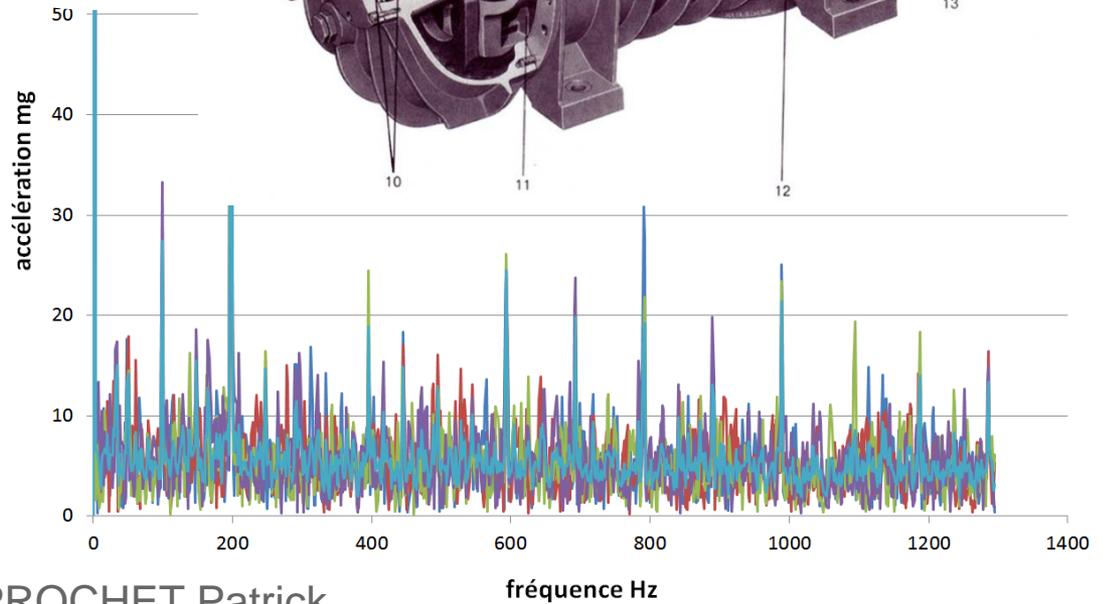
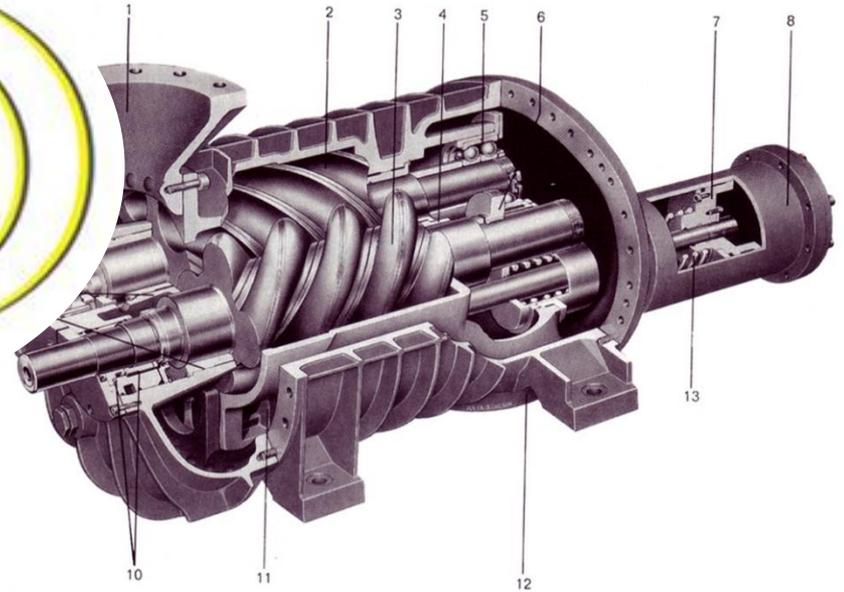


MESURES DE VIBRATIONS ET RETOUR D'EXPÉRIENCE...

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

PROCHET Patrick
Journées liquéfacteurs 2019

Introduction : durée de vie des roulements

- Liée à la fatigue des matériaux \Rightarrow défauts d'écaillage
- Durée de vie nominale L10 = fiabilité de 90 %



- 50 % des roulements $> 2 \times L10$
- 30 % des roulements $> 5 \times L10$
- 10 % des roulements $> 8 \times L10$



- 3 % risque de détérioration avant $0,5 \times L10$
- Fiabilité proche de 100 % si roulements utilisés à 3 à 5 % de L10

En pratique, la durée de vie d'un roulement est aussi affectée par :



- Température de fonctionnement
- Graissage (surgraissage, graissage trop rapide)
- Dégradation de l'huile
- Stockage du roulement avant sa MES
SKF préconise : 10 ans si $< 65\%$ humidité et $20 < T < 25^\circ\text{C}$, 3 ans si 75% et $35 < T < 40^\circ\text{C}$
- Arrêts de la machine $>$ marquage des roulements, accentué si vibrations
 \Rightarrow rotation manuelle au minima 1 fois par mois
- Particules étrangères (/ propreté au montage, détérioration d'un composant autre)
- Corrosion (lubrifiant, contamination au montage)
- Surcharges (montage, démontage ou fonctionnement)
- Démarrages fréquents...

Surveillance vibratoire

1. Analyse vibratoire globale

- Transforme un signal temporel en une valeur numérique unique
- Peut être comparée à des tableaux de norme
- Renseigne l'utilisateur sur l'état général de la machine
- Ne renseigne pas sur les causes à l'origine des vibrations

2. Analyse temporelle

- Suivi du signal temporel selon paramètres de fonctionnement de la machine
- Exploitable lorsque le signal est simple
- Dans le cas contraire inexploitable...

