

Lloyd's Register ODS: Engineering Dynamics

# Analyse dynamique d'un rotor de Compresseur d'Ethylène

Stéphane MICHEL  
Consultant

Energy, Machinery Dynamics  
15 June 2012



Lloyd's Register ODS: Engineering Dynamics

## Lloyd's Register ODS : Engineering Dynamics



### 60 engineers

- Offices in Copenhagen, Lyon, Tønsberg (Norway) and Stockholm. Represented in Houston and Dubai

### 32 year history

- Company founded in 1980 as Ødegaard & Danneskiold-Samsøe, bought by Lloyd's Register in 2005.

### Providing engineering consultancy to the business streams

- Energy, Marine & Transportation

### Services

- 3<sup>rd</sup> party analysis, Troubleshooting, Commissioning assistance, R&D, Training

### Disciplines

- Machinery Dynamics, Structural Dynamics, Fluid Dynamics, Noise & Vibration



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

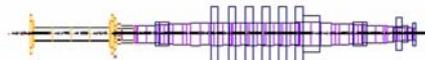
### Sommaire

- Outils utilisés par LR-ODS
- Présentation de l'installation, historique, analyse des causes
- Présentation du modèle éléments finis
- Analyse I: Calcul de réponse du design original et analyse de sensibilité à des défauts typiques
- Analyse II: Test de solutions
- Conclusions



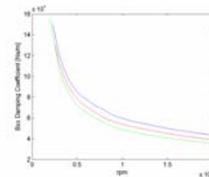
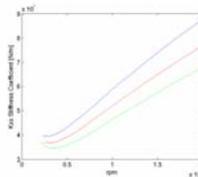
## Tools used for Rotordynamic Analyses

ODS-RP: Finite Element code for rotordynamic analysis (lateral – torsional analyses)



Additional tools (1/2):

- **ODS-BEAR:** Dynamic coefficients simulating an oil film for Journal and Tilting Pad bearings. Take account of heat dissipation over the pad, the pad flexibility (depending on temperature & oil pressure)
- **Magnetic bearings:**
  - Linear transfer function provided by bearing manufacturer (matrix inputs).
  - Time approach using Matlab-Simulink ; control loop parameters can be identified from measurements.



## Tools used for Rotordynamic Analyses

### Additional tools (2/2)

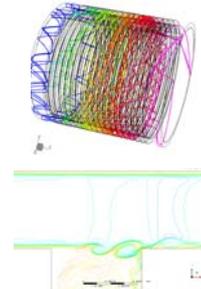
#### Modelling SEALS

ISOTSEAL (co-operation Texas A&M, ODS member consortium Virginia Tech and Texas A&M)

- Suitable for Labyrinth and classical Holepattern and Honeycomb seals
- Input: geometry, pressure, temperature, viscosity
- Output: [K] & [C] vs speed

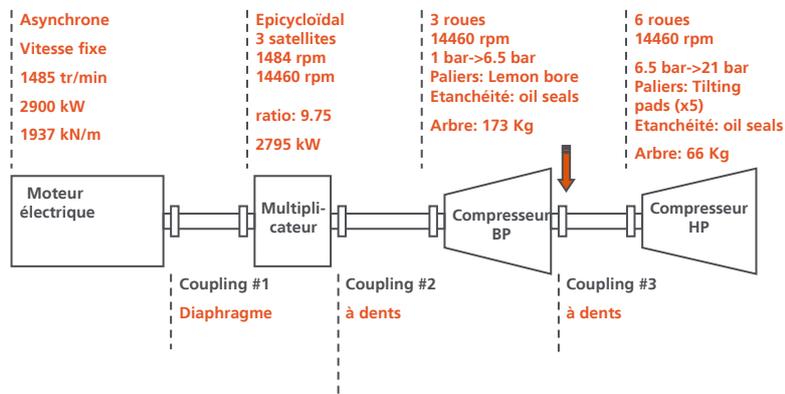
Holepattern / Honeycomb seals with a specific geometry:

- CFD based methods (using Ansys CFX)
- CFD is used as a virtual test rig



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

### Présentation de l'installation



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

### Historique

L'unité, réceptionnée fin des années 50, n'avait jamais pu être opérée de manière fiable jusqu'en 1975, date à laquelle le constructeur a procédé à un remplacement des paliers standards du compresseur basse pression par des modèles « Lemon »

Entre 1975 et 2010, l'unité fonctionnait tant bien que mal avec une récurrence d'incident diminuée mais toujours des alertes vibrations ponctuelles présentes.

