

Réunion BEA-TT – 4/05/2011

Synthèse des calculs réalisés conjointement
entre le CIM/SNCF et VALDUNES:

- CIM/SNCF: M.Tomasin, SNCF: M.Lafaix
- VALDUNES: F.Fortin, F.Demilly

Sommaire (1)

- 1/ Influence de la géométrie réelle (Thionville) sur le comportement mécanique et thermomécanique de la roue ORE – 22,5t
 - *Calcul mécanique selon NF EN 13979-1 – UIC 510-5*
 - *Calculs mécanique selon NF EN 13979-1 – UIC 510-5 + charges axiales majorées*
 - *Positionnement des zones de toile brute*
 - *Influence du freinage sur le comportement thermo - mécanique*
 - Freinage de maintien
 - Freinage d'urgence

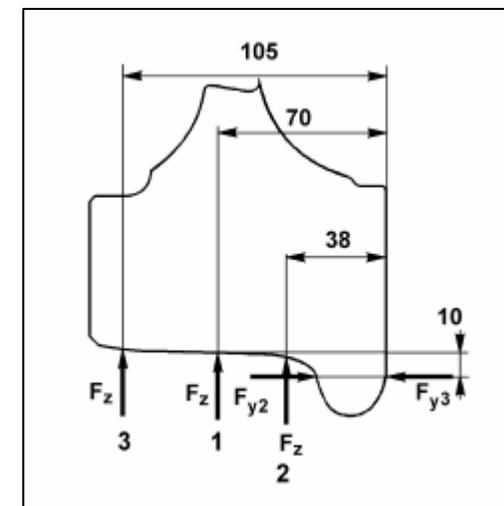
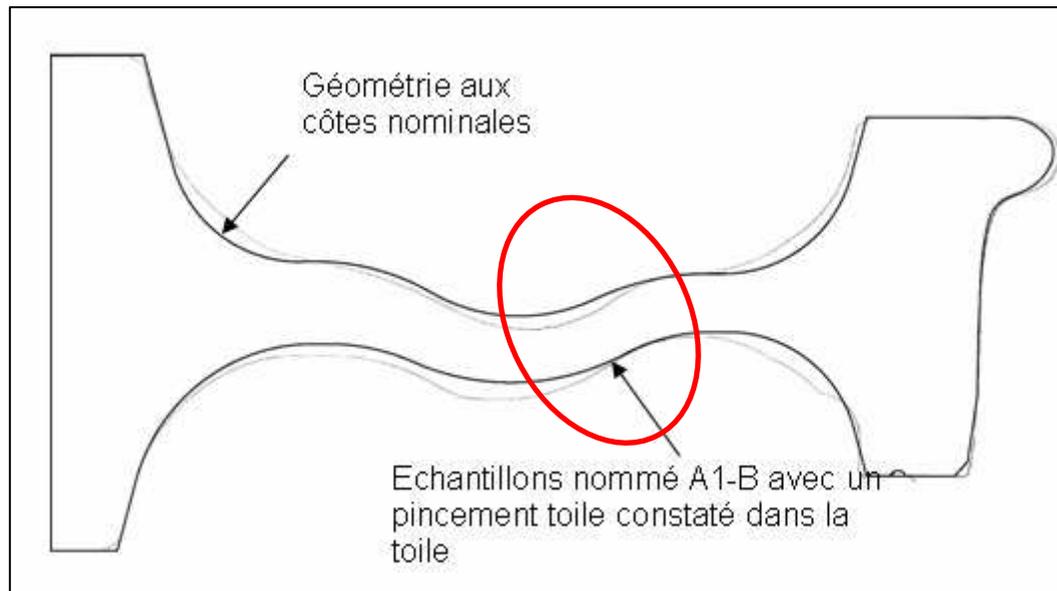
Sommaire (2)

- 2/ Influence des chargements non-conventionnels sur le comportement mécanique de la roue ORE, profil réel Thionville
 - *Influence d'un sous écartement de voie*
 - *Influence des freins de voie*
 - Observations faites sur les faces des jantes
 - Hypothèses de calcul
 - Sollicitations des freins de voie primaire et secondaire
 - Contraintes en fatigue générées par les freins de voie primaires et secondaires
- 3/ Influence de l'occurrence des cycles sur la fragilisation de la roue