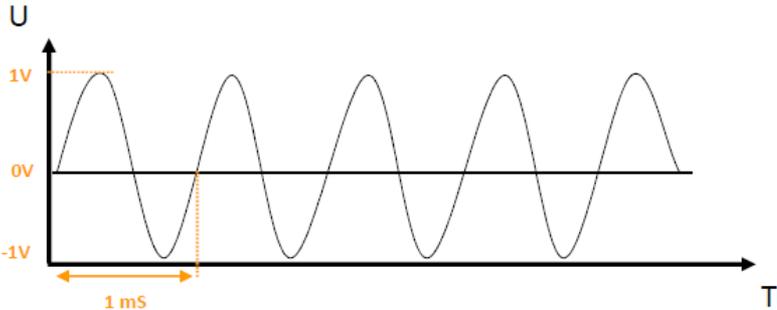
3. Analyse spectrale

- Transforme un signal temporel en un spectre représentant chaque fréquence de vibration et l'amplitude associée
- Analyse les défauts susceptibles d'endommager la machine
- Diagnostique la nature de l'anomalie à un stade précoce et en précise la gravité
- Parfaitement adaptée au suivi des roulements qui constituent souvent les points faibles d'une machine tournante

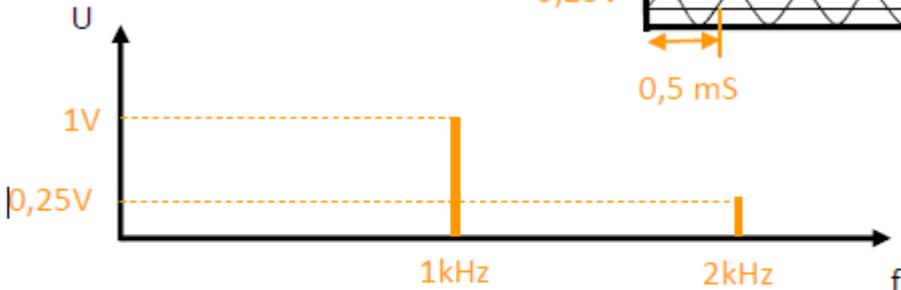
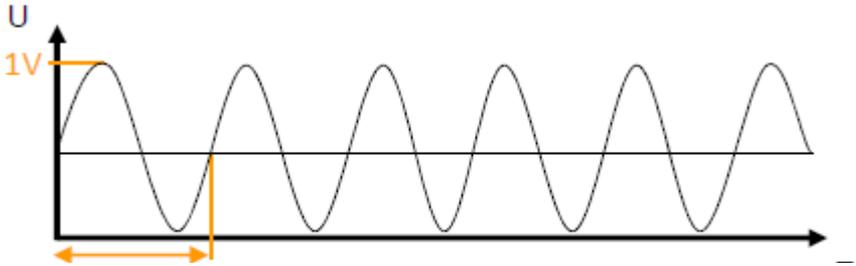
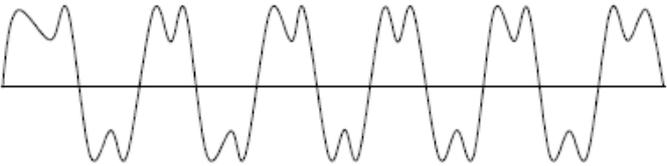
Analyse spectrale

Défaut	Fréquence	Remarque
Balourd (ou déséquilibre)	1 * fréquence de rotation (fr)	Cause la plus fréquente de vibrations, composante radiale plus forte
Désalignement (ou désaxage)	2 x fr, aussi 1, 3 et 4 x fr	Souvent apparait une vibration axiale sévère
Défaut structurel et desserrage	1, 2, 3 et 4 x fr	Différences importantes entre composantes axiales et radiales
Forces hydrauliques	1 x fr ou nbre aubes x fr	Rarement la cause de troubles excepté en cas de résonance
Graissage	5000 - 10000 Hz	Décollement du spectre
Pales de ventilateur	Nbre pales x fr	
Engrenage	Nbre de dents x fr	
Roulement	Selon données constructeur	Chaque type de roulement possède une signature spectrale spécifique

Traitement du signal : transformée de Fourier



Harmoniques complexes



Analyse spectrale : cas des roulements

f_r : fréquence de rotation

f_{rot} : fréquence de rotation de la bague intérieure

f_{ext} : fréquence de rotation de la bague extérieure

N : nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux ou aiguilles)

d_m : diamètre primitif

d_b : diamètre des éléments roulants

α : angle de contact

f_{bi} : fréquence de défaut sur la bague intérieure $f_{bi} = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) (f_{rot} - f_{ext}) \right)$

f_{be} : fréquence de défaut sur la bague intérieure $f_{be} = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) (f_{rot} - f_{ext}) \right)$

f_{ca} : fréquence de défaut sur la cage $f_{ca} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right) f_{rot} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right) f_{ext}$

f_b : fréquence de défaut sur l'élément roulant $f_b = \frac{1}{2} \frac{d_m}{d_d} \left(1 - \left(\frac{d_b}{d_m} \cos(\alpha) \right)^2 \right) (f_{rot} - f_{ext})$



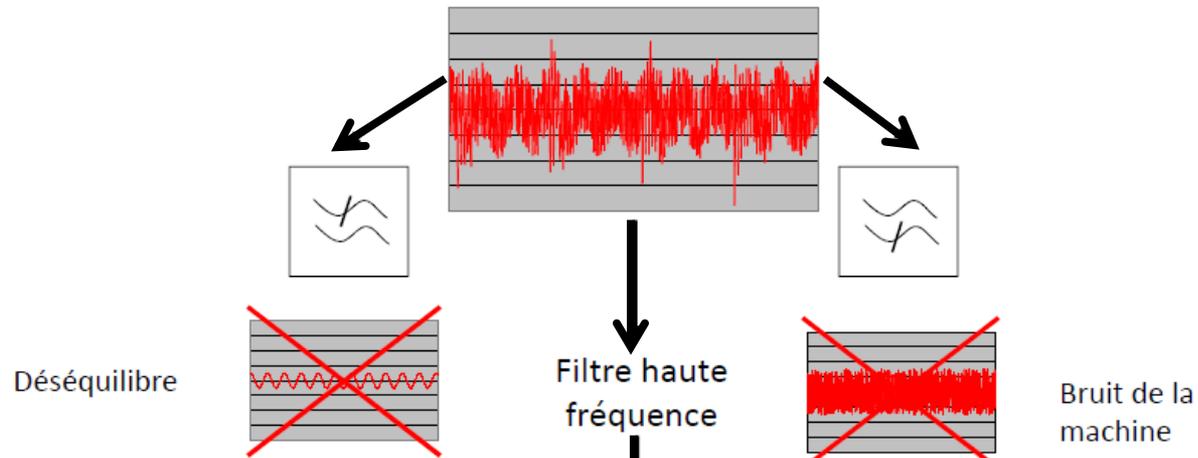
Chaque type de roulements a une signature spectrale qui lui est propre,
Elle est donnée par le constructeur