En janvier 2010, une augmentation significative des vibrations paliers (basse pression, NDE) a été ressentie pendant 2h40min. L'opérateur n'a toutefois pas arrêté l'installation car les niveaux sont redevenus normaux.

En mars 2010, une avarie importante a touché les 2 compresseurs. Les réparations ont nécessité de remplacer le rotor, les paliers, butés, et étanchéités (labyrinthe)

Après réparation, les paliers du compresseur basse pression étaient systématiquement retrouvés endommagés après seulement 4 semaines de fonctionnement.



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

### Objectifs de l'étude

1. Identifier rapidement quels sont les paramètres qui conduisent aux dysfonctionnements (soutenir les hypothèses de la RCA réalisée en amont)

Causes potentielles identifiées lors de la RCA:

- Risque fort: fréquences critiques induisant des fortes vibrations latérales
- Risque moyen: balourd, désalignement, instabilité, grippage de l'accouplement, pulsation dans le débit
- Risque faible: décharge électrique dans le palier, stall/surge, résonance acoustique, problème de chargement aux paliers, contamination de l'huile, cavitation...

2. Tester numériquement des solutions de remplacement de type de palier et d'accouplement



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

### Approche

API 617: approche proposée par l'API pour valider le comportement dynamique:

- Cartographie des vitesses critiques d'arbre non amorti (Undamped Critical Speed Map)
- Calcul de réponse au balourd pour des cas de chargement prédéfinis
- Analyse de stabilité (validation des solutions)
- Analyse de torsion (validation des solutions)

### Outils mis en œuvre

- Code Eléments Finis développé en interne RP (analyses latérales et de torsion)
- Calcul des coefficients dynamiques des paliers à l'aide de l'outil dédié : ODS\_BEAR
- Modèle réalisé à partir de:
  - plan des arbres pour les 2 compresseurs,
  - dimension des paliers « lemon »,
  - coefficients de raideur/amortissement pour les paliers à patins oscillants.
  - informations moteur électrique et multiplicateur: masses+inerties uniquement.



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

### Partie 1: analyse de sensibilité du comportement latéral aux défauts de fonctionnement

- Objectifs: identifier et quantifier dans quelle mesure certains défauts impactent le comportement dynamique (décalage des fréquences critiques)
- Défauts étudiés (sur arbre compresseur BP):
  - Désalignement vertical et/ou latéral sur le palier NDE (vibrations maximales)
  - Grippage accouplement entre BP & HP (effet 1): ajout raideur de rotation en extrémité d'arbre Krx, Kry)
  - Grippage accouplement entre BP et HP (effet 2): ajout d'une raideur verticale / latérale en extrémité d'arbre
  - Influence du film d'huile dans les 2 joints dynamiques dans un cas de dysfonctionnement de l'étanchéité
  - **Défaut accouplement à denture: balourd seul, balourd + friction denture, balourd+friction+désalignement**

### Partie 2: Validation d'un nouveau design

- Application du protocole API pour le système modifié (Paliers à patins oscillants et/ou un accouplement flexible METASTREAM entre les arbres des étages basse et haute pression).



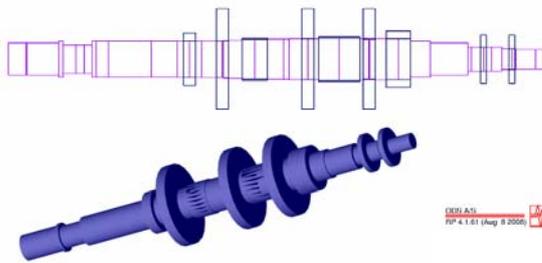
## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

### Présentation du modèle éléments finis – Arbre Basse Pression

Modélisation réalisée sous RP

10.320284 U4C100 Ethylene Unit  
LP Lateral Analysis

Damped eigenvalue analysis  
elements



40 Eléments/ 32 nœuds

Les roues et la butée axiale sont modélisées aux nœuds correspondant par des masses et inerties concentrées (bleues).

