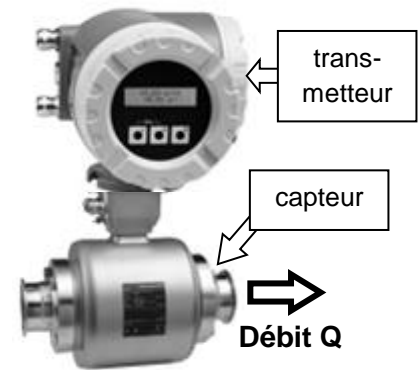


Exercice n°1 : débitmètre *

La mesure du débit d'une station de pompage est confiée à un débitmètre électro-magnétique Promag 50H Endress+Hauser (photo ci-contre). Un extrait de documentation technique est fourni en annexe.

Le capteur est inséré le long de la conduite PVC de refoulement, son orifice est de section égale à celle de la conduite, à savoir qu'il a un diamètre intérieur $D = 50 \text{ mm}$. Le débit est prévu fluctuer entre 4 et 10 m^3/h . On souhaite dans le pire des cas une précision supérieure à 1%.



Le débitmètre renvoie l'information "débit Q " sur une sortie 4 - 20 mA.

Cette information sera ensuite récupérée par une entrée analogique de l'automate après conversion en une tension V_Q comprise entre 0 et 10 V, conformément à la figure 1.

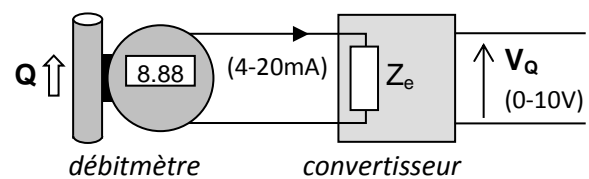


figure 1

Le convertisseur 4 - 20 mA a une impédance d'entrée $Z_e = 500 \Omega$.

- 1) Déterminer la plage de débit mesurable par l'appareil et justifier son choix.
- 2) Calculer la tension maximale fournie par la sortie 4 - 20 mA du débitmètre. Cette valeur est-elle compatible avec les spécifications du constructeur du débitmètre ?
- 3) Calculer le facteur K_D tel que $\frac{dV_Q}{dQ} = K_D$, sachant que le débitmètre peut renvoyer une valeur de Q au maximum égale à $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Préciser son unité.
- 4) Donner la précision et la précision relative du capteur en m^3/h . Conclusions.

Exercice n°2 : anémomètre *

Un store automatique a besoin de mesurer la vitesse du vent afin de se replier automatiquement dès que le vent dépasse une certaine valeur afin d'éviter l'arrachement. L'anémomètre utilisé est composé d'une étoile à 3 branches à godets et d'un photo-détecteur à occultation. On souhaite pouvoir mesurer des vitesses allant de 1 à 20 m/s.