Exemple roulement SKF 7313 : $f_{bi} = 7,07 * f_r$; $f_{be} = 4,93 * f_r$; $f_b = 4,17 * f_r$



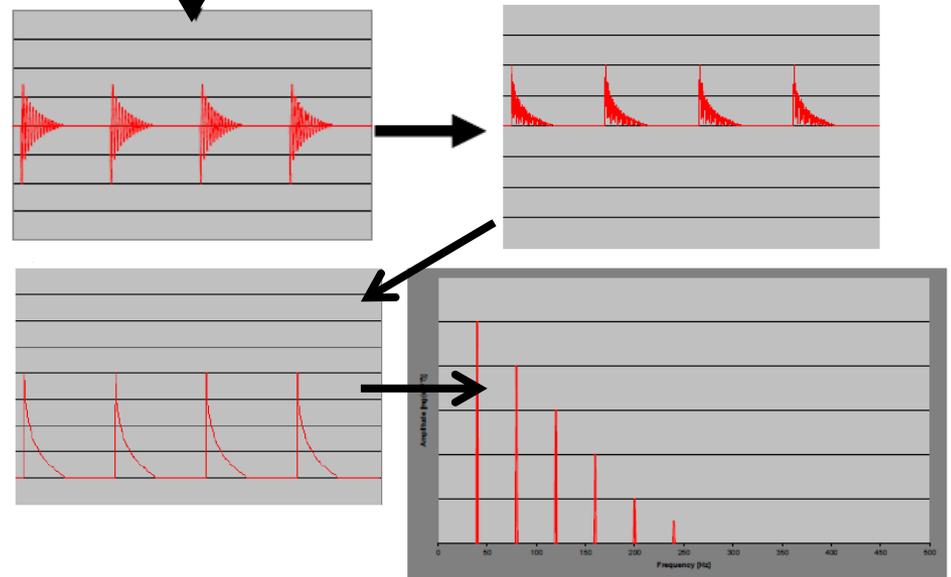
> Exige de connaître de chaque roulement le fabricant et la référence exacte

Traitement du signal : cas des roulements

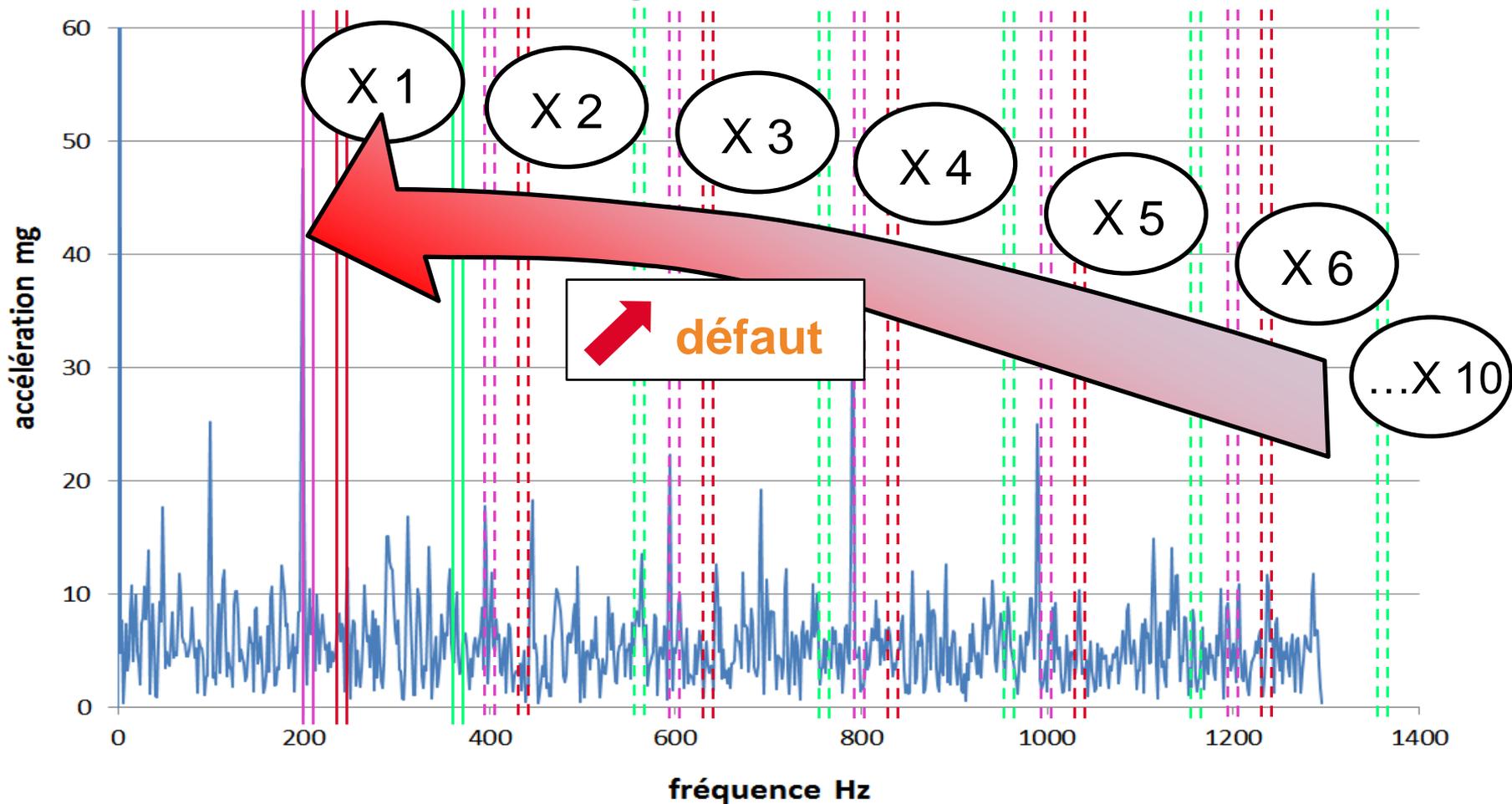


Mesures vibrations spectrales :

