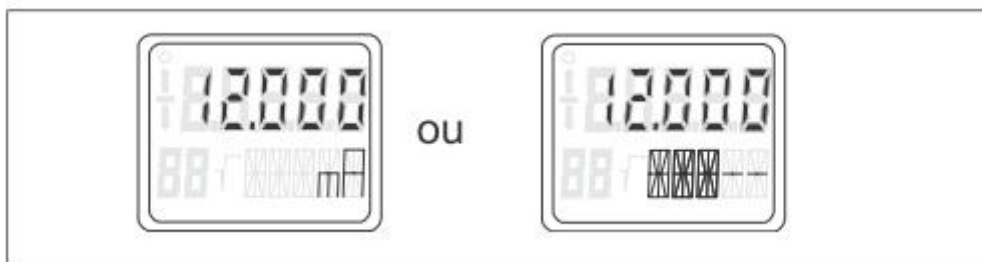


Figure IV.14 : Exemples d'affichages de valeur de mesure dans le mode d'affichage "Courant" et "Bargraphe"

Les deux messages suivants peuvent défiler à la dernière ligne de l'afficheur. Ils n'ont pas d'influence sur le courant de sortie.

Défiler à la dernière ligne de l'afficheur	Explications
DIAGNOSTIC WARNING	apparaît toujours, si un événement paramétré par l'utilisateur doit être affiché par un avertissement, comme par exemple : valeur limite atteinte/compteur d'événement pour valeurs limites dépassé, temps de calibrage écoulé, saturation de courant atteinte. De même, lorsque le statut d'une variable de l'appareil devient "UNCERTAIN"
SIMULATION	est affiché, quand la simulation d'une valeur de pression ou de température est active.

Tableau IV.2 : Affichage de l'unité

XIII. Définir/régler le début de mesure, la fin de mesure :

Avec les touches de commande, vous pouvez définir ou régler le début de mesure et la fin de mesure. Vous disposez à cet effet des modes 2 et 3.

Ceci permet de réaliser des caractéristiques croissantes ou décroissantes.

A. Explications théoriques

1. Entrer via consigne de pression

Lors de la définition, un début de mesure souhaité et/ou une fin de mesure souhaitée est affectée aux valeurs électriques standards (4 un/20 mA). Condition: Deux pressions de référence (pr1, pr2) fournies par le processus ou par un générateur de pression. Après la définition, il se peut que l'étendue de mesure indiquée sur la plaque du point de mesure ne corresponde plus au réglage.

Suivant la série et la plage de mesure, une démultiplication maximale de 1 à 100 (rapport de l'étendue de mesure = r, turn down) peut être obtenue.

Chapitre IV : Etude d'un capteur transmetteur de pression SIEMENS SITRANS P DSIII

Le rapport entre la pression mesurée et le courant de sortie produit est linéaire (exception: caractéristique avec extraction de racine carrée avec un transmetteur de pression différentielle). La formule ci-après (Figure 15) permet de calculer le courant de sortie.

I = courant de sortie
 p = pression

DM = début de mesure
FM = fin de mesure

$$I = \frac{p - DM}{FM - DM} * 16 \text{ mA} + 4 \text{ mA}$$

Figure IV.15: Formule de calcul du courant

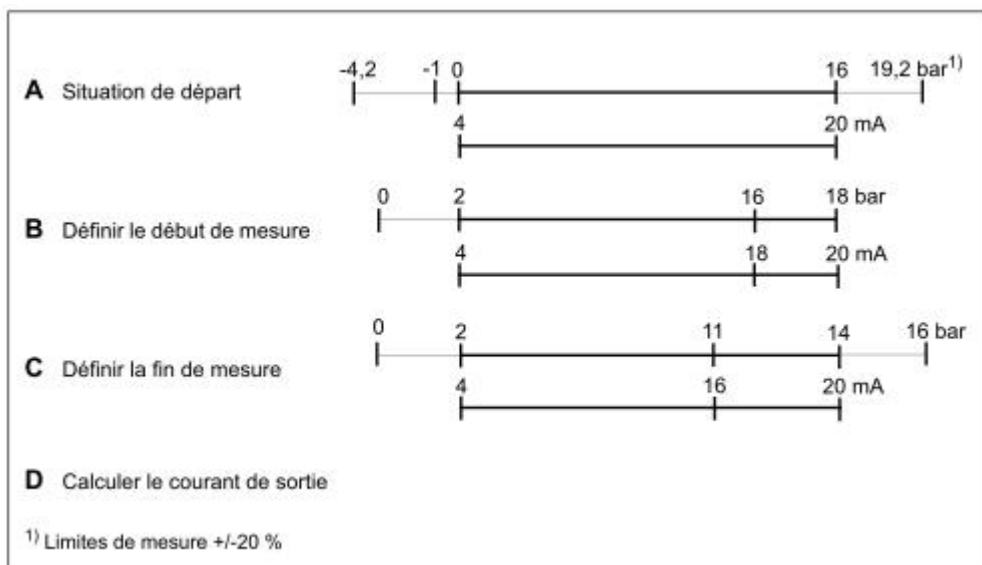


Figure IV.16 : Exemple, définir le début et la fin de mesure, calculer le courant de sortie

Explications de l'exemple:

A: La donnée est un transmetteur avec une étendue de mesure de 0 à 16 bar et des limites de mesure de -1 et 16 bar. Il doit être réglé sur une étendue de mesure de 2 à 14 bar.

