

PARTIE B

Etude d'un ensemble capteur-transmetteur « HART » (Highway Addressable Remote Transducer)

Les techniques numériques permettent d'obtenir des instruments de mesure industrielle appelés capteurs-transmetteurs (ou tout simplement transmetteurs) ayant des performances remarquables, au point de les qualifier parfois du terme : transmetteur « intelligent ».

Le schéma fonctionnel d'un tel dispositif peut être représenté par celui de la figure 10.

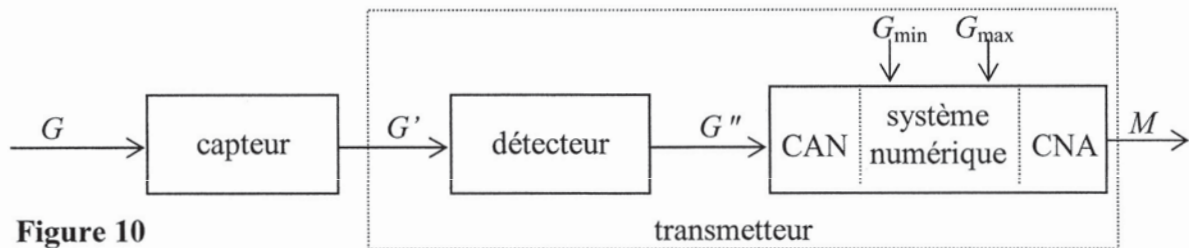


Figure 10

G = grandeur primaire à mesurer (par exemple une température).

G' = grandeur « image » plus facile à mesurer (par exemple une résistance).

Le détecteur peut alors être un pont de mesure.

G'' = grandeur « image » secondaire électrique (par exemple une tension de déséquilibre).

M = signal de mesure normalisé (par exemple un courant d'intensité 4 à 20 mA) .

Pendant longtemps le dispositif numérique à base de microprocesseur a eu pour fonction essentielle de permettre d'obtenir une bonne linéarité (sensibilité constante) entre les variations de G et celles du signal de mesure M (par mise en mémoire ROM des tables d'étalonnage des thermocouples par exemple). La puissance des processeurs actuels permet de sous-traiter au transmetteur des fonctions autrefois dévolues à l'instrument utilisateur du signal M .

1 Fonction filtrage numérique

On se place en sortie du convertisseur analogique numérique (CAN), la suite des échantillons successifs x_n étant placée dans une pile FIFO (First In, First Out). On suppose remplies les conditions de SHANNON avec une fréquence d'échantillonnage $F_e = 50 F_s$, F_s étant la fréquence de coupure du filtre anti-repliement à l'entrée du CAN.

Pour permettre un bon rapport signal/bruit (bruit, parasites,..) on améliore le signal par deux traitements essentiels (voir figure 11) :

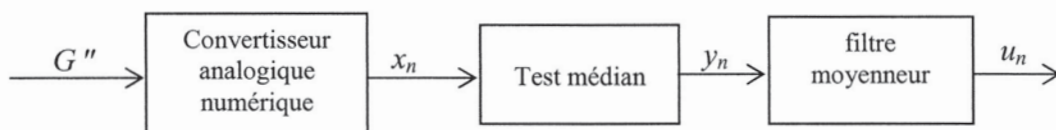


Figure 11

Un traitement classique utilise un filtre moyennneur. De plus en plus on y rajoute un pré-traitement par test médian.

a) Etude du test médian

Les échantillons successifs sont stockés dans une pile FIFO, généralement réalisée par un tableau comportant $2p+1$ cases (voir figure 12)

Ce tableau (T) est dupliqué dans un second tableau (T') dans lequel est effectué le test médian.

Ce test consiste à rechercher la valeur médiane x_m de l'ensemble glissant du tableau (T'), après l'avoir ordonné par valeurs croissantes.

Le traitement peut se résumer ainsi :

$$\{x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{2p+1}; p \geq 1\} \\ \rightarrow \{x'_1, \dots, x'_i, x'_{i+1}, \dots, x'_{2p+1}; x'_i \leq x'_{i+1}\}$$

On prélève alors $x_m = x'_p$

On se propose de caractériser ce type de traitement.