- Traitement du signal complexe \Rightarrow matériel très onéreux \approx 30 ans, réservé aux mesures ponctuelles
- Mesures continues abordables depuis \approx 15 ans



Traitement du signal : cas des roulements



Roulement SKF 7313 à 2965 tr/min

Facteur bague interne : 7,07 \Rightarrow fréquence de défaut : 349,4 Hz (marge 2 %)

Facteur bague externe : 4,93 \Rightarrow fréquence de défaut : 243,6 Hz

Facteur éléments roulants : 4,17 \Rightarrow fréquence de défaut : 206,1 Hz

Détermination des seuils d'alerte

Moteurs : seuils d'alerte et niveaux de vibrations selon norme ISO 10816-3

Classification	15 kW < P < 300 kW 160 mm < H < 315 mm		P > 300 kW H > 315 mm	
	support			
	rigide	élastique	rigide	élastique
Inacceptable	> 4,5 mm/s	> 7,1 mm/s	> 7,1 mm/s	> 11 mm/s
Encore acceptable	2,8 - 4,5 mm/s	4,5 - 7,1 mm/s	4,5 - 7,1 mm/s	7,1 - 11 mm/s
Normal	1,4 - 2,8 mm/s	2,3 - 4,5 mm/s	2,3 - 4,5 mm/s	3,5 - 7,1 mm/s
Bon	< 1,4 mm/s	< 2,3 mm/s	< 2,3 mm/s	< 3,5 mm/s

Valeur efficace 2 à 1000 Hz si $n < 600$ tr/min, 10 à 1000 Hz si $n > 600$ tr/min

Compresseurs : seuils d'alerte et niveaux de vibrations selon constructeur

Classification	Avec FLPR	Sans FLPR
Inacceptable	> 18 mm/s	> 11,2 mm/s
Encore acceptable	7,1 - 18 mm/s	4,5 - 11,2 mm/s
Normal	2,8 - 7,1 mm/s	1,8 - 4,5 mm/s
Bon	< 2,8 mm/s	< 1,8 mm/s

Valeur efficace 10 à 1000 Hz

FLPR : Fréquences Liées à la Pulsation de Refoulement Journées liquéfacteurs 2019 | PAGE 9

Définition des seuils d'alerte

Roulements :

- Aucune norme
- A l'appréciation du constructeur qui doit avoir de bonnes références...