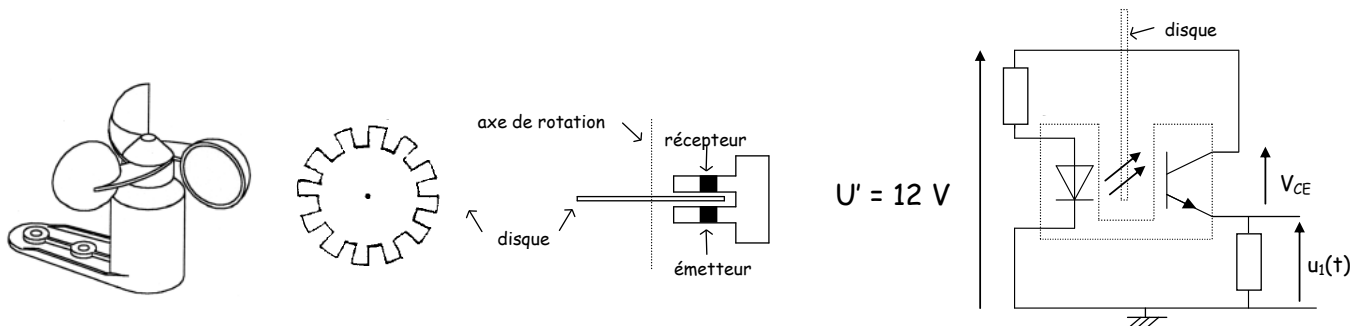


Figure 1

L'axe de rotation de l'étoile est solidaire d'un disque à 12 encoches placé entre un émetteur à infrarouge à DEL et un récepteur. Le phototransistor fonctionne en régime de commutation et on prendra $V_{CE \text{ saturation}} = 0$.

Génération du signal

1. Quelles sont les deux valeurs possibles de la tension u_1 ? Justifier votre réponse en précisant l'état du transistor dans chacun des cas.
2. Quelle est la valeur de u_1 lorsque le faisceau infrarouge est occulté ?

Le constructeur de l'anémomètre donne la vitesse de rotation n du disque en fonction de la vitesse du vent v en figure 2. La tension $u_1(t)$ est représentée en fonction du temps sur 2 périodes en figure 3.

3. Donner l'expression de la vitesse du vent v en fonction de la période T de $u_1(t)$. En déduire la vitesse du vent (en km/h) correspondant au relevé de la figure 3.

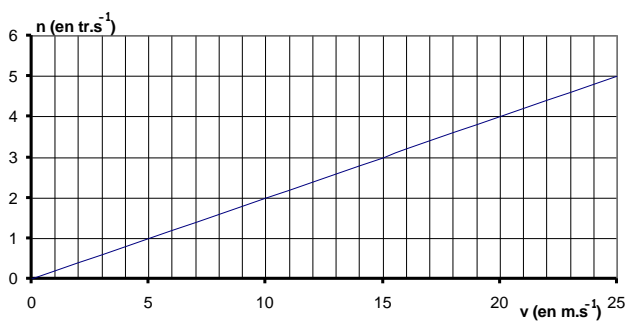


Figure 2

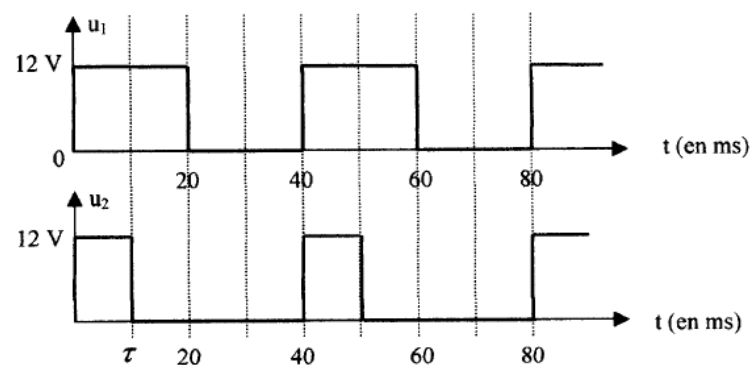


Figure 3

Conversion fréquence tension

On applique la tension $u_1(t)$ à un monostable. Un monostable est un composant qui lorsqu'il reçoit une impulsion, donne en sortie un signal à l'état haut pendant une durée fixe, puis le signal de sortie repasse à 0 jusqu'à la nouvelle impulsion.

4. Avec le montage monostable présent, donner la vitesse maximale du vent qui peut alors être mesurée.
5. Donner l'expression de $\langle u_2(t) \rangle$ en fonction de la période de u_1 . En déduire l'expression de $\langle u_2(t) \rangle$ en fonction de la vitesse du vent.
6. Quel montage devrait-on placer derrière le monostable afin de pouvoir exploiter le signal sur l'entrée analogique d'un microcontrôleur. Vous en donnerez les caractéristiques.

Exercice n°3 :*

Un capteur de niveau pour une cuve à huile est réalisé à l'aide d'un condensateur cylindrique.