B: Appliquer une pression de processus de 2 bars. Avec la touche de mode [M], mettre l'appareil dans le mode 2. L'afficheur indique en bas à gauche le mode spécifié. Définissez le début de mesure en appuyant pendant environ deux secondes sur les touches [↑] et [↓].

Lorsque la pression d'entrée est de 2 bars, un courant de sortie de 4 mA est maintenant produit.

C: Appliquer une pression de processus de 14 bars. Avec la touche de mode [M], mettre l'appareil dans le mode 3. Définir la fin de mesure en appuyant pendant environ deux secondes sur les touches [↑] et [↓]. Lorsque la pression d'entrée est de 14 bars, un courant de sortie de 20 mA est maintenant produit.

D: On peut calculer le courant de sortie à l'aide de la formule indiquée (Figure --) pour n'importe quelle pression d'entrée.

2. Régler avec l'aide d'une pression de référence :

Lors du réglage, on peut affecter une valeur de courant souhaitée, au début et/ou à la fin de la mesure, avec l'aide d'une pression de référence située à l'intérieur des limites de mesures. Cette fonction est particulièrement utile lorsque les pressions nécessaires pour le début de mesure et la fin de mesure ne sont pas disponibles. Après le réglage, il se peut que la plage de mesure indiquée sur la plaque du point de mesure ne corresponde plus au réglage effectué.

Conditions: La pression présente (pression de référence), le début de mesure réglé et la fin de mesure réglée sont connus.

Les formules ci-après (Figure 17) permettent de calculer le courant à régler pour le début de mesure et la fin de mesure souhaités.

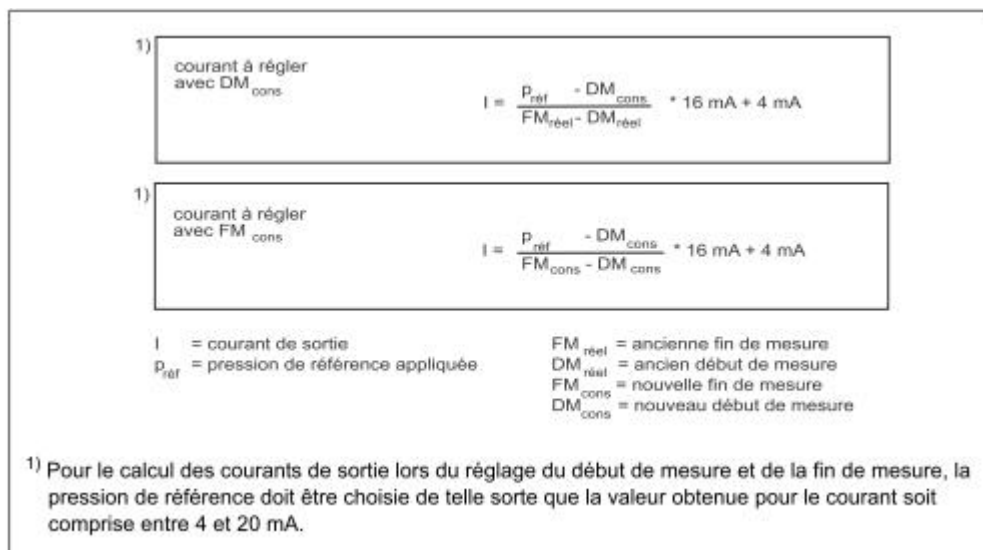


Figure IV.17 : Formules de calcul du courant (régler le début et la fin de mesure).

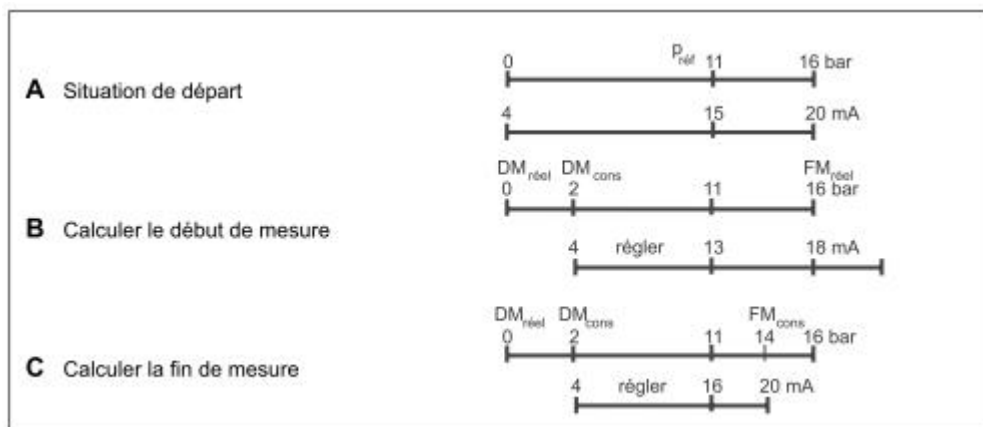


Figure IV.18 : Exemple, régler le début de mesure et la fin de mesure

Explications de l'exemple :

A: On dispose d'un transmetteur dont l'étendue de mesure est de 0 à 16 bars.

