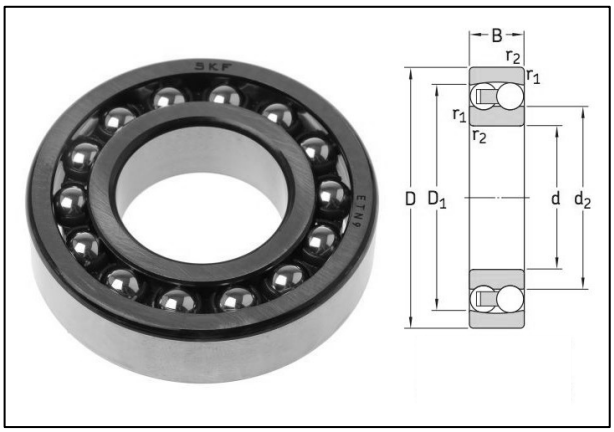
TD3 : Convoyeur industriel utilisé dans une cimenterie

A- Présentation

Dans une cimenterie, les convoyeurs industriels jouent un rôle essentiel dans le transport continu de matières premières ou de clinker. Ces systèmes sont généralement entraînés par des moteurs asynchrones, dont la fiabilité dépend en grande partie de l'état des roulements. Une défaillance de roulement (usure, corrosion, fissure) peut provoquer des vibrations anormales, entraînant l'arrêt du convoyeur, des dommages importants et des pertes de production.

Le convoyeur est entraîné par une machine asynchrone bipolaire fonctionnant à une vitesse pratiquement constante de **N = 1200 tr/min.**

Pour prévenir ce type d'incident, une surveillance vibratoire est mise en place à l'aide d'un accéléromètre analogique tel que **l'ADXL335**, permettant de détecter précocement les anomalies mécaniques au niveau des roulements. Dans cette étude, l'attention est portée spécifiquement sur les défauts de la bague extérieure. La présence de ce type de défaut se manifeste par une composante fréquentielle caractéristique, appelée **BPFO** (*Ball Pass Frequency Outer*), dans le spectre du signal mesuré. Cette fréquence est donnée par la relation suivante : $\mathbf{BPFO} = \frac{n}{2} \cdot F_r \cdot \left(1 - \frac{d}{D}\cos\beta\right)$



- n est le nombre de billes du roulement : **n = 12**
- d est le diamètre d'une bille : **d = 8**
- D est le diamètre de l'alésage du roulement : **D = 50**
- ß est l'angle de contact : **β = 0°**
- Fr est la fréquence de rotation mécanique du rotor, exprimée par : $Fr = \frac{N}{60}$ (N en tr/min)

B- Fréquence de détection de défaut de bague extérieur des roulements

Objectif est de calculer la **fréquence BPFO** (Ball Pass Frequency Outer) pour un roulement, à partir de ses caractéristiques géométriques et des conditions de fonctionnement de la machine asynchrone.

- **Question 1 :** calculer la fréquence mécanique notée Fr lorsque la machine tourne à la vitesse **1200 tr/min**, ensuite déterminer la fréquence de défaut de roulement en bague extérieure **BPFO**.

- **Question 2** : Quel est l'intérêt de détecter une fréquence caractéristique (comme la BPFO) dans le spectre vibratoire, et que peut-on conclure si un pic apparaît à cette fréquence dans l'analyse **FFT** d'un signal mesuré sur le carter moteur ?

C- Mesure de vibration mécanique du moteur

La détection des vibrations de la machine asynchrone est assurée par un capteur **ADXL335**, positionné à proximité de l'arbre moteur pour identifier tout dysfonctionnement. Seules les accélérations suivant **l'axe X** sont étudiées, en valeurs typiques, l'accéléromètre 3 axes étant alimenté sous **Vs = 3 V**.