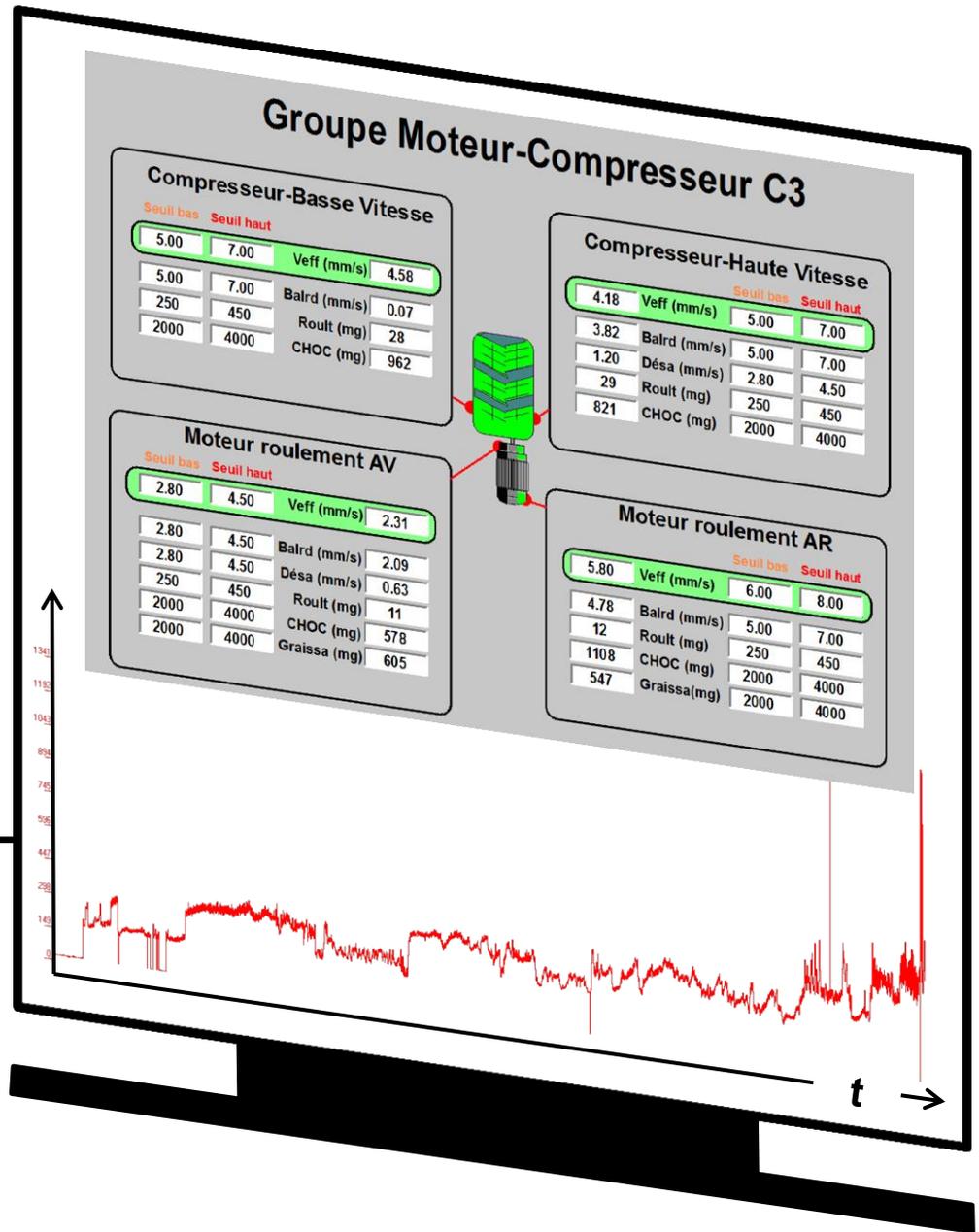
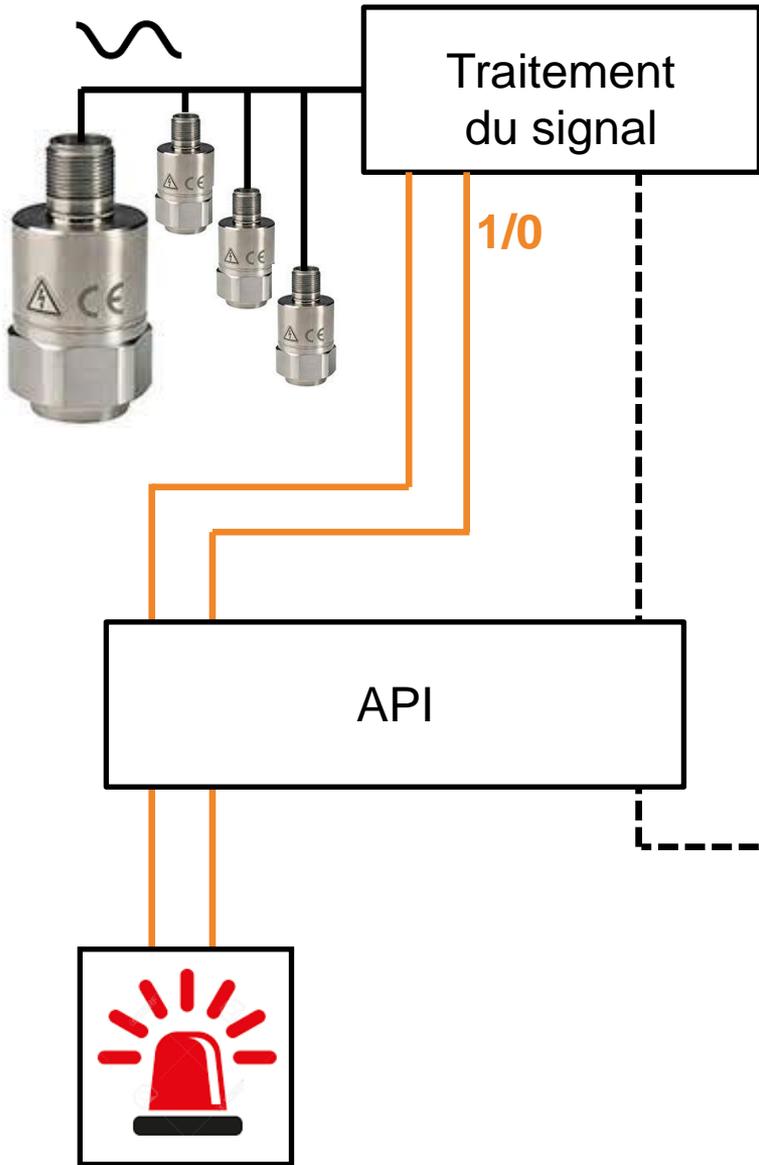
Dans notre cas :

Roulement (= BPFO+BPFI+BSF)	120-550 tr/min	500-1000 tr/min	1000-3000 tr/min	3000-12000 tr/min
> 550 mg	Red	Red	Red	Red
450 - 550 mg	Red	Red	Red	Red
350 - 450 mg	Red	Red	Yellow	Yellow
250 - 350 mg	Red	Yellow	Yellow	Yellow
150 - 250 mg	Yellow	Yellow	Green	Green
50 - 150 mg	Yellow	Green	Green	Green
0 - 50 mg	Green	Green	Green	Green



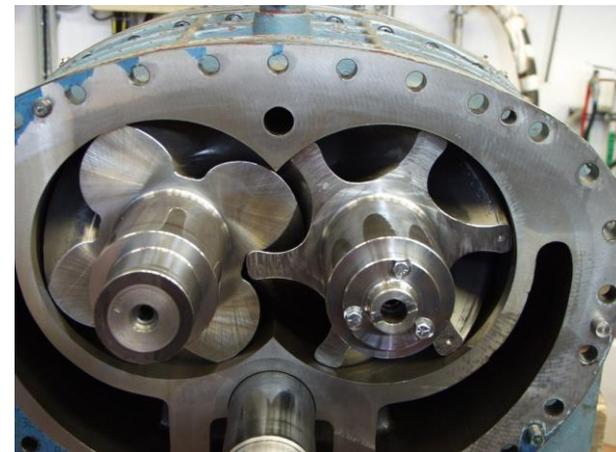
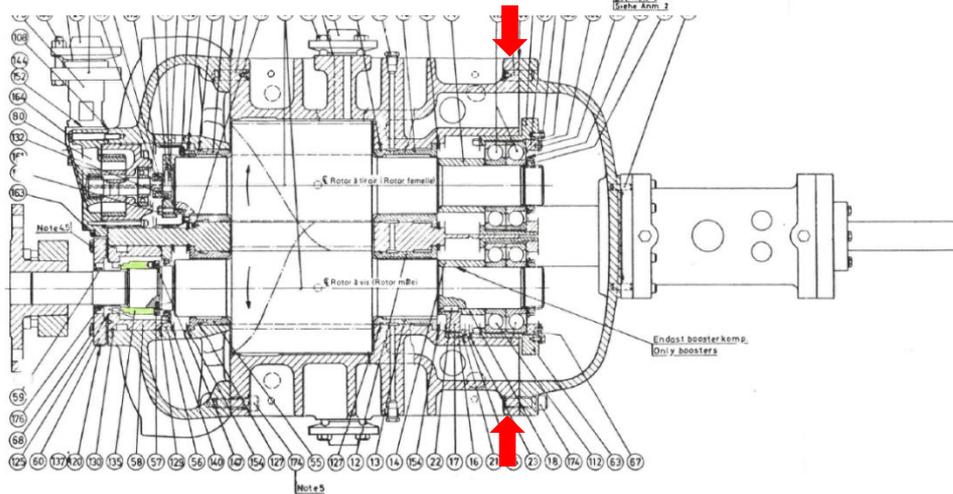
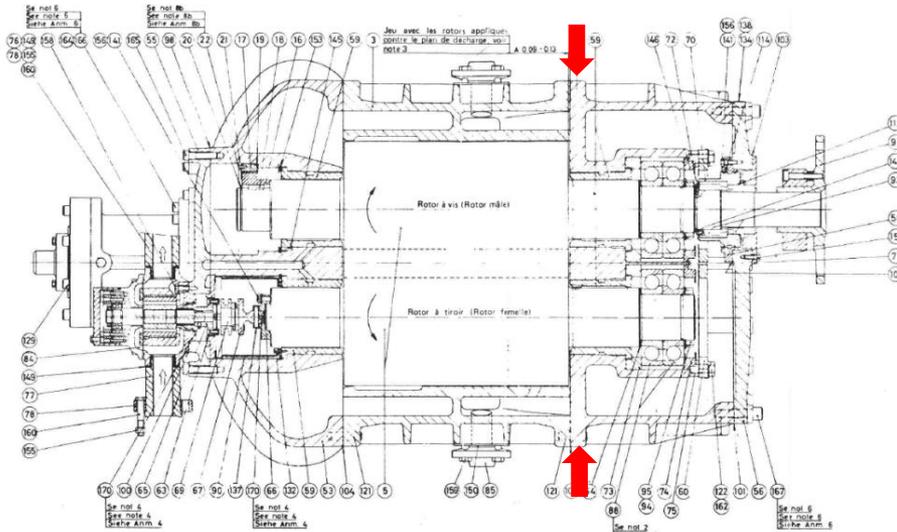
Définition des seuils d'alerte : point clé de la mise en place de la surveillance...