Fréquences de résonances du modèle:

175 Hz, 401 Hz et 691 Hz

Fréquences de résonances au marteau d'impact:

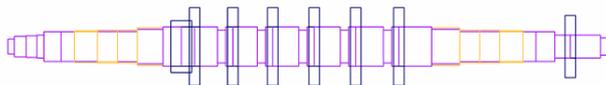
198 Hz, 399 Hz et 698 Hz

## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

### Présentation du modèle éléments finis: arbre haute pression

10.320284 U4C100 Ethylene Unit  
HP Lateral Analysis

Damped eigenvalue analysis  
elements



54 Eléments/ 40 nœuds

Roues et butée axiale : modélisées par masses et inerties concentrées au centre de l'élément

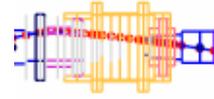
Le moteur électrique et le multiplicateur ne sont pas pris compte pour l'analyse latérale (accouplement à diaphragme découple le système)

# Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

## Présentation du modèle éléments finis

### Accouplements

Modélisation fine de l'accouplement à dents situé entre les arbres BP et HP, proche de la zone de rupture (friction au niveau de la denture prise en compte)



### Paliers

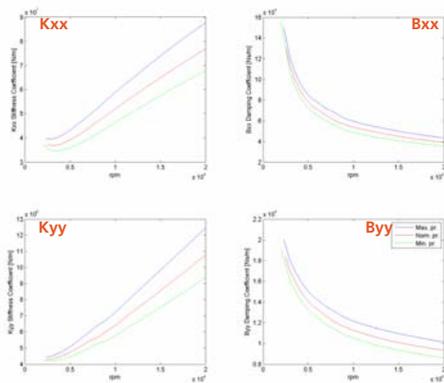
**Patins Lemon:** calcul des coefficients dynamiques (raideur et amortissement) pour chaque régime et les 3 cas de charge à partir des caractéristiques (à l'aide du code ODS-BEAR).

**Patins oscillants:** coefficients dynamiques au régime de fonctionnement directement fournis par le client.

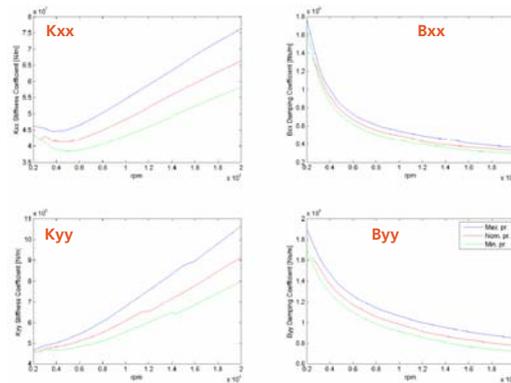
	DE Bearing	NDE Bearing
Shaft diameter [mm]	Ø70.000	60.000
Bearing bore diameter [mm]	Ø70.57 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.01</sub>	60.50 <sup>+0.01</sup> <sub>-0.01</sub>
Angular extend of pad [degrees]	160	160
Number of pads	2	2
Pad vertical eccentricity	+ 0.2	+0.175
Pad horizontal eccentricity	0	0
Bearing length [mm]	35	30
Oil	ISO VG46	ISO VG46
Oil Inlet Temperature [°C]	40	40
Clearance ratio (Min/Nom/Max)	2.8/3.0/3.2	2.8/3.0/3.2

# Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Coefficients dynamiques Palier DE



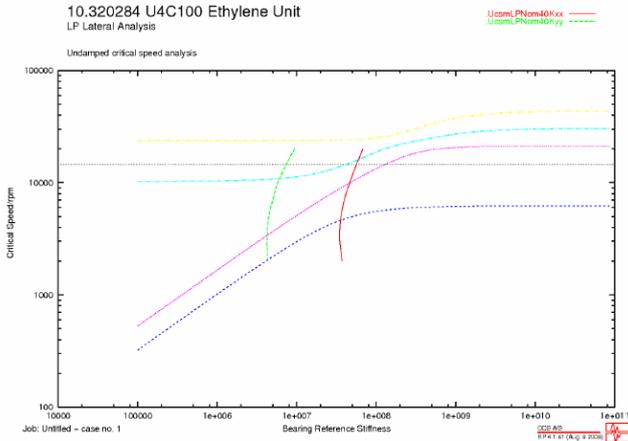
Coefficients dynamiques Palier NDE



Cas de charge: Minimum / normal / maximum

# Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Arbre basse pression, cartographie des vitesses critiques (non amorti),



