

Corrigé de l'Examen

Capteurs Intelligents et Instrumentation Industrielle (M1 : ESE)

Correction Question 1 : Vrai ou Faux (4 points)

1.1. Vrai ✓(0.5)

Justification : C'est la définition même de l'architecture d'un capteur intelligent. L'intégration de ces trois blocs fonctionnels distingue un capteur intelligent d'un capteur conventionnel. (0.5)

1.2. Faux X(0.5)

Justification : La plage (ou étendue) de mesure est l'intervalle entre les valeurs minimale et maximale de la grandeur mesurée (l'entrée). La différence entre les valeurs de sortie maximale et minimale est appelée l'étendue de sortie. (0.5)

1.3. Faux X(0.5)

Justification : HART (Highway Addressable Remote Transducer) est un protocole hybride qui superpose un signal numérique de communication à la boucle de courant analogique 4-20 mA standard. Il n'utilise donc pas ce signal analogique. (0.5)

1.4. Faux X(0.5)

Justification : C'est tout l'intérêt de la TMR. La logique de vote (2 sur 3) permet non seulement de détecter la défaillance d'un capteur, mais aussi de masquer cette défaillance en continuant à fournir une valeur correcte basée sur les deux capteurs restants, assurant ainsi la continuité de fonctionnement. (0.5)

Correction Question 2 : Mots Manquants (4 points)

Le conditionnement du signal est crucial pour préparer le signal faible d'un élément de détection. L'**Amplificateur (1)** (0.5) augmente son amplitude, tandis qu'un filtre **Passe-bas (2)** élimine les hautes fréquences indésirables. La conversion du signal analogique au monde numérique est assurée par le **CAN (Convertisseur Analogique-Numérique) (3)**, dont la finesse de mesure est définie par son nombre de **Bits (4)**. Dans un capteur MEMS piézorésistif, la pression provoque la déformation d'un **Diaphragme (5)**, modifiant la résistance de jauges intégrées. Pour garantir l'interopérabilité et le plug-and-play, la norme **IEEE 1451 (6)** définit une fiche électronique appelée **TEDS (Transducer Electronic Data Sheet) (7)** qui stocke les données de calibration et d'identification directement dans le capteur. Enfin, combiner les données de plusieurs capteurs pour améliorer la précision et la fiabilité s'appelle la **Fusion de capteurs (8)**.

Correction Question 3 : Phrases à compléter (4 points)

3.1. (1 point)

Réponse attendue : **la précision indique la proximité de la mesure par rapport à la valeur vraie, tandis que la répétabilité indique la cohérence de la mesure dans les mêmes conditions, indépendamment de l'exactitude.**

Barème : 0.5 pt pour la définition de la précision, 0.5 pt pour la définition de la répétabilité et la distinction.

3.2. (1 point)

Réponse attendue : **on recherche un système intégré, à faible coût, avec communication numérique et consommation réduite, pour une surveillance de maintenance prédictive à grande échelle, et non pour une analyse vibratoire très haute fréquence.**

Barème : 0.5 pt pour les avantages MEMS (coût, intégration), 0.5 pt pour le contexte d'application approprié (IIoT, surveillance généralisée).

3.3. (1 point)

Réponse attendue (3 raisons parmi) : **1) Réduction de la latence pour le contrôle en temps réel. 2) Économie de bande passante en traitant/pré-filtrant les données localement. 3) Augmentation de la fiabilité (fonctionnement hors-ligne). 4) Sécurité/Confidentialité (les données sensibles ne quittent pas le site).**

Barème : 0,5 pt par raison valable identifiée, jusqu'à 1 point.

3.4. (1 point)+

Réponse attendue : **identifie ce capteur comme défaillant, l'ignore, et continue de fournir en sortie la valeur moyenne ou concordante calculée à partir des deux capteurs restants opérationnels.**

Barème : 0.5 pt pour la détection et l'isolation du capteur défaillant, 0.5 pt pour la continuité de service avec les deux autres.

Correction Question 4 : Schéma et Analyse (4 points)

1. Schéma fonctionnel (3 points)

Barème : 0.5 point par bloc correctement identifié et positionné dans la chaîne logique, +0.5 point pour la clarté globale du schéma.

text

[Température du Four] →

Bloc 1: Élément de Détection (ex: Thermocouple Type K ou N) : Convertit la température en une faible tension (f.e.m.).