- Normes internationales insuffisantes pour définir ces seuils car elles ne prennent pas en considération la nature des défauts
- Une ou plusieurs expertises vibratoires sont nécessaires pour évaluer et ajuster les seuils
- Dépassement de seuils \Rightarrow mesures complémentaires et/ou une procédure adaptée

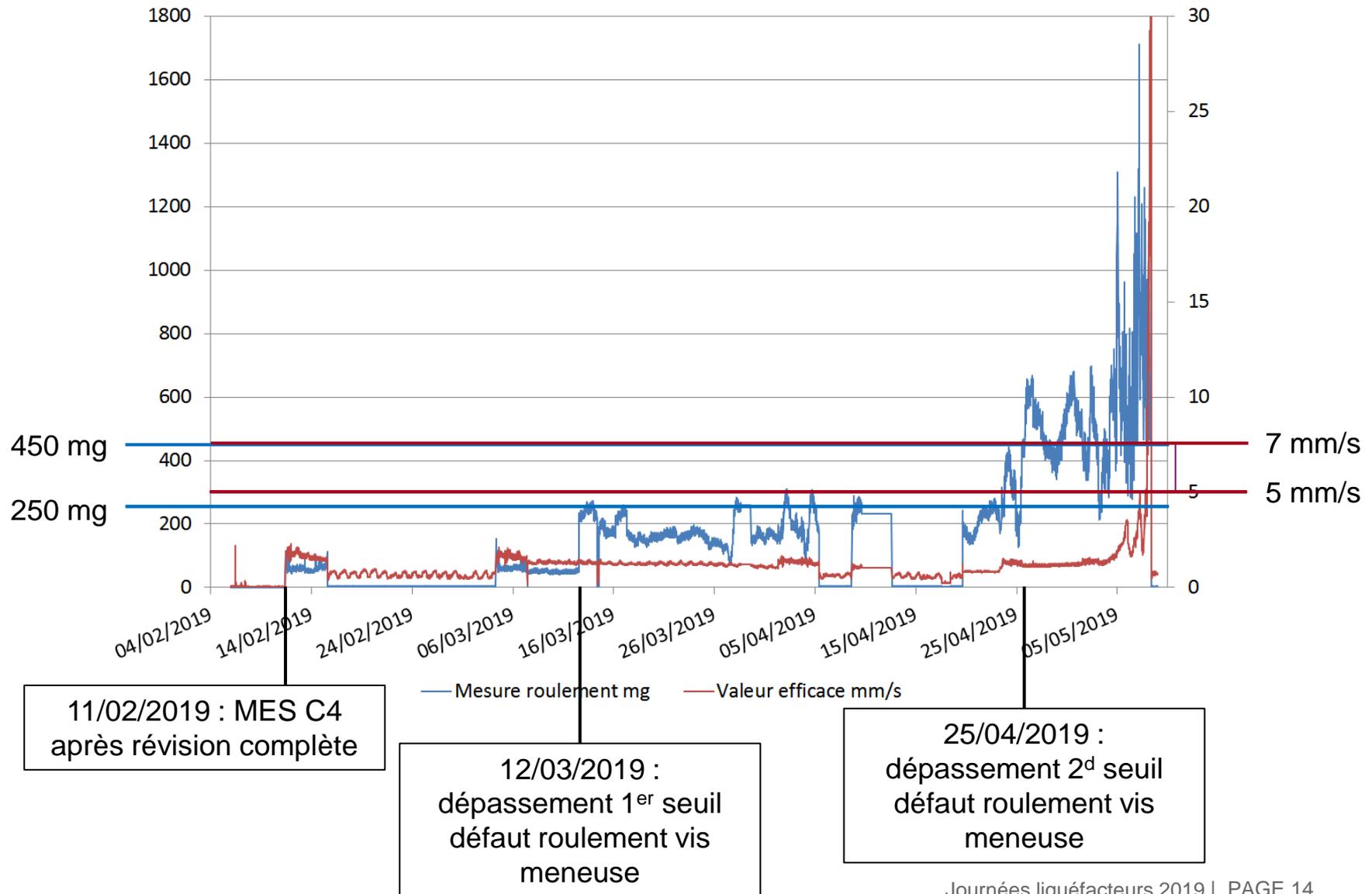


A savoir...