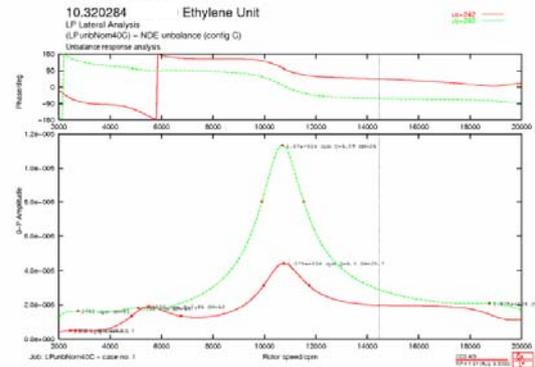
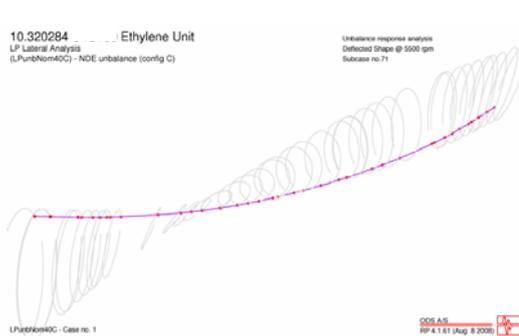
Le compresseur est conçu pour fonctionner au-delà des 2 premières vitesses critiques.

L'étude paramétrique vise à identifier quel défaut peut être à l'origine des niveaux importants sur le palier NDE

# Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Arbre basse pression - Calcul de réponse au balourd

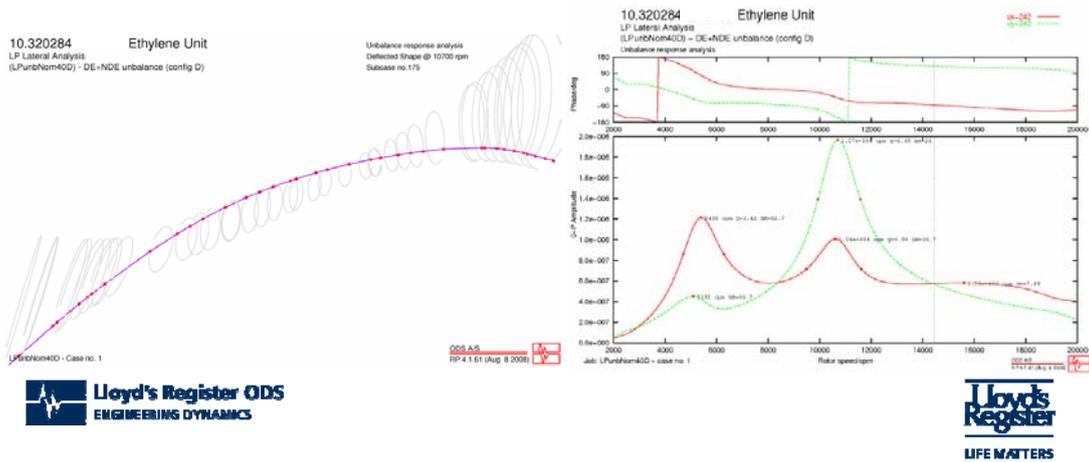
Cas d'un balourd à l'extrémité NDE



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Arbre basse pression - Calcul de réponse au balourd