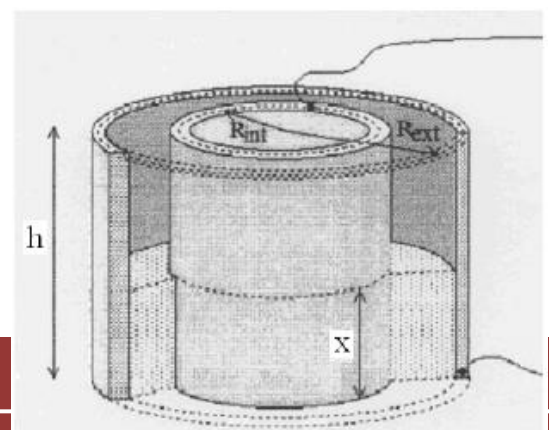


figure de principe
proportion non respectée

Celui-ci est constitué d'un tube dont la face interne réalise l'armature extérieure du condensateur, de rayon $R_{\text{ext}} = 10 \text{ mm}$, entourant une barre réalisant l'armature intérieure du condensateur, de rayon $R_{\text{int}} = 5 \text{ mm}$.

La hauteur totale du système est $h = 1 \text{ m}$. Le capteur est positionné verticalement le long de la cuve de sorte qu'il plonge dans l'huile. La hauteur d'huile dans la cuve correspond à la partie immergée du capteur, soit x .

La capacité d'un condensateur cylindrique de longueur L et dont l'isolant placé entre les armatures a une permittivité électrique ϵ est donnée par :

$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln\left(\frac{R_{\text{ext}}}{R_{\text{int}}}\right)}$$

La permittivité relative de l'huile de la cuve est $\epsilon_r = 4$, la permittivité de l'air au-dessus de l'huile est $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$.

1- Déterminer l'expression de la capacité totale du capteur en fonction du taux de remplissage x/h (où x est la hauteur d'huile dans la cuve) sous la forme $C(x) = C_0 (1 + Kx)$ où $C_0 = C(x=0)$.

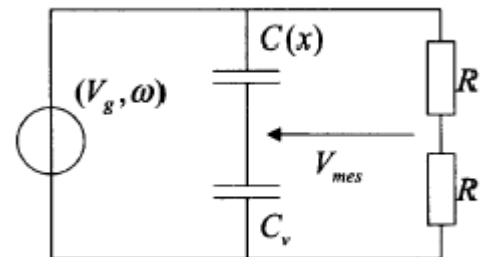
Définir et déterminer la sensibilité du capteur S_c .

2- Calculer la capacité minimale C_{min} et la capacité C_{max} du capteur. Calculer les impédances correspondantes pour une fréquence de mesure $f = 10 \text{ kHz}$.

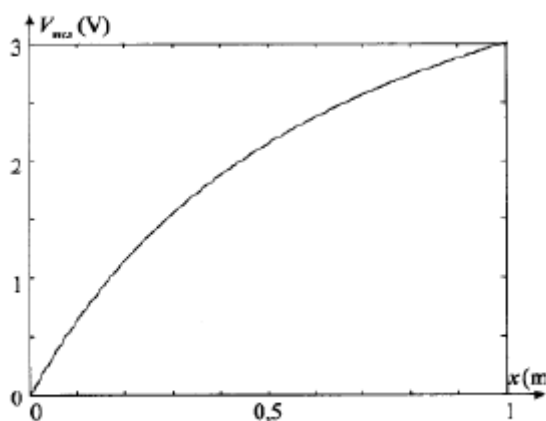
Conditionnement du capteur capacitif

Le capteur est monté dans un circuit en pont où le condensateur C_v est ajusté par étalonnage à la valeur C_0 lorsque $x = 0$.

Le générateur fournit une tension sinusoïdale de valeur efficace $V_g = 10 \text{ V}$ à la fréquence $f = 10 \text{ kHz}$.