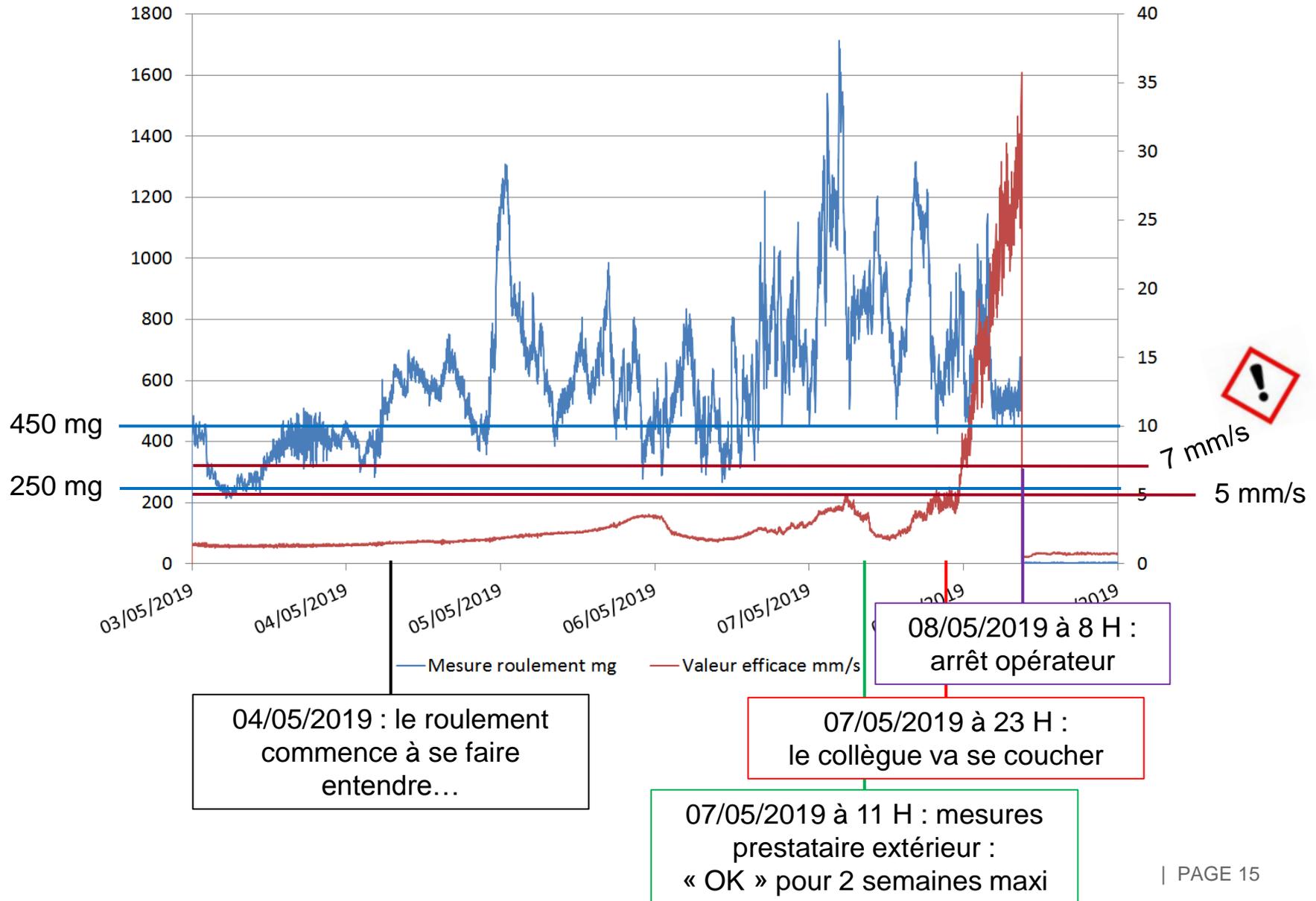
- Sensibilité optimale ⇒
 - capteurs au plus près des roulements
 - éviter les joints de carter
 - utiliser une colle spécifique pour les supports de capteurs
- Vis meneuse 4 lobes ⇒ harmonique à 4 x fr
- Vis menée 6 lobes ⇒ rotation = 2/3 moteur (⇒ paramétrage...)
- Les électroniques doivent inclure une entrée vitesse en cas de variateur



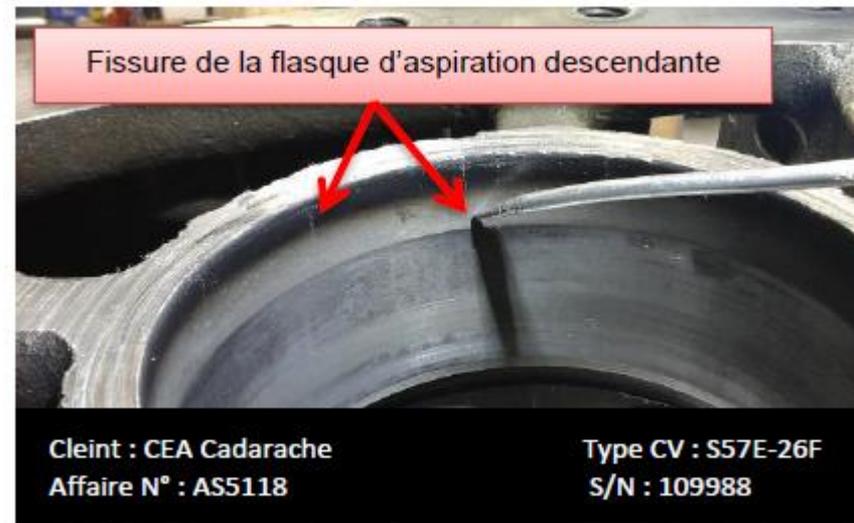
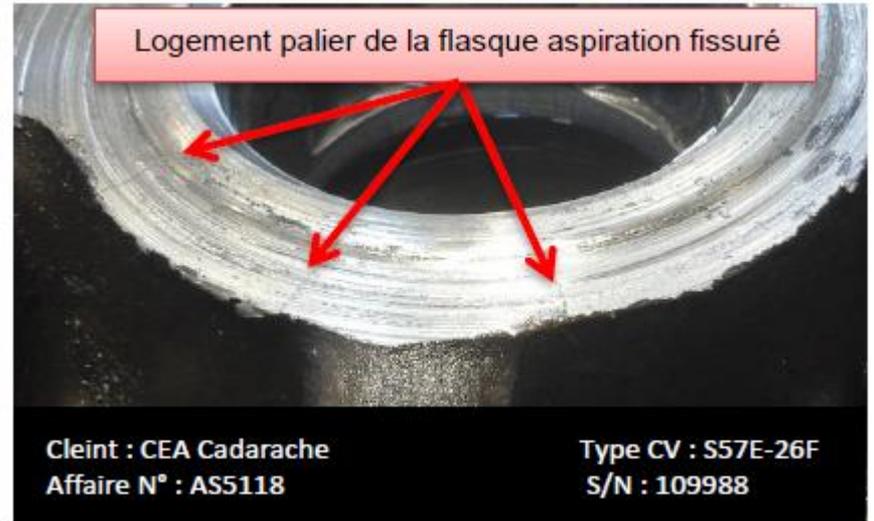
Mesures de vibrations et retour d'expérience