1/Influence de la géométrie réelle (Thionville) sur le comportement mécanique de la roue ORE 22,5t

- Plan de référence 10-4005-784 H, type ORE
- Calcul mécanique selon NF EN 13979-1 – UIC 510-5 (non applicable en 1995).
- Charge par essieu – 22,5t.
- Essieu non directeur.
- Comparaison roue ORE:
 - au nominal
 - Profil réel, roue Thionville à partir de 2 sections de roues (zone avec et sans pincement)
- Considération d'une zone fissurée – ext sur un diamètre de 335 mm.
- Limite de fatigue toile brute – 145 Mpa (cf rapport ERRI B169/RP9 - 11/1997 – Valeur de 141 Mpa).
- Limite élastique $R_{p0,2\%} = 406$ Mpa toile – Rapport AEF – DOC020568

1/Géométrie roue ORE au nominal vs réel Thionville (pincement)



Trois cas de chargement doivent être considérés (voir Figure 1) :

— Cas 1 : circulation en alignement (essieu centré)

$$F_z = 1,25 P$$

$$F_{y1} = 0$$

— Cas 2 : circulation en courbe (boudin plaqué contre le rail)

$$F_z = 1,25 P$$

$$F_{y2} = 0,6 P \text{ pour les essieux non directeurs}$$

$$F_{y2} = 0,7 P \text{ pour les essieux directeurs}$$

— Cas 3 : passage dans les appareils de voie (face interne du boudin appliquée sur le contre rail)

$$F_z = 1,25 P$$

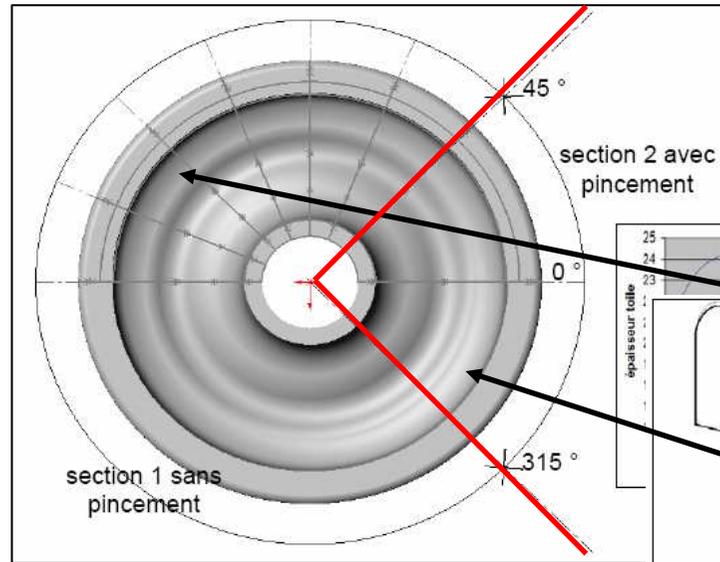
$$F_{y3} = 0,6 F_{y2} = 0,36 P \text{ pour les essieux non directeurs}$$

$$F_{y3} = 0,6 F_{y2} = 0,42 P \text{ pour les essieux directeurs}$$

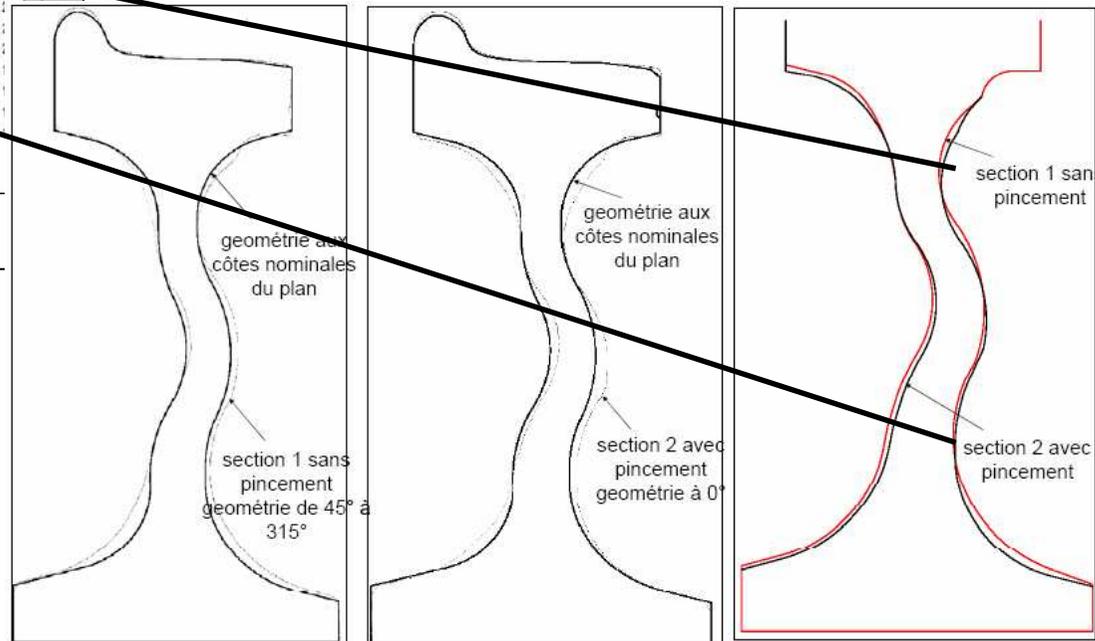
La Figure 1 donne pour le cas général, les points d'application des différentes forces .