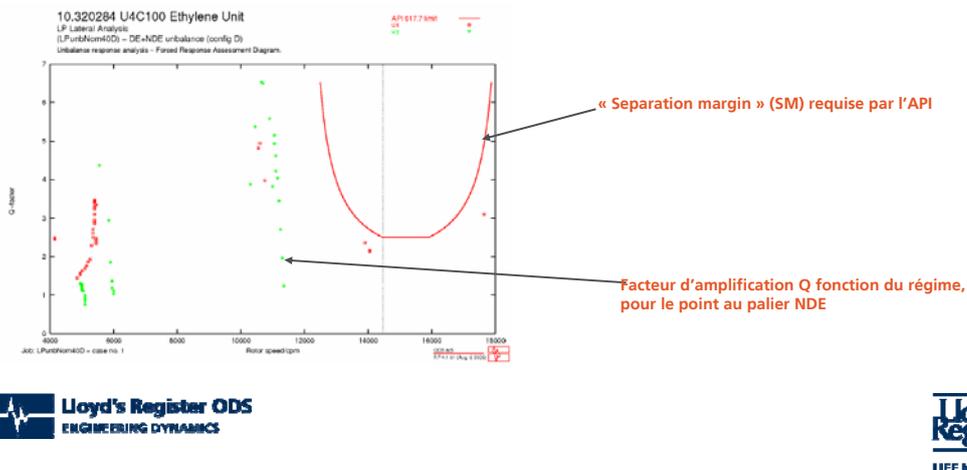
Cas d'un balourd conique



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Diagramme d'évaluation de la réponse à l'effort

Calcul pour un balourd en opposition de phase entre DE et NDE



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Variation paramétrique:

### 1. Sensibilité à la charge

LP compressor	NC1 [cpm]	AF1 [.]	SM1 [%]	R. SM [%]	NC2 [cpm]	AF2 [.]	SM2 [%]	R. SM [%]	NC3 [cpm]	AF3 [.]	SM3 [%]	R. SM [%]
Min. preload	5400	3.03	62.7	5.8	10500	6.2	27.4	13.4	16850	> 2.5	16.5	-
Nom. preload	5450	3.29	62.3	7.5	10500	6.2	27.4	13.4	17650	3.1	22.1	16.4
Max. preload	5550	3.67	61.6	9.2	10550	6.21	27	13.4	18100	4.47	25.2	21.3

**SENSIBILITE FAIBLE**

### 2. Sensibilité au désalignement

L1: 870 N, vertical (standard) / L2: 1600 N, vertical / L3: 400 N, vertical / L4: 800 N, horizontal + vertical

LP compressor	NC1 [cpm]	AF1 [.]	SM1 [%]	R. SM [%]	NC2 [cpm]	AF2 [.]	SM2 [%]	R. SM [%]	NC3 [cpm]	AF3 [.]	SM3 [%]	R. SM [%]
Initial	5450	3.29	62.3	7.5	10500	6.2	27.4	13.4	17650	3.1	22.1	16.4
L2	5700	4.56	60.6	11.4	11250	3.64	22.2	9.0	18300	8.11	26.6	24.4
L3	4300	1.24	70.3	-	10600	9.86	26.7	15.0	18200	5.3	25.9	22.5
L4	5600	5.0	61.3	12.1	12500	2.95	13.6	5.3	18400	9.23	27.2	24.8

**SENSIBILITE au désalignement horizontal**

## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Variation paramétrique:

### 3. Accouplement limite la flexion de l'arbre (raideur Krx, Kry en extrémité)

K5: 1 E5 N/rad / K6: 1 E7 N/rad / K7: 1 E8 N/rad

LP compressor	NC1 [cpm]	AF1 [.]	SM1 [%]	R. SM [%]	NC2 [cpm]	AF2 [.]	SM2 [%]	R. SM [%]	NC3 [cpm]	AF3 [.]	SM3 [%]	R. SM [%]
Initial	5450	3.29	62.3	7.5	10500	6.2	27.4	13.4	17650	3.1	22.1	16.4
K5	4800	1.53	68.2	-	11000	6.13	23.9	13.3	17350	3.28	20	17.6
K7	4700	1.59	67.5	-	11650	6.44	19.4	13.5	17150	3.03	18.6	15.6
K8	4750	1.61	67.2	-	11650	6.43	19.4	13.5	17100	3.01	18.3	15.6

**SENSIBILITE FAIBLE**

### 4. Accouplement transfère une partie de la charge radiale sur l'autre arbre

(raideur radiale Kxx, Kyy en extrémité)