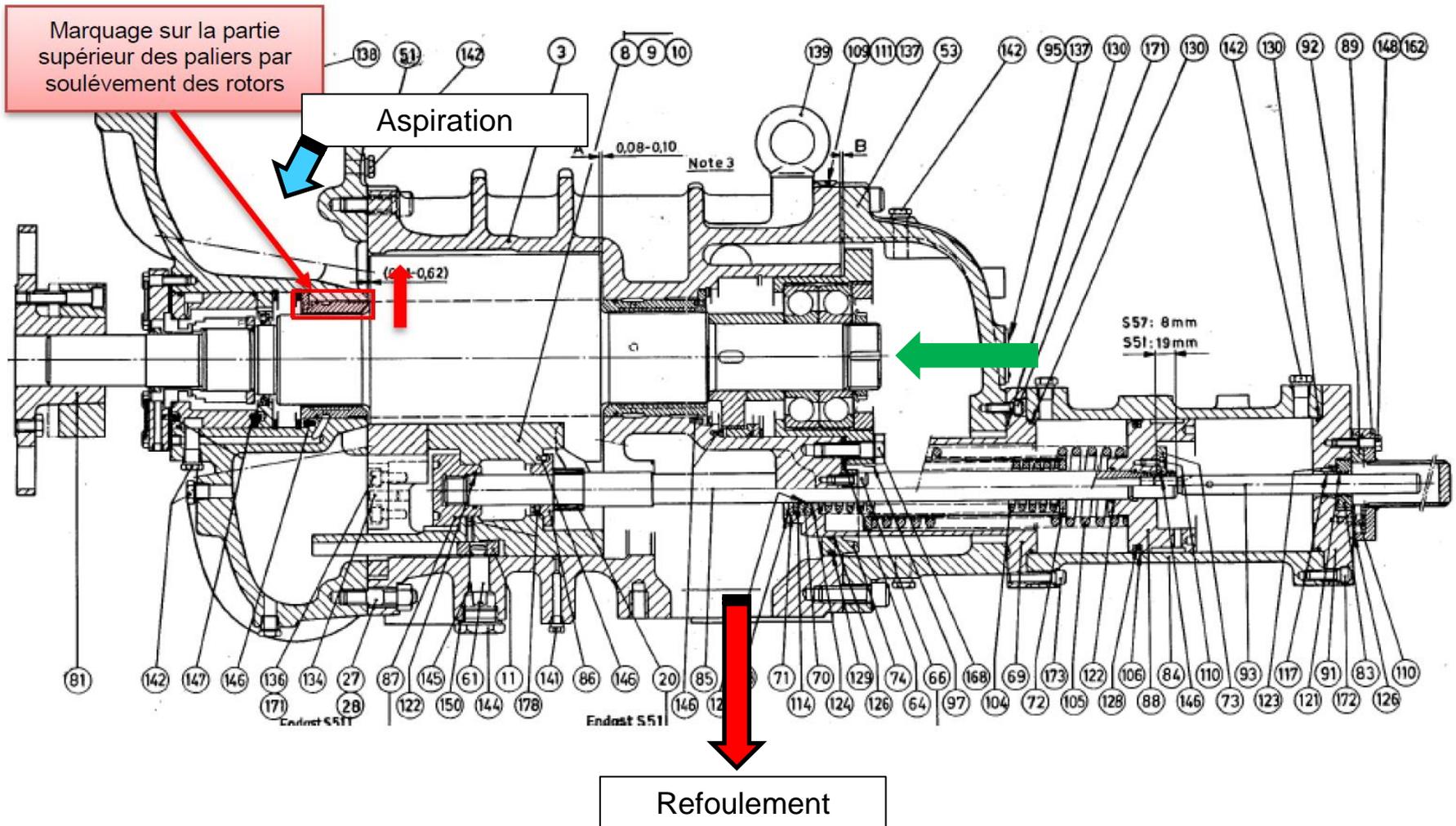
Mesures de vibrations et retour d'expérience



Mesures de vibrations et retour d'expérience



Mesures de vibrations et retour d'expérience



Conclusions

- Des mesures continues s'imposent pour les machines critiques
- Des mesures spectrales peu onéreuses offrent une bonne sensibilité vis-à-vis des défauts de roulements
- Des mesures spectrales apportent un délai d'anticipation important, dans le cas de cet incident avec défaut de roulement très évolutif, 6 semaines contre moins d'une journée avec des mesures globales
- Les dépassements du premier seuil d'alerte doivent être mémorisés pour être traités comme des anomalies
- Dans la mesure du possible, le second seuil doit alarmer immédiatement le personnel car la situation peu rapidement évoluer

Merci de votre attention

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Cadarache | 13108 Saint Paul Lez Durance Cedex
T. +33 (0)4 42 25 62 25 | F. +33 (0)4 42 25 26 61

DRF
IRFM
STEP

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019