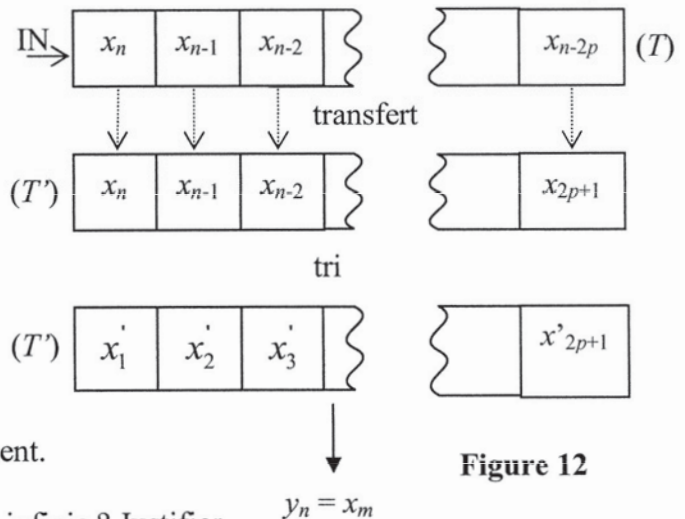


Figure 12

Q46 La réponse impulsionnelle est-elle finie ou infinie ? Justifier.

Q47 A chaque échantillonnage, la valeur la plus ancienne x_{n-2p} est éliminée et, après transfert dans (T'), il faut retrier ce dernier tableau, avec prise en compte de la nouvelle valeur acquise x_n . Citer le nom d'un algorithme de tri possible. Quel est le plus rapide ?

Q48 On suppose $x(t)$ initialement nul (ou constant). On se donne alors pour $x(t)$, à l'entrée du CAN, une impulsion rectangulaire de durée τ . Exprimer en fonction de p et de T_e (période d'échantillonnage) la durée maximale τ_m que doit avoir cette impulsion pour être éliminée.

Que se passe-t-il si $\tau > \tau_m$? Justifier.

Q49 Ce test mérite-t-il le nom de filtre en fréquence, au sens usuel du terme ? Justifier.

Q50 Ce « filtre » est-il linéaire ? Justifier.

Q51 Est-il stationnaire ? Justifier.

Q52 Est-il causal ? Justifier.

Q53 Est-il stable ? Justifier.

Q54 Quel peut être l'utilité de ce test, avant le filtre moyennneur suivant ?

b) Etude du filtre moyennneur (à moyenne glissante)

Les échantillons successifs $x_m = x'_p$ que l'on nommera désormais y_n , sont stockés dans une autre pile FIFO, réalisée par un tableau à N cases (N entier). Le filtre réalise la moyenne arithmétique des N échantillons (voir figure 13).

La grandeur de sortie du filtre s'écrit :

$$u_n = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} y(n-k)$$

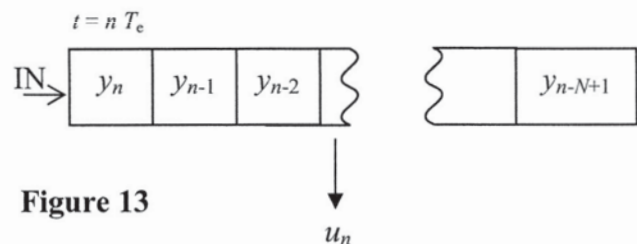


Figure 13

Q55 A partir de la relation précédent, valable quelque soit n , établir la relation entre les séquences d'échantillons $\{u(nTe)\}$ et $\{y(nTe)\}$.

Q56 On note $U(z)$ la transformée en z de la séquence $\{u(nTe)\}$ et $Y(z)$ celle de la séquence $\{y(nTe)\}$. En déduire l'expression de $U(z)$ en fonction de $Y(z)$.

Q57 Utiliser la relation précédente pour déterminer la fonction de transfert $H(z)$ de ce filtre, sous forme d'un polynôme en puissance de z^{-1} .

$$H(z) = \frac{U(z)}{Y(z)}$$

Q58 Ce filtre numérique est-il à réponse impulsionnelle finie ou infinie ? Est-il stable ? Justifier.

Q59 En utilisant la propriété de la somme des N premiers termes d'une suite géométrique, écrire $H(z)$ sous forme d'une fraction rationnelle en z^{-1} .

Q60 Cette seconde écriture de $H(z)$ conduit-elle à un filtre récursif ? Si oui, fournir l'équation récurrente correspondante.