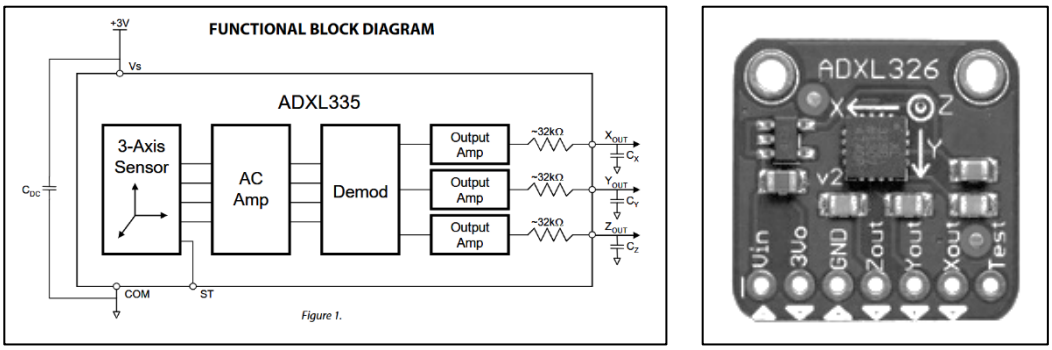


Figure 1

Le tableau ci-dessous présente les niveaux de vibration en g (**1 g = 9,81 m/s²**) correspondant aux différents défauts de la machine asynchrone

État de la machine	Accélération (g)
Très bon état	0,01 g
Bon état	0,05 g
Léger déséquilibre / usure modérée	0,1 g
Défaut de roulement modéré	0,5 g
Défaut sévère / choc / usure grave	1 à 2 g

- **Question 3 :** Valider le choix du capteur **ADX335** pour sa capacité à détecter les accélérations induites par les vibrations liées aux défauts de roulement.
- **Question 4 :** En vous appuyant sur le document technique en annexe, préciser la nature du capteur (analogique, numérique ou TOR), son étendue de mesure, sa sensibilité et la tension de sortie pour une accélération nulle.
- **Question 5 :** Déterminer la plage de tension de sortie correspondant à son domaine de linéarité. Convertir ce domaine de linéarité en m/s².

La figure 2 présente le signal de sortie « X_{out} » du capteur, traduisant les vibrations de la machine lors d'un essai, et acquis par une carte d'acquisition reliée à un ordinateur. On note que les condensateurs de sortie sont déconnectés

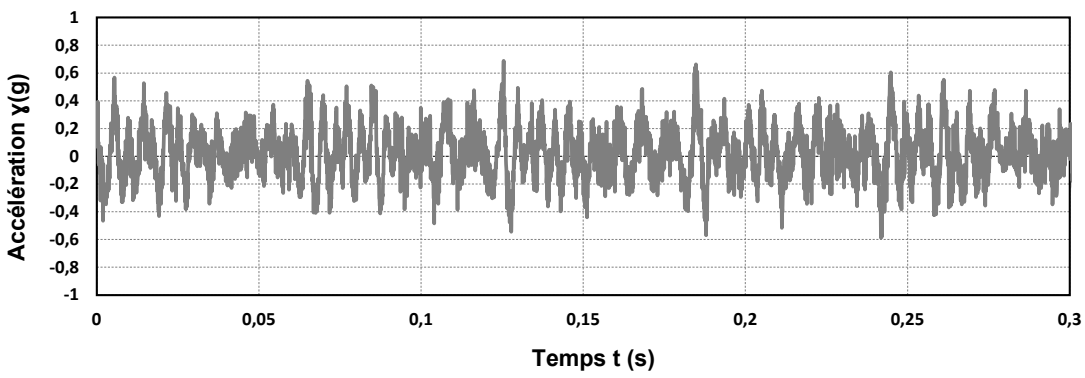


Figure 2

- **Question 6 :** Déterminer l'accélération maximale (γ_{max}) et l'accélération minimale (γ_{min}), puis préciser si ce signal permet de prévoir un défaut de roulement.
- **Question 7 :** En déduire la tension de sortie du capteur correspondant à chacune des deux valeurs extraites.