B1: 5 E6 N/m / B2: 1 E7 N/m / B3: 5 E7 N/m

LP compressor	NC1 [cpm]	AF1 [.]	SM1 [%]	R. SM [%]	NC2 [cpm]	AF2 [.]	SM2 [%]	R. SM [%]	NC3 [cpm]	AF3 [.]	SM3 [%]	R. SM [%]
Initial	5450	3.29	62.3	7.5	10500	6.2	27.4	13.4	17650	3.1	22.1	16.4
B1	5000	2.9	65	4.9	11900	6.56	17.7	13.7	17400	3.73	20.3	19.4
B2	5350	2.98	63	5.5	12700	6.96	12.2	13.9	17400	4.08	20.3	20.5
B3	6000	4.8	58.5	11.8	14800	6.65	2.35	13.7	18050	7.17	24.8	24

**SENSIBILITE FORTE**

## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Variation paramétrique:

6. Influence des étanchéités à huile (fonctionnement type palier)  
Modélisé par des paliers à chaque emplacement des joints à huile.

O1: 1 E7 N/m / O2: 5 E7 N/m / O3: 1 E8 N/m)

LP compressor	NC1 [cpm]	AF1 [.]	SM1 [%]	R. SM [%]	NC2 [cpm]	AF2 [.]	SM2 [%]	R. SM [%]	NC3 [cpm]	AF3 [.]	SM3 [%]	R. SM [%]
Initial	5450	3.29	62.3	7.6	10500	6.2	27.4	13.4	17650	3.1	22.1	16.4
O1	6200	3.7	57.1	9.3	11450	6.16	20.8	13.4	17700	3.98	22.4	20.2
O2	5600	19.5	61.3	16.1	13950	7.73	3.53	14.3	18550	7.22	28.3	24.0
O3	6400	44	55.7	16.6	16550	9.73	14.5	14.9	19400	13.4	34.2	25.6

**FORTE SENSIBILITE**

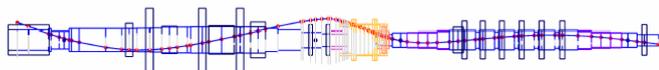
## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Variation paramétrique: modélisation du train en intégrant le rotor de l'arbre compresseur haute pression (sensibilité à la friction dans l'accouplement)  
Cas 1: normal / Cas 2: accouplement bloqué / Cas 3: accouplement bloqué et désalignement

LP compressor	NC1 [cpm]	AF1 [.]	SM1 [%]	R. SM [%]	NC2 [cpm]	AF2 [.]	SM2 [%]	R. SM [%]
case 1	4650	2	67.8	-	11100	5	23.2	12.1
case 2	5550	3.47	63.3	8.4	14150	3.6	2.1	8.9
case 3	6300	4.0	56.4	10.2	15300	4.5	5.8	13.0

HP-LP Lateral Calculation  
Complete Model - locked coupling - NDE unbalance (config C)

elements, Deflected Shape @ 14300 rpm  
Subcase no 247



calcul de réponse réalisé dans le cas de balourd le plus défavorable

Un défaut mécanique avéré est nécessaire pour générer les fortes amplitudes vibratoires au niveau du palier NDE.

Un problème au niveau de l'accouplement à denture (blocage ou friction excessive), ou une friction importante aux niveau des étanchéités à huile, permettent de simuler correctement le comportement de l'arbre lors du défaut.

Le désalignement horizontal est un facteur aggravant

## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Validation du nouveau design:

### Accouplement à denture (initiale) entre HP et LP

LP compressor	NC1 [cpm]	AF1 [.]	SM1 [%]	R. SM [%]	NC2 [cpm]	AF2 [.]	SM2 [%]	R. SM [%]	NC3 [cpm]	AF3 [.]	SM3 [%]	R. SM [%]
Min. preload	5400	3.03	62.7	5.8	10500	6.2	27.4	13.4	16850	> 2.5	16.5	-
Nom. preload	5450	3.29	62.3	7.5	10500	6.2	27.4	13.4	17650	3.1	22.1	16.4
Max. preload	5550	3.67	61.6	9.2	10550	6.21	27	13.4	18100	4.47	25.2	21.3

### Accouplement type diaphragme entre HP et LP

LP compressor	NC1 [cpm]	AF1 [.]	SM1 [%]	R. SM [%]	NC2 [cpm]	AF2 [.]	SM2 [%]	R. SM [%]	NC3 [cpm]	AF3 [.]	SM3 [%]	R. SM [%]
Min. preload	5400	3.05	62.7	6	10950	5.61	24.3	12.9	17500	2.79	21	13.9
Nom. preload	5500	3.23	62.3	7	11000	5.65	23.9	13	17800	3.86	23.8	19.9
Max. preload	5550	3.67	61.6	9.3	11120	6.17	22.5	13.4	18150	4.86	25.5	12