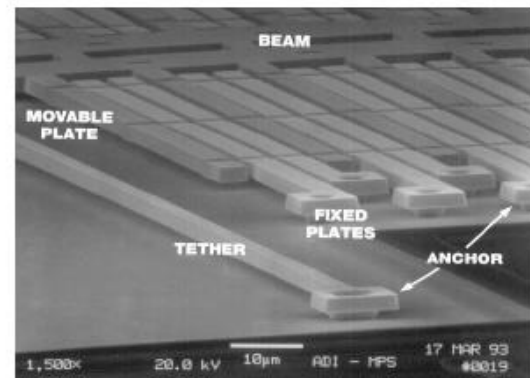
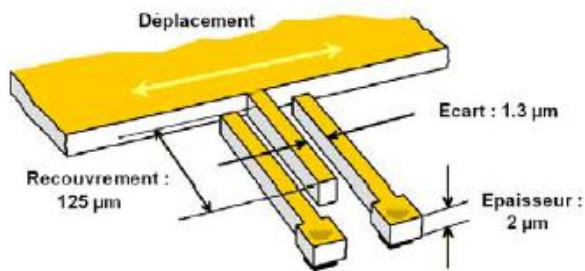
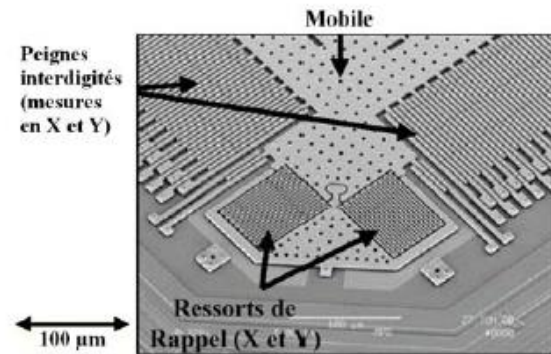
3- Déterminer l'expression de la tension de mesure V_{mes} en fonction de la hauteur x . Le système de mesure est-il linéaire ? Vérifier la compatibilité de votre résultat avec la courbe d'étalonnage fournie.



Courbe d'étalonnage du capteur

Exercice n°4: étude d'un accéléromètre utilisé pour le contrôle des airbags***

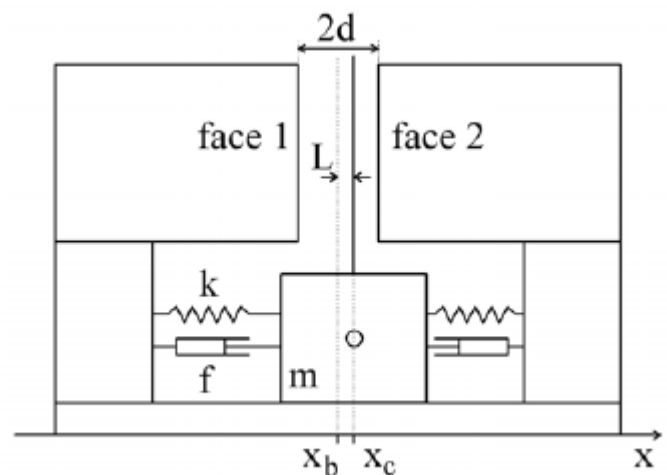
L'accéléromètre étudié ADXL103 est un MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems), incluant le capteur complété de son électronique de conditionnement. Ce composant est sensible à l'accélération projetée sur une direction (on dit 1D). Des capteurs 2D de cette famille équipent par exemple des déclencheurs d'airbag automobile. Coût unitaire : 8 \$ par 1000 à 5000 pièces (rentrée 2006).



Etude mécanique du fonctionnement d'un capteur 1 axe

Le capteur différentiel est modélisé par un simple mobile de masse m posé sur un support horizontal et pouvant se déplacer le long de l'axe des x . Le mobile est relié au support par des systèmes ressorts/amortisseurs décrivant le comportement mécanique des éléments du MEMS (raideur k , coefficient de frottement f).