Le signal de la figure 2 a été traité à l'aide d'un analyseur de spectre FFT (Fast Fourier Transform). Toutes les composantes dont l'amplitude est inférieure à **0,018 g** sont considérées comme du bruit et seront ensuite éliminées par un filtre passe-bas. Le spectre du signal est présenté dans la figure 3 :

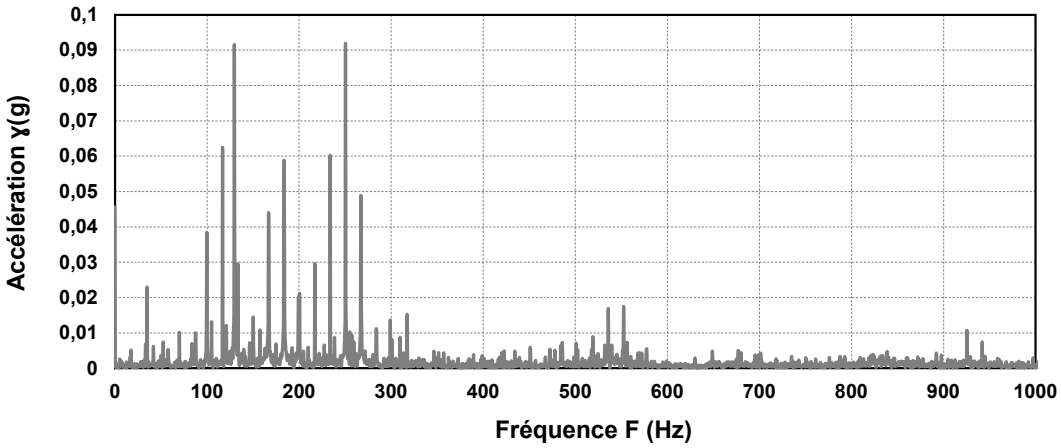


Figure 3

- **Question 8 :** À partir du spectre, vérifier la présence d'un pic caractéristique indiquant un défaut de la bague extérieure (BPFO), puis déterminer la fréquence maximale associée à ce signal $\mathbf{f_{max}}$.
- **Question 9 :** A quelle fréquence minimale **Fe** faut-il échantillonner le signal mesuré ?

On choisit par sécurité **fe = 700 Hz**. La figure suivante 4 un modèle graphique simple (à base de rectangles et triangle) de ce spectre précèdent :

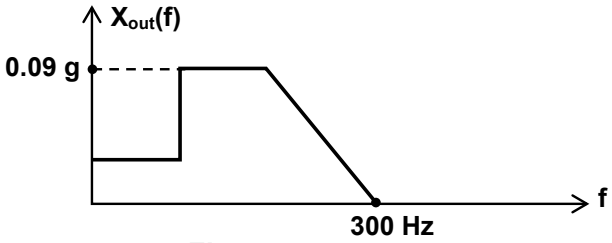
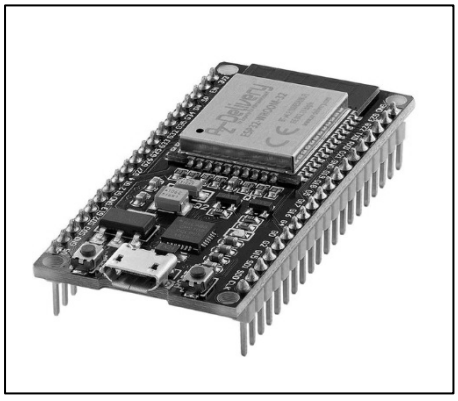


Figure 4

- **Question 10 :** Tracer le spectre du signal échantillonné **Xe(f)**.

D- Choix de la carte de traitement et dimensionnement du filtre d'entrée.

Le concepteur a retenu la carte **ESP32** comme plateforme de traitement du signal, car elle intègre un convertisseur analogique-numérique (CAN) et permet d'exécuter des programmes FFT. Les résultats sont ensuite transmis à un smartphone via une application dédiée, grâce à son module Wi-Fi intégré. Les caractéristiques de la carte sont présentées en annexe.



On note que le capteur ADX335 est connecté à la **broche 46** de ESP32.

- **Question 11 :** À partir des caractéristiques techniques, valider la compatibilité du capteur ADXL335 avec la carte ESP32. Ensuite, déterminer la fréquence d'échantillonnage maximale $\mathbf{Fe_{max}}$ de cette carte, puis conclure sur la pertinence de son choix.
- **Question 12 :** Calculer la résolution **q** du convertisseur analogique-numérique (CAN) de la carte, sachant qu'elle est alimentée en **3,6 V**. En déduire la valeur convertie **N** correspondant à l'accélération maximale γ_{max} **= 0,7 g**.