Comportement similaire avec les 2 accouplement

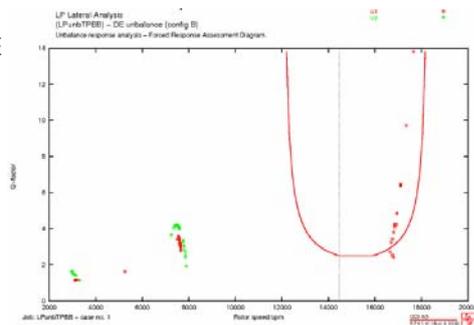
Paliers "lemon " assez sensibles au désalignement : le client souhaite évaluer le potentiel des paliers à patins oscillants.

## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Validation du nouveau design:

accouplement type patins oscillants coté NDE

	NDE Bearing
Shaft diameter [mm]	Ø60.000
Bearing length [mm]	35
Number of pads	4 (LBP)
Compressor speed [rpm]	12700
Bearing vertical load [N]	526



LP compressor	NC1 [cpm]	AF1 [.]	SM1 [%]	R. SM [%]	NC2 [cpm]	AF2 [.]	SM2 [%]	R. SM [%]	NC3 [cpm]	AF3 [.]	SM3 [%]	R. SM [%]
Nom. preload	5550	3.15	61.6	7	7650	4.2	47.1	10.7	16700	3.73	15.5	19.3

**Conclusion: Les critères API ne sont pas respectés**

## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

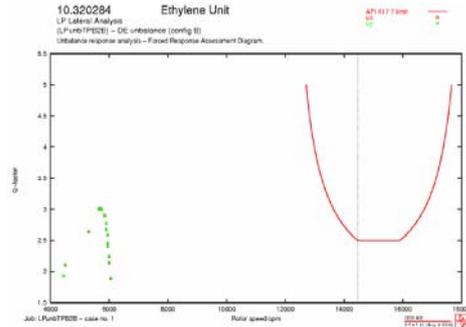
Validation du nouveau design: accouplement type patins oscillant des deux côtés, DE & NDE

Patins oscillants classiques (4 patins)

LP compressor	NC1	AF1	SM1	R. SM
	[cpm]	[.]	[%]	[%]
Nom. preload	5900	2.74	59.2	2.8

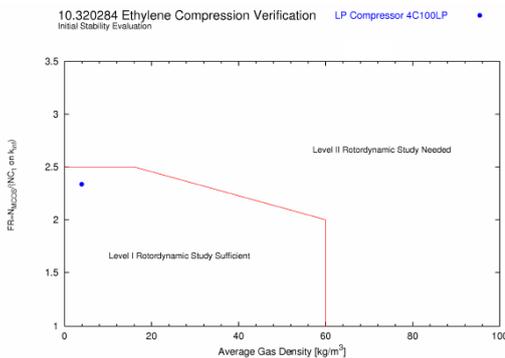
Les résultats sont identiques avec 5 patins

Avec les patins oscillants, le compresseur fonctionne entre la première et la seconde critique, avec une marge plus que significative



## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Validation du nouveau design:  
Analyse de stabilité (Fulton approach), telle que proposée dans l'API 7<sup>e</sup> édition



LP compressor	N [rpm]	P <sub>S</sub> [bara]	P <sub>D</sub> [bara]	1 <sup>st</sup> forward bending mode Frequency [Hz]	Log. dec. [-]
Max. bearing preload	14460	1	6.5	180.5	0.41
Nom. bearing preload	14460	1	6.5	180.3	0.41
Min. bearing preload	14460	1	6.5	179.4	0.42