On note x_c la position du centre de masse du mobile en mouvement et x_b sa position au repos par rapport au support (c'est à dire en fait celle du support : x_b ne varie que si le support se déplace, c'est à dire si l'accéléromètre se déplace en bloc).



Ce mobile subit les effets de l'accélération $a(t)$ du support : le rôle de ce système est de permettre la mesure de cette accélération $a(t)$.

Il faut donc ne pas confondre l'accélération a du support par rapport au sol et celle de la masse mobile par rapport au sol a_c .

1- Faire sur un schéma l'analyse des forces appliquées au mobile ; dans ce modèle, il n'y a pas de frottement entre la partie horizontale du support et le bas de la partie mobile.

2- Ecrire l'équation de mouvement du centre de masse de la partie mobile sous l'action des forces qui lui sont appliquées

3- En déduire la relation entre le déplacement $L = x_c - x_b$ et l'accélération $a = \frac{d^2 x_c}{dt^2}$.

4- Donner alors la fonction de transfert $H(j\omega) = \frac{L}{a}$. Donner l'expression de la pulsation propre ω_0 .

5. Quelle condition doit-on avoir sur l'accélération afin que la mesure de $L(t)$ permette d'avoir une simple image de l'accélération ?

6. Lire sur la doc technique de l'accéléromètre la valeur de f_0 . En déduire la valeur maximale de la bande passante du capteur et la relation entre $L(t)$ et $a(t)$ en régime permanent.

Etude du conditionnement électronique du capteur

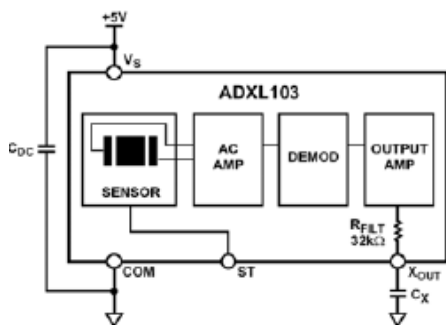


Schéma-bloc de l'accéléromètre ADXL103

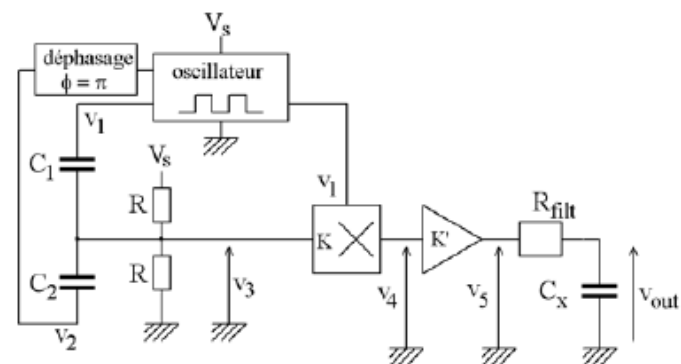


schéma d'interprétation détaillé selon le fichier de données ADXL103

Le composant est alimenté de façon asymétrique entre 0V et + 5 V : les tensions intervenant dans le fonctionnement du circuit devront donc être positives.

Transduction du déplacement par un pont capacitif en modulation

Comme le montre le schéma de modélisation initial, le mobile est solidaire d'une lame pouvant donc se déplacer entre les faces 1 et 2.

Les paires de faces en regard définissent deux condensateurs C_1 et C_2 de capacités dépendant de L (en réalité les photographies en microscopie électronique montrent qu'il s'agit de séries de micro-lamelles).

L'oscillateur génère un signal carré d'horloge à une fréquence $f_n = 140$ kHz, représentée par la tension $v_1(t)$. D'origine numérique, il est positif. De niveau haut V_s et de niveau bas 0 V, il a une moyenne égale à $V_s / 2$. La tension v_2 est obtenue par inversion logique, ce qui revient à décaler v_1 d'une demi-période.