→

Bloc 2: Conditionnement du Signal (ex: Amplificateur d'instrumentation + Filtre passe-bas) : Amplifie et filtre le signal faible et bruité du thermocouple. Inclut la compensation de soudure froide.

→

Bloc 3: Convertisseur A/N (CAN 16/24 bits) : Transforme la tension analogique en valeur numérique.

→

Bloc 4: Microprocesseur (μ C) : Effectue la linéarisation (à partir d'une table de correspondance), la compensation, convertit en $^{\circ}\text{C}$, exécute des diagnostics.

→

Bloc 5: Interface de Communication (Pile protocolaire Modbus TCP/IP sur interface Ethernet) : Formate et transmet la valeur numérique et l'état vers le réseau.

→

[Réseau d'usine / API]

2. Justification des choix techniques (1 point)

- **Choix de l'élément de détection (0.5 point) :**

Choix possible : Thermocouple de Type N.

Justification attendue : Capacité à mesurer des températures élevées (au-delà de 600°C), robustesse, et coût raisonnable pour cette plage. Une alternative valable (RTD Pt100) serait moins adaptée au-delà de 500°C .

- **Choix d'une fonctionnalité intelligente (0.5 point) :**

Diagnostic de dérive. Le μC peut suivre l'historique de la mesure et de la résistance de la boucle pour détecter une dérive lente indicative d'un vieillissement du thermocouple.

Correction Question 5 : Étude de cas et Synthèse (4 points)

1. Choix du capteur principal et justifications (1.5 points)

- **Type de capteur : Accéléromètre MEMS intelligent.** ✓ (0.5 point)
- **Raison technologique (0.5 point) :** Fabrication en série à très faible coût, taille réduite permettant une installation aisée, intégration du conditionnement et d'une sortie numérique (I²C/SPI), bonne robustesse aux chocs.
- **Raison liée à l'IIoT (0.5 point) :** Communication numérique native facilitant l'intégration dans un réseau de capteurs sans fil (ex: WirelessHART, LoRa), et capacité à intégrer des fonctions de prétraitement (edge computing) pour réduire le volume de données à transmettre.

2. Stratégie de fusion de capteurs (1 point)

- **Second capteur complémentaire: Capteur acoustique / microphone MEMS** (ou capteur de température). ✓
- **Information complémentaire apportée :**
Pour un microphone : Il détecte les signatures sonores à haute fréquence (ultrasons) caractéristiques des tout premiers stades de fissuration ou de défaut de lubrification, que l'accéléromètre pourrait ne pas percevoir aussi tôt, surtout dans les basses fréquences ou en milieu bruyant.
Pour un capteur de température : Il permet de corrélérer une augmentation de la température du roulement avec une augmentation des vibrations, confirmant ainsi un défaut mécanique (frottement) plutôt qu'une simple variation de charge.
- **Description de la fusion :** Utilisation d'un algorithme (ex: logique floue, réseau de neurones simple) au niveau d'une passerelle locale (fog) qui combine l'amplitude vibratoire (RMS, spectre) de l'accéléromètre avec le niveau sonore ou la température pour générer un indice de santé unique et plus fiable.

3. Argumentation pour le traitement en périphérie (1.5 points)

- **Avantage 1 : Réduction de la bande passante et des coûts associés (1 point).** Au lieu de transmettre des flux continus de données d'accélération brutes à haute fréquence (plusieurs kbps par capteur), le capteur ou un nœud edge proche calcule et ne transmet que des paramètres significatifs (valeur RMS, pics spectraux, indicateurs de défaut) quelques fois par jour, divisant le volume de données par 100 ou 1000.
- **Avantage 2 : Détection et réaction en temps réel (0.5 point).** Un algorithme local peut détecter instantanément un événement catastrophique imminent (ex: vibration soudainement très élevée) et envoyer une commande d'arrêt

d'urgence au moteur en quelques millisecondes, sans dépendre de la latence d'une connexion cloud.

Note : Les réponses peuvent varier tout en restant techniquement valides. Les points sont attribués sur la base de la justesse technique et de la pertinence des arguments.