L'étendue de mesure doit être réglée sur 2 à 14 bars. On dispose d'une pression de référence de 11 bars.

B: Avec la touche de mode [M], mettez l'appareil dans le mode 2. A l'aide des formules (Figure 17), calculez d'abord le courant à régler pour le début de mesure souhaité (2 bars) avec la pression de référence puis réglez-le avec les touches [↑] ou [↓] (13 mA).

C: Avec la touche de mode [M], mettez l'appareil dans le mode 3. A l'aide des formules (Figure 17), calculez d'abord le courant à régler pour la fin de mesure souhaitée (14 bars) avec la pression de référence puis réglez-le avec les touches [↑] ou [↓] (16 mA).

XIV. Réglages

A. Définir le début de mesure et la fin de mesure :

L'appareil définit le courant de sortie pour le début de mesure à 4 mA et la fin de mesure à 20 mA lorsque vous actionnez les touches de commande de la manière suivante.

Pour définir le début de mesure:

- Appliquer la pression de référence ;
- Sélectionner le mode 2 ;
- Avec [↑] et [↓], mettre le début de mesure à 4 mA ;
- Mémoriser avec [M]

Pour définir la fin de mesure:

- Appliquer la pression de référence ;
- Sélectionner le mode 3 ;
- Avec [↑] et [↓], mettre la fin de mesure à 20 mA ;
- Mémoriser avec [M]

B. Régler le début de mesure et la fin de mesure :

Si le courant de sortie ne doit pas être défini mais réglé continuellement, on doit calculer mathématiquement les courants à régler. Un réglage peut être effectué pour le début de mesure, pour la fin de mesure ou pour les deux valeurs l'une après l'autre.

Pour régler le début de mesure:

- Appliquer la pression de référence ;
- Sélectionner le mode 2 ;
- Avec [↑] ou [↓], régler le courant de sortie du début de mesure ;

- Mémoriser avec [M]

Pour régler la fin de mesure:

- Appliquer la pression de référence ;
- Sélectionner le mode 3 ;
- Avec [↑] ou [↓], régler le courant de sortie de la fin de mesure ;
- Mémoriser avec [M].

Conclusion générale

Lors de cette étude que nous avons eu à mener, on a pu mettre l'accent sur les différents types de capteurs industriels de par leur principe physique et leurs caractéristiques spécifique.

Le monde industrielle de maintenant est régit par un contrôle minutieux des dispositifs d'où le rôle capital des capteurs qui trouvent plusieurs application dans divers domaines.

La conception de capteur nécessite toutes les ressources offertes par des disciplines scientifique et technique qui restent très variées.

Les capteurs ont plusieurs domaines d'application dont le plus distingué est l'industrielle. Néanmoins il est impossible d'ignorer le rôle des capteurs dans l'unité Linde Gas.

Raison pour laquelle les capteurs ont suscité notre attention pour ce travail afin de noter leurs performances et leurs utiles dans le monde actuel.

Bibliographie

1. Les capteurs en instrumentation industrielle Georges Asch et collaborateurs, Dunod 1995
2. Les capteurs, exercices et problèmes corrigés, Pascal Dassonville, Dunod 2005
3. traité de thermométrie par thermocouple et résistance TC S.A.
4. Asch Georges – les capteurs en instrumentation industrielle - édition Dunod, - 5^{ème} édition,1999
5. Charvin Bénédicte - Etude et Recherche DRA-14 : Évaluation des performances des dispositifs de prévention et de protection pour réduire les risques - mise en place d'une méthodologie pour structurer la collecte des données sur l'évaluation des performances des dispositifs de sécurité - application aux installations frigorifiques fonctionnant à l'ammoniac – 2001.
6. Techniques de l'ingénieur – Jean-Claude Godefroy - Article R2090 : Pressions rapidement variables.
7. Considine D.M., Process/Industrial Instruments and Controls Handbook, McGraw-Hill, New York, 1993.
8. Elwenspoek M., Wiegrink R., Mechanical Microsensors, Springer, Berlin, 2002.
9. Fraden J., Handbook of modern sensors : physics, designs and applications, Springer, Berlin, 1996.
10. Haudend D., Microcapteurs et Microsystèmes intégrés, Hermès, Paris, 2000.
11. Middelhoek S., Audet S.A., Silicon Sensors, Academic Press, Londres, 1991.
12. Robert M., Marchandiaux M.,Porte M., Capteurs intelligents et méthodologie d'évaluation, Hermès, Paris, 1993.
13. Sze S. et al., Semiconductor Sensors, John Wiley & Sons, New York, 1994.
14. F.Baudoin, M.Lavabre – Capteurs: principes et utilisations, Castella 2008