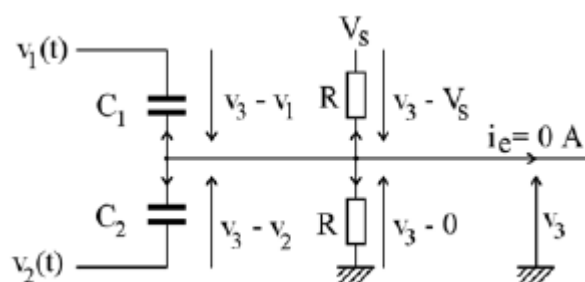
On suppose de plus que seuls les effets du premier harmonique seront effectifs, de sorte que :

$$v_1 = \frac{V_s}{2} + V_1 \sin \omega t \quad \text{et} \quad v_2 = \frac{V_s}{2} - V_1 \sin \omega t.$$

On verra en effet plus loin que la dernière étape est un filtrage passe-bas qui élimine toutes les composantes de pulsation supérieure ou égale à ω . Les autres harmoniques ne donneraient donc que des termes correctifs qui seraient éliminés dans le calcul.

On suppose que le courant d'entrée du multiplieur d'amplification K est négligeable du fait d'une forte impédance d'entrée, soit $i_e = 0$ A.

Les deux résistances R forment un pont de polarisation et ont pour objet d'établir la tension de mode commun $V_s / 2$.



7- Etablir l'équation différentielle suivie par la tension v_3 . Donner sa constante de temps.

8. Les constructeurs automobiles veulent que les airbags soient déployés en environ 100 ms. Ils imposent alors un temps de réponse limite pour le seul capteur de 5 ms. En déduire une condition à respecter sur les composants.

9- Donner à priori la forme de la solution générale.

10. Déterminer l'expression du régime permanent de v_3 . (on pourra utiliser les nombres complexes)

Remarque : la constante du régime transitoire resterait à déterminer à partir de la condition initiale sur v_3 ; mais cela n'a cependant pas d'importance car après au plus 5 ms, le transitoire est terminé puisque le terme exponentiel décroît rapidement vers 0 : v_3 est alors en régime permanent et A est éliminé du calcul.

11. Après avoir constaté que $\omega \cdot \tau \gg 1$, donner l'expression simplifiée du régime permanent de v_3 .

Relation entre les capacités et le déplacement L

Le suivi du déplacement est assuré par un capteur capacitif organisé autour de séries de lamelles en regard, solidaires pour moitié du bâti et pour moitié de la masse mobile. De façon générale on qualifie d'IDT (pour InterDigital Transducer) cette structure particulière en forme de « peignes » digités interpénétrés (allusion aux doigts des mains). La multiplicité de ces lamelles améliore évidemment la sensibilité de la mesure.

Au vu des lamelles, on suppose que les condensateurs C_1 et C_2 du modèle sont donc considérés comme des condensateurs plans. La formule de la capacité est alors la suivante :

$C \approx \frac{\epsilon \cdot S}{e}$ où S est la surface en vis-à-vis, ϵ la perméabilité du vide, e la distance entre la face en question et le mobile. $e_1 = d + L$, $e_2 = d - L$

12. Calculer l'expression de $v_3(t)$ en fonction de L .

Conditionnement du pont capacitif

Le capteur doit fournir en sortie une tension continue image de l'accélération. A l'issue du pont capacitif, nous avons une tension sinusoïdale dont l'amplitude est proportionnelle à l'accélération.

Une première solution aurait été de redresser cette tension sinusoïdale et de la filtrer. Cependant, on aurait perdu l'information de signe de l'accélération. Un autre procédé a été choisi : la démodulation synchrone.

13. Donner l'expression de v_4 issue du multiplieur.

Après le multiplicateur, le signal est amplifié d'une valeur K' afin de pouvoir fournir suffisamment de courant.

14. Donner l'expression de $v_5(t)$.

15. Quel type de filtrage est réalisé par R_{filt} et C_x ? Quel est son rôle ? En déduire une condition sur C_x .

16. En fait, pour réduire le bruit sur le signal de sortie, on choisit une bande passante largement plus faible. On désire avoir une fréquence de coupure à 200 Hz, calculer alors la valeur de C_x à insérer.