Q61 Les applications les plus anciennes utilisaient cette équation récurrente, pour des raisons de rapidité de calcul. Pourquoi cette forme récursive ne posait-elle pas de problème de stabilité ?

Q62 On reprend la seconde expression de $H(z)$ et on rappelle que :

$$z^{-1} = e^{-Te j \omega} \text{ avec } \omega = 2 \pi F. \text{ On pose } \nu = \frac{F}{Fe} = \text{fréquence réduite avec } Fe = \frac{1}{Te}.$$

Montrer que la fonction de transfert isochrone $H(j\nu)$ peut se mettre sous la forme :

$$H(j\nu) = G(j\nu) \cdot \frac{\sin(\pi N \nu)}{\sin(\pi \nu)}$$

Fournir l'expression de $G(j\nu)$.

Q63 Compte tenu de la fréquence maximale F_s admise par le filtre antirepliement et sachant que le CAN travaille à $Fe = 50 F_s$, déterminer un équivalent au rapport :

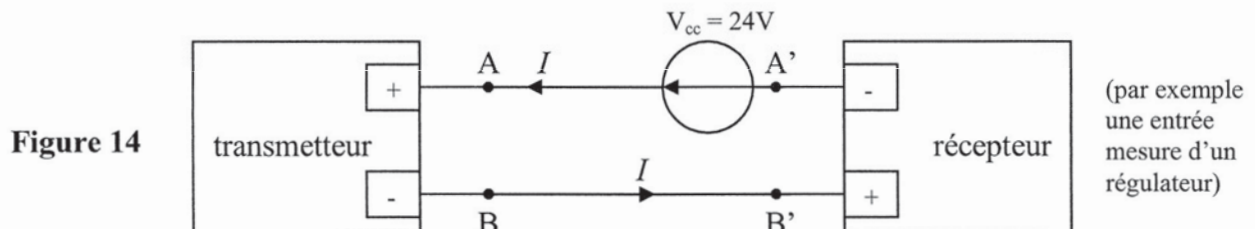
$$\frac{\sin(\pi N \nu)}{\sin(\pi \nu)} \text{ pour } N = 5.$$

Comment se simplifie alors l'expression de $H(j\nu)$? A quoi est-ce assimilable ?

Q64 Rappeler l'intérêt d'un filtre moyenneur.

2 Fonction communication HART

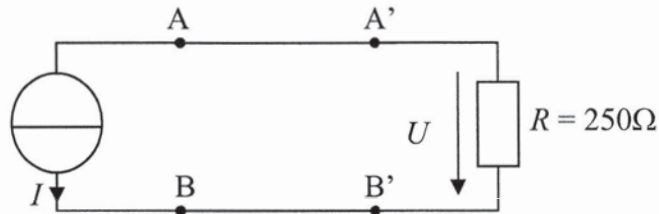
Le schéma de câblage d'un transmetteur dit à montage « 2 fils », au standard 4-20 mA, est représenté à la figure 14. L'intérêt de ce montage 2 fils est que le transmetteur peut être installé en zone déflagrante (explosive), l'alimentation V_{cc} et le récepteur étant en armoire technique.



Ce transmetteur 2 fils se comporte comme une source de courant, câblée en convention de récepteur, l'alimentation énergétique de la boucle de courant nécessitant une alimentation continue extérieure, usuellement de 24V. Dans la pratique l'électronique du transmetteur est alimentée par le

talon de 4 mA qui circule en permanence dans la boucle. Le schéma équivalent de ce montage (lorsque I varie) peut donc être représenté par la figure 15 où la courant d'intensité I délivré par le transmetteur varie conformément à la caractéristique statique (voir Partie A). L'appareil récepteur transforme cette intensité en une tension U variant de 2 à 10V, si $R = 250 \text{ ohms}$.