Au bout de plusieurs mois de fonctionnement, les vibrations mécaniques induites par la rotation de la machine provoquent une dégradation progressive du roulement. Le capteur implanté sur le carter détecte alors un signal parasite caractéristique : des pics de fréquence récurrent, associé au passage des billes sur un défaut localisé sur la bague intérieur. Ce signal présente une composante dominante à la fréquence BPFO (**300 Hz** à **500 Hz**) d'amplitude supérieur à **0.02 g**, signe typique d'un défaut sur la bague extérieure du roulement. Le spectre du signal est illustré dans la figure 5 :

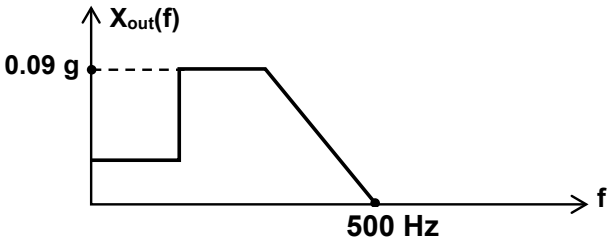
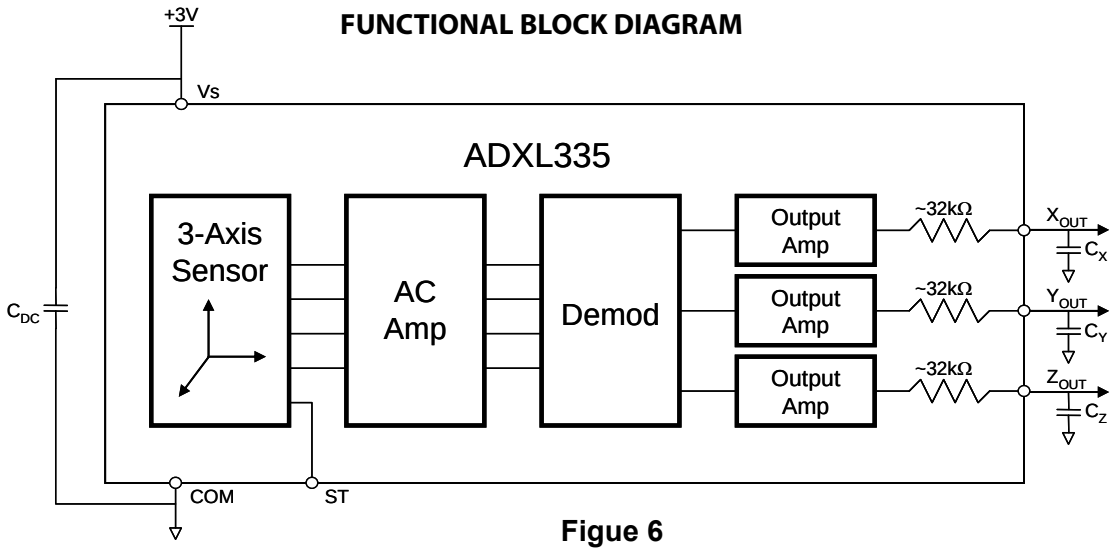


Figure 5

- **Question 13 :** Représenter le nouveau spectre du signal échantillonné **Xe(f)** sachant que **Fe = 300 Hz**
- **Question 14 :** Comment s'appelle le problème apparu ? Proposer une solution permettant de le résoudre.

On cherche ensuite à limiter la bande passante du signal de vibration à **300 Hz**. Un filtre passe-bas est donc placé en sortie du capteur afin d'éviter tout recouvrement de spectre lors de l'échantillonnage du signal.



Figue 6

- **Question 15 :** Déterminer l'expression de la fonction de transfert complexe **H(jω),** puis préciser l'ordre du filtre n ainsi que sa fréquence de coupure **fc**.
- **Question 16 :** Donner la valeur de la capacité **Cx** du condensateur de filtrage à ajouter en sortie **Xout** afin de ne conserver que les fréquences sous les **300 Hz** et limiter ainsi les bruits parasites.