	chargement	
	conventionnel	exceptionnel
NV	137 953 N	200 000 N
NH2	66 218 N	83 575 N
NH3	39 731 N	

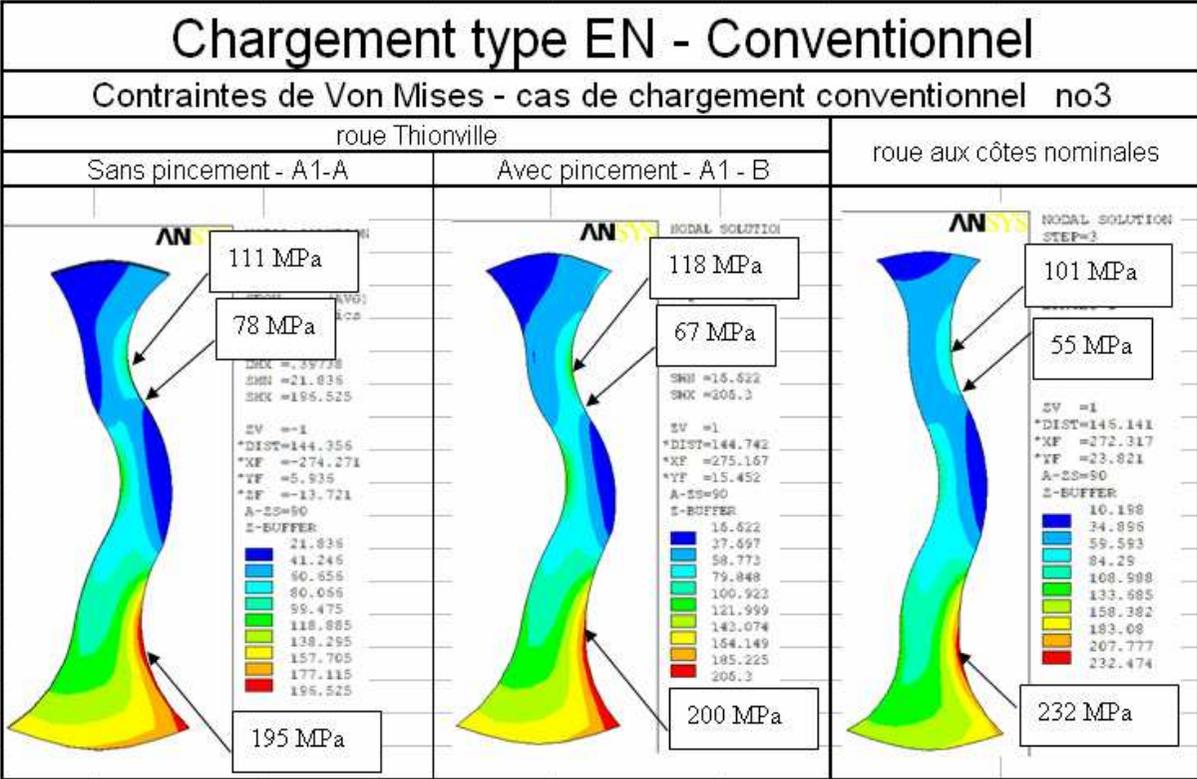
Reconstitution d'une roue avec les 2 sections, hypothèse – pincement sur 90°



	chargement	
	conventionnel	exceptionnel
NV	137 953 N	200 000 N
NH2	66 218 N	83 575 N
NH3	39 731 N	