17. Donner alors l'expression de la tension V_{out} sous la forme : $V_{\text{out}}=V_0+S.a$

18. Sur la doc technique, retrouver les valeurs numériques de V_0 et S . Quels paramètres de la chaîne de conditionnement ont permis de régler ces valeurs de V_0 et S .

19. Donner l'étendue de mesure du capteur. En déduire les tensions minimales et maximales de V_{out} .

Extrait fiche technique

débitmètre promag 50H



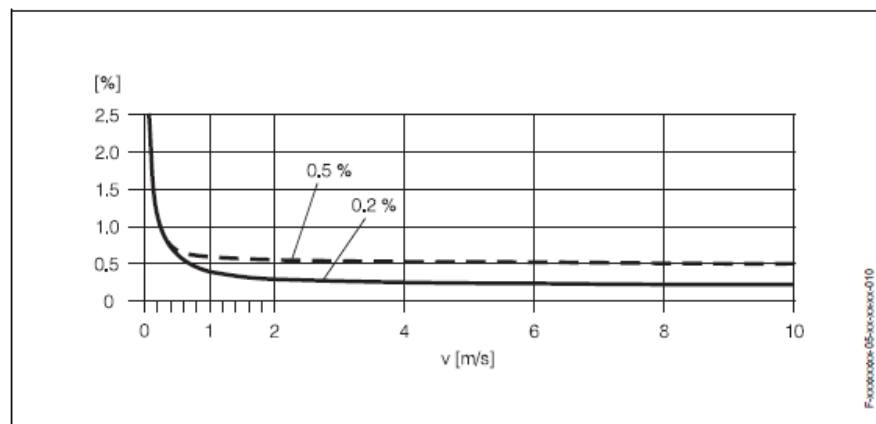
Grandeurs d'entrée

Grandeur de mesure	Vitesse d'écoulement (proportionnelle à la tension induite)
Gamme de mesure	Typique $v = 0,01...10$ m/s avec la précision de mesure spécifiée
Dynamique de mesure	Supérieure à 1000 : 1
Signal d'entrée	Entrée état (entrée auxiliaire) : $U = 3...30$ V DC, $R_i = 5$ k Ω , séparation galvanique. Configurable pour : remise à zéro du/des totalisateur(s), suppression de la mesure, remise à zéro des messages défaut, démarrer/stopper un dosage.

Grandeurs de sortie

Signal de sortie	Promag 50 Sortie courant : actif/passif au choix, séparation galvanique, constante de temps au choix (0,05...100 s), fin d'échelle réglable, coefficient de température : typ. 0,005% de m./°C; résolution : 0,5 μ A <ul style="list-style-type: none"> actif : 0/4...20 mA, $R_c < 700$ Ω (pour HART : $R_c \geq 250$ Ω) passif : 4...20 mA, max. 30 V DC, $R_i \leq 150$ Ω Sortie impulsions/fréquence : passif, collecteur ouvert, 30 V DC, 250 mA, séparation galvanique. <i>Sortie fréquence</i> : fréquence finale 2...1000 Hz ($f_{max} = 1250$ Hz), rapport impulsion/pause 1:1, largeur des impulsions max. 10 s <i>Sortie impulsions</i> : valeur des impulsions au choix, largeur max. des impulsions réglable (0,05...2 s), fréquence d'impulsion max. au choix
-------------------------	---

Incertitude de mesure	Promag 50 : Sortie impulsions : $\pm 0,5\%$ de m. ± 1 mm/s (de m. = de la mesure) Sortie courant : en plus typique ± 5 μ A Promag 53 : Sortie impulsions : $\pm 0,2\%$ de m. ± 2 mm/s (de m. = de la mesure) Sortie courant : en plus typique ± 5 μ A Les fluctuations de la tension d'alimentation n'ont aucun effet à l'intérieur de la gamme spécifiée.
------------------------------	--



Incertitude de mesure en [%] de la mesure