Accéléromètre ADXL335

Preliminary Technical Data **ADXL335**

SPECIFICATIONS

T_A = 25°C, V_S = 3 V, C_X = C_Y = C_Z = 0.1 µF, acceleration = 0 *g*, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT	Each axis				
Measurement Range		±3	±3.6		*g*
Nonlinearity	% of full scale		±0.3		%
Package Alignment Error			±1		Degrees
Interaxis Alignment Error			±0.1		Degrees
Cross Axis Sensitivity[1]			±1		%
SENSITIVITY (RATIOMETRIC)[2]	Each axis				
Sensitivity at X_{OUT}, Y_{OUT}, Z_{OUT}	V_S = 3 V	270	300	330	mV/*g*
Sensitivity Change Due to Temperature[3]	V_S = 3 V		±0.01		%/°C
ZERO *g* BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)					
0 *g* Voltage at X_{OUT}, Y_{OUT}	V_S = 3 V	1.35	1.5	1.65	V
0 *g* Voltage at Z_{OUT}	V_S = 3 V	1.2	1.5	1.8	V
0 *g* Offset vs. Temperature			±1		m*g*/°C
NOISE PERFORMANCE					
Noise Density X_{OUT}, Y_{OUT}			150		µ*g*/√Hz rms
Noise Density Z_{OUT}			300		µ*g*/√Hz rms
FREQUENCY RESPONSE[4]					
Bandwidth X_{OUT}, Y_{OUT}[5]	No external filter		1600		Hz
Bandwidth Z_{OUT}[5]	No external filter		550		Hz
R_{FILT} Tolerance			32 ± 15%		kΩ
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
SELF TEST[6]					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		µA
Output Change at X_{OUT}	Self test 0 to 1		−300		mV
Output Change at Y_{OUT}	Self test 0 to 1		+300		mV
Output Change at Z_{OUT}	Self test 0 to 1		+550		mV
OUTPUT AMPLIFIER					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	V_S = 3 V		350		µA
Turn-On Time[7]	No external filter		1		ms
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		−40		+85	°C

[1] Defined as coupling between any two axes.
[2] Sensitivity is essentially ratiometric to V_S.
[3] Defined as the output change from ambient-to-maximum temperature or ambient-to-minimum temperature.
[4] Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors (C_X, C_Y, C_Z).
[5] Bandwidth with external capacitors = $1/(2 \times \pi \times 32\ k\Omega \times C)$. For C_X, C_Y = 0.003 µF, bandwidth = 1.6 kHz. For C_Z = 0.01 µF, bandwidth = 500 Hz. For C_X, C_Y, C_Z = 10 µF, bandwidth = 0.5 Hz.
[6] Self-test response changes cubically with V_S.
[7] Turn-on time is dependent on C_X, C_Y, C_Z and is approximately 160 × C_X or C_Y or C_Z + 1 ms, where C_X, C_Y, C_Z are in µF.

Caractéristique de la carte ESP32

Fonctionnalité	Caractéristiques
• **Alimentation**	Tension d'alimentation : 2,3 – 3,6 V (VDDA, VDD3P3_RTC, VDD3P3, VDD_SDIO); VDD3P3_CPU : 1,8 – 3,6 V; Courant minimal : 0,5 A
• **Microcontrôleur**	1 ou 2 cœurs Xtensa® LX6 32-bit jusqu'à 240 MHz; 448 KB ROM; 520 KB SRAM; 16 KB SRAM RTC; support QSPI externe
• **CAN (ADC)**	2 ADC SAR 12 bits, jusqu'à 18 canaux; plage d'entrée 0 – 3,3 V; échantillonnage : RTC ctrl ≤ 200 ksps; DIG ctrl ≤ 2 Msps
• **CNA (DAC)**	2 canaux 8 bits (GPIO25, GPIO26)
• **Connectivité sans fil**	Wi-Fi 802.11 b/g/n (jusqu'à 150 Mbps); Bluetooth v4.2 BR/EDR & BLE
• **Interfaces & GPIO**	34 GPIO multi; SPI; I²C; I²S; UART; PWM; SDIO; TWAI (CAN); RMT; capteurs tactiles
• **Ultra-Low-Power & ULP**	5 modes : Active, Modem-sleep, Light-sleep, Deep-sleep, Hibernation; Deep-sleep : 10 µA; coprocesseur ULP; RTC memory
• **Environnement**	Température de fonctionnement : –40 °C à +85 °C