Figure 15

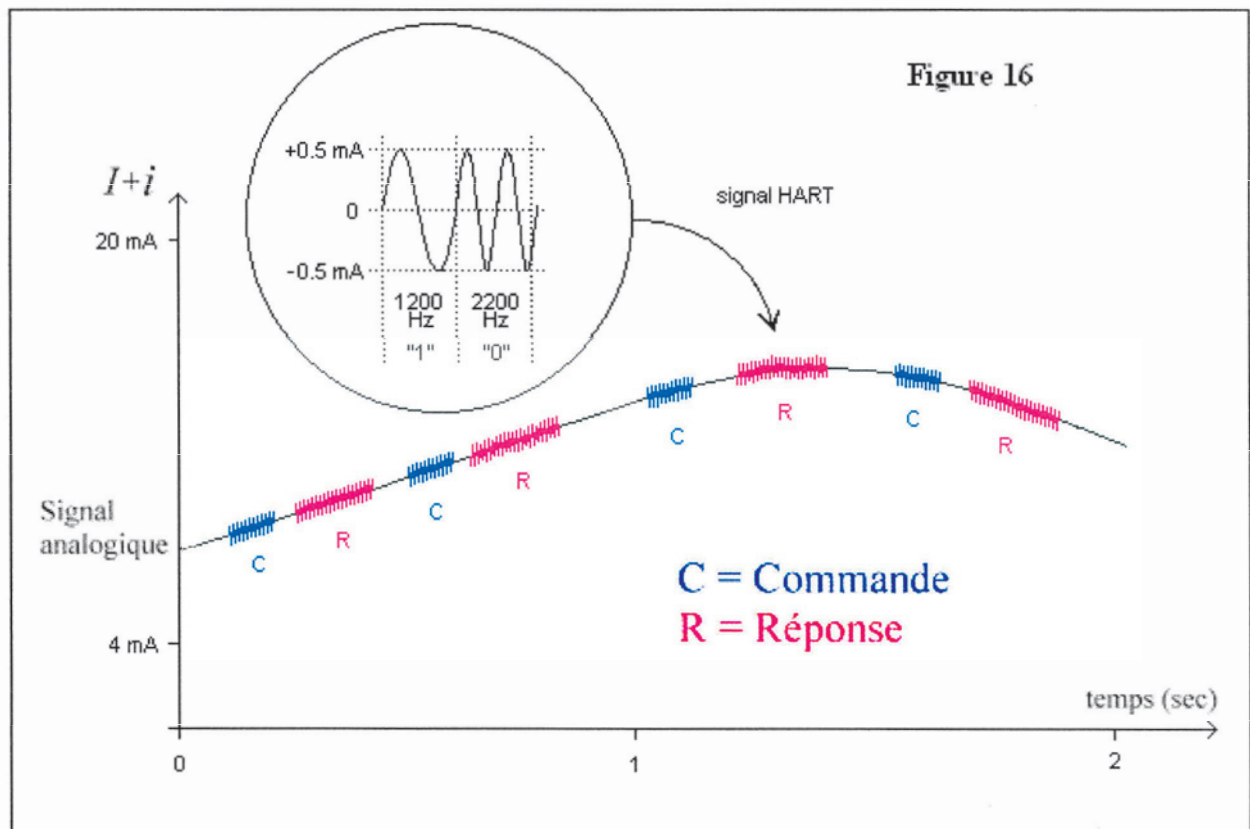


Principe de la communication HART

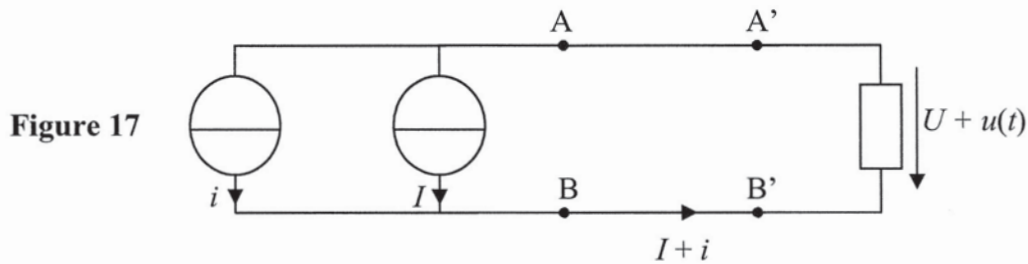
Les transmetteurs modernes sont désormais « compatibles HART », selon une normalisation qui permet de superposer au signal continu I (image de G) un signal de modulation numérique, véhiculé par les 2 fils de connexions déjà présents (voir figure 16). Sans entrer dans le détail du protocole de communication bidirectionnel, on retiendra que le récepteur a l'initiative de commandes permettant :

- une configuration à distance
- des diagnostics et vérifications du transmetteur
- un envoi numérique de la mesure (permettant de confirmer la valeur transmise analogiquement par le courant d'intensité I).

Le transmetteur retourne toujours une réponse après toute commande.