1/Contraintes VM sur roue ORE
au nominal vs réel Thionville
(pincement) – 3D



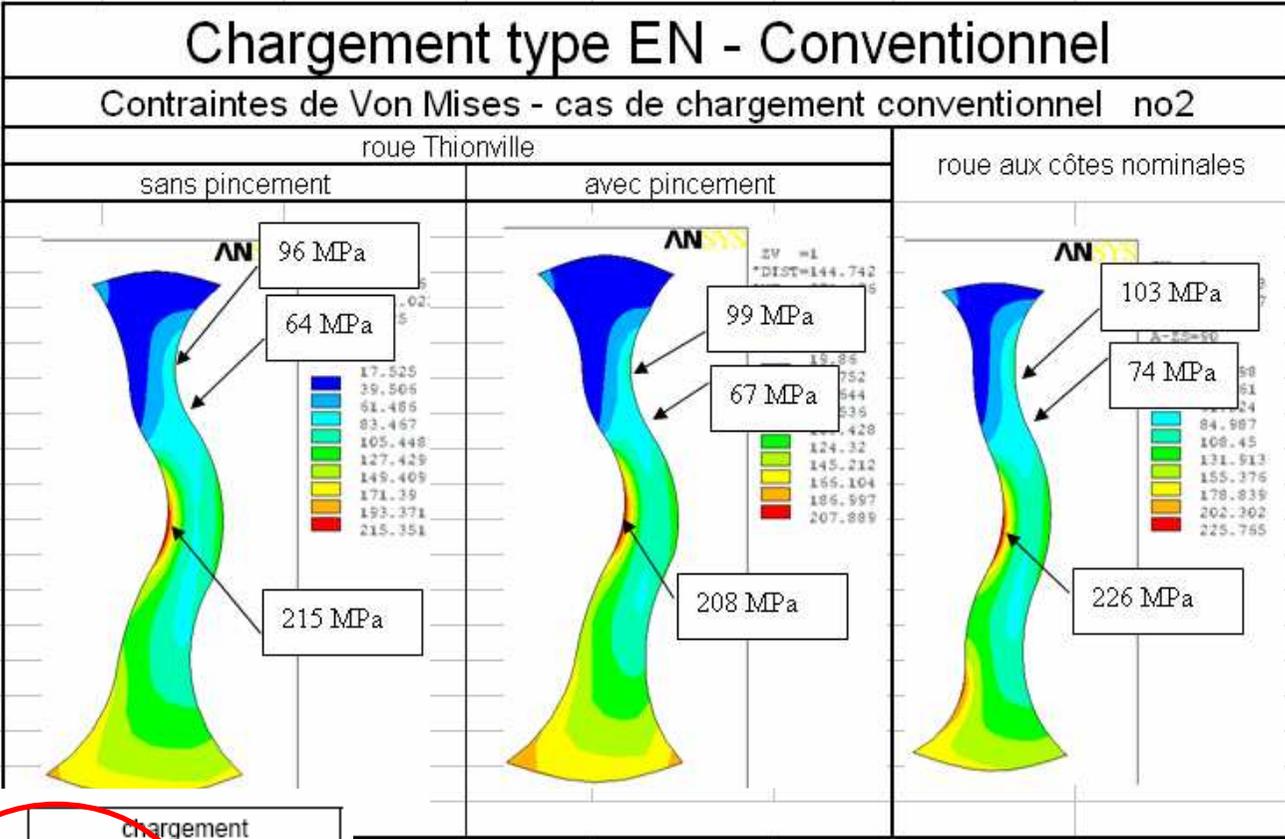
Valeur de Rp0,2%
= 406 Mpa min
dans le rapport AEF

Pas de plastification, Max en pied de toile sur roue au nominal, valeurs légèrement supérieures sur roue Thionville en zone de pincement, mais st ~ 20% de la limite

	Chargement	
	conventiennel	exceptionnel
NV	137 953 N	200 000 N
NH2	66 218 N	83 575 N
NH3	39 731 N	