Critère: Log dec > 0.1

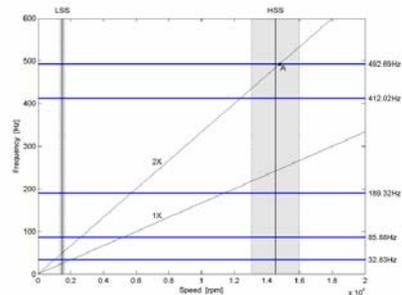
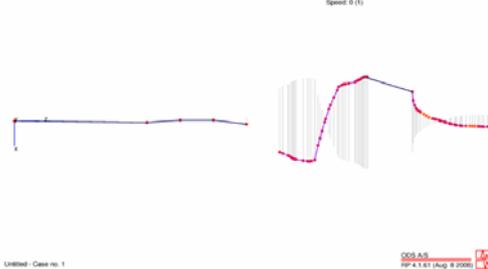
## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

Validation du nouveau design:  
Analyse de torsion

Mode	Frequency			Description
	New HS1 & HS2 coupling	New HS2 coupling	Actual coupling	
1	32.7 Hz	32.8 Hz	32.8 Hz	LS Coupling mode
2	85.7 Hz	85.9 Hz	106.9 Hz	HS2 coupling mode
3	187.4 Hz	189.3 Hz	189.8 Hz	Compressor mode
4	411.3 Hz	412.0 Hz	412.0 Hz	Compressor mode
5	488.3 Hz	492.7 Hz	485.0 Hz	Compressor mode

10.320284 U4C100 Ethylene Unit  
Torsional Analysis - Coupling upgrade

Undamped eigenvalue analysis  
mode no. 6, 402.688 Hz  
Speed 0 (r)



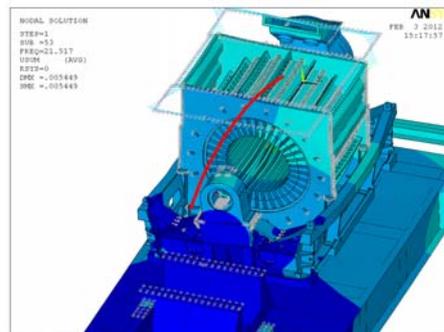
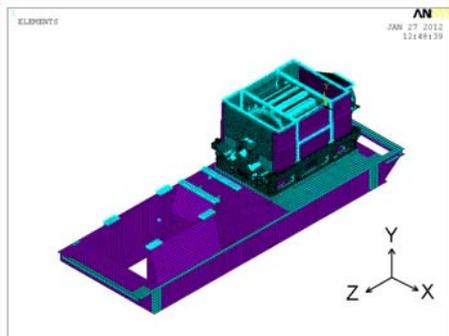
## Analyse Dynamique d'un Compresseur d'Ethylène

### Conclusion / recommandations

- Les simulations EF montrent que le comportement vibratoire au palier NDE du Compresseur BP est sensible:
  - au désalignement horizontal de l'arbre,
  - au blocage de l'accouplement à denture,
  - à un mauvais fonctionnement des étanchéités à huile qui pourraient se comporter comme des paliers.
- Le changement d'accouplement entre compresseurs BP et HP modifie peu le comportement dynamique.
- Le remplacement des deux paliers « Lemon » par des paliers à patins oscillants sur le compresseur BP modifie manière positive le comportement de l'arbre (seconde fréquence critique rejetée en dehors de la zone de fonctionnement).
- Finalement, le compresseur a été équipé de patins oscillants Turbo Components & Engineering (TCE), et d'un accouplement à diaphragme et fonctionne depuis plus d'un an sans faille.

## Influence from base frame dynamics on rotor dynamics (50 MW electrical motor in compressor train)

- Calculation of bearing pedestal impedance using a 3D model of the whole baseframe
- $[K_{ij}]$  = input of the global rotor model within RP



## Any questions?

For more information, please contact:

**Eric Augis**

Manager France

**T** +33 (0)472 13 31 41

**E** [eric.augis@lr-ods.com](mailto:eric.augis@lr-ods.com)

**w** [www.lr-ods.com](http://www.lr-ods.com)

Tour Swiss Life

1 bd Vivier Merle

69443 Lyon Cedex 03

France

**Stéphane Michel**

Consultant, Machinery Dynamics

**T** +33 (0)472 13 31 41

**E** [stephane.michel@lr-ods.com](mailto:stephane.michel@lr-ods.com)

Lloyd's Register and Lloyd's Register ODS are trading names of the Lloyd's Register Group of entities. Services are provided by members of the Lloyd's Register Group. For further information visit [www.lr.org/entities](http://www.lr.org/entities)