On se propose essentiellement d'étudier la couche physique de cette modulation numérique (sous forme simplifiée). Tout se passe comme si on pouvait modifier le schéma équivalent par celui de la figure 17.



Un modem superpose un signal sinusoïdal d'amplitude $i_{\max}=0,5$ mA au signal d'instrumentation I . Par souci de simplification on évoquera une réponse du transmetteur.

Modulation numérique

Les informations émises se font sous forme de trames, comportant de nombreux octets, chaque bit étant émis pendant une durée T_B (fréquence binaire $F_B = \frac{1}{T_B}$). Cette liaison de type asynchrone s'effectue classiquement selon la séquence : 1 START BIT + informations + 1 BIT de parité + 1 STOP BIT. Les octets transmis comportent des séquences supposées parfaitement aléatoires.

Modulation FSK

Le modem émet un signal FSK NRZ pour lequel un « 1 » est codé par un signal sinusoïdal de fréquence $F_1=1200$ Hz et un « 0 » par un signal sinusoïdal de même amplitude et de fréquence $F_0=2200$ Hz, avec une fréquence binaire $F_B = 1200$ bit/s (voir figure 16).

Q65 Rappeler la signification concrète des acronymes FSK puis NRZ.

Q66 Compte tenu de hypothèses émises, justifier pourquoi on peut considérer que cette modulation ne perturbe pas la valeur de la mesure transmise analogiquement par le courant d'intensité I .

Q67 La modulation FSK peut être avec ou sans cohérence de phase. Rappeler la définition d'une modulation sans cohérence de phase.

Q68 Enoncer l'inconvénient principal de cette absence de cohérence de phase.

Q69 Le modem HART travaille en cohérence de phase (voir figure 16).

Quel dispositif électronique permet d'obtenir une cohérence de phase ?

Q70 Quelle en est la répercussion sur le spectre en fréquence du signal obtenu ?

Q71 On pose : $F_0=F_C + \Delta F$ et $F_1=F_C - \Delta F$

Pourquoi utilise-t-on l'indice c dans la notation F_C ? Déterminer numériquement F_C et ΔF .

Choix de l'indice de modulation m

Q72 On rappelle que pour une modulation FSK l'indice de modulation m s'exprime par :

$$m = \frac{2\pi \Delta F}{2\pi \frac{1}{2T_B}} \text{ soit } m = 2 \Delta F T_B$$

Compte tenu des données, déterminer la valeur numérique de l'indice de modulation HART.

Q73 Pour choisir le meilleur indice de modulation, il faut chercher un compromis entre la probabilité d'erreur à la réception et la largeur spectrale rassemblant 95 % de la puissance. La probabilité d'erreur à la réception est minimale pour $m = 0,715$ tandis que la largeur spectrale la plus étroite est obtenue pour $m = 0,64$.

Compte tenu de la valeur de m , quel aspect a-t-on privilégié ?

Vérification expérimentale

On trouvera figure 18 (annexe 2) une représentation de la densité spectrale de puissance, pour un signal numérique à deux niveaux modulé en fréquence, pour différentes valeurs de m .

La figure 19 (annexe 2) fournit la densité spectrale de puissance observée expérimentalement (en bas) puis ajustée à 0 dB (en haut) pour les pics du lobe principal.

Q74 Peut-on confirmer la valeur de m ? Justifier.

Q75 Quelle est la valeur de l'encombrement spectral utile relevé expérimentalement ?

Q76 Que vaut l'atténuation des lobes latéraux ?

Une application pratique sera un transmetteur de pression différentielle utilisé dans la partie C, élaborant un signal image de la différence de pression entre une chambre dite haute pression (HP) et une chambre dite basse pression (BP) représenté à la figure 20.

Notes : PDT = « Pressure Differential Transmitter ».

Un trait plein indique une connexion avec le procédé.

Un trait pointillé indique un signal normalisé (4-20 mA).

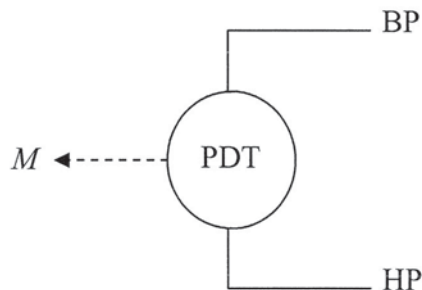


Figure 20