Config 3 (Contre-rail) donnant la valeur max. de la zone de fissuration

1/Contraintes VM sur roue ORE
au nominal vs réel Thionville
(pincement) – 3D



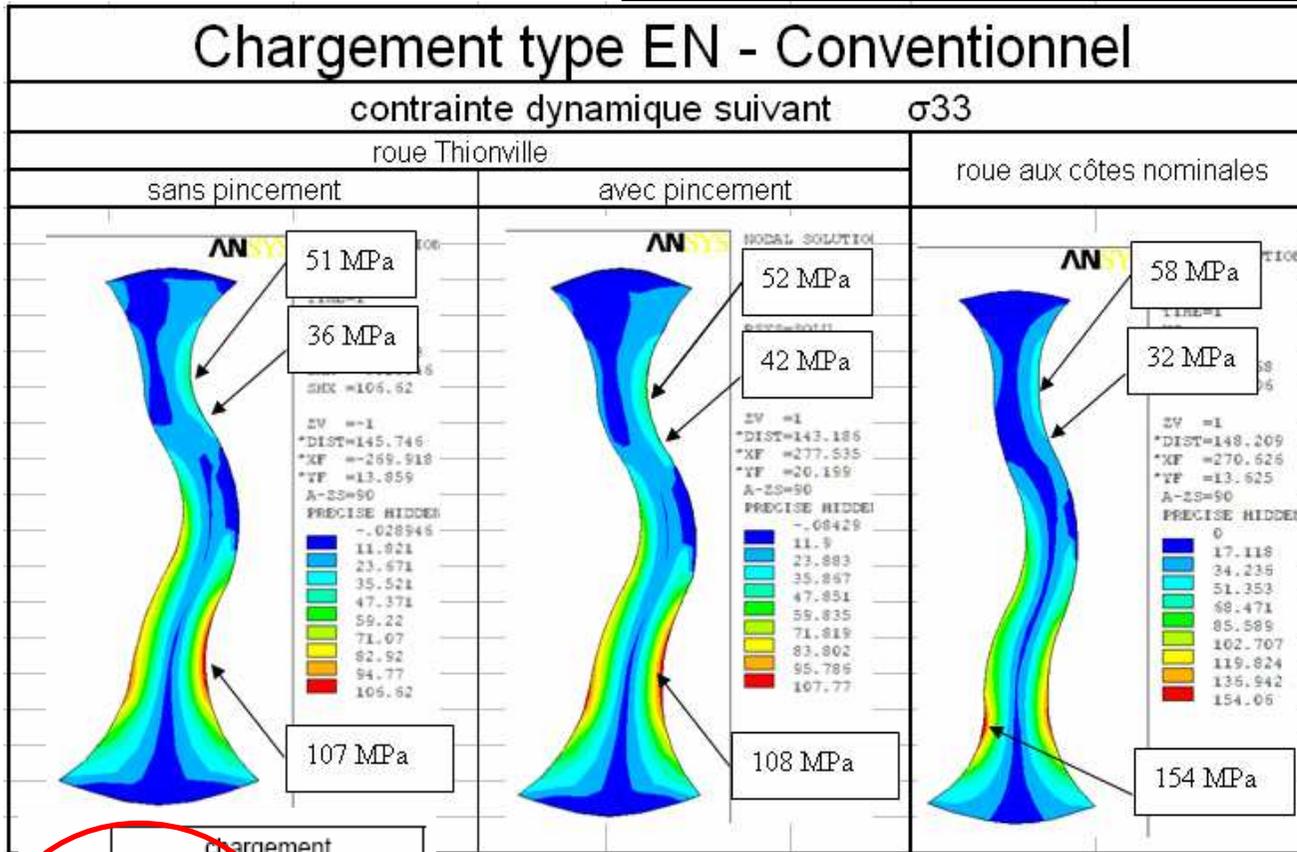
Valeur de Rp0,2%
= 406 Mpa min
dans le rapport AEF

Pas de plastification, Maxima sur la roue au nominal, valeurs inférieures sur roue Thionville

	chargement	
	conventiennel	exceptionnel
NV	137 953 N	200 000 N
NH2	66 218 N	83 575 N
NH3	39 731 N	

Config 2 (Courbe) donnant la valeur max. de la zone de fissuration

1/Contraintes fatigue sur roue
ORE au nominal vs réel Thionville
(pincement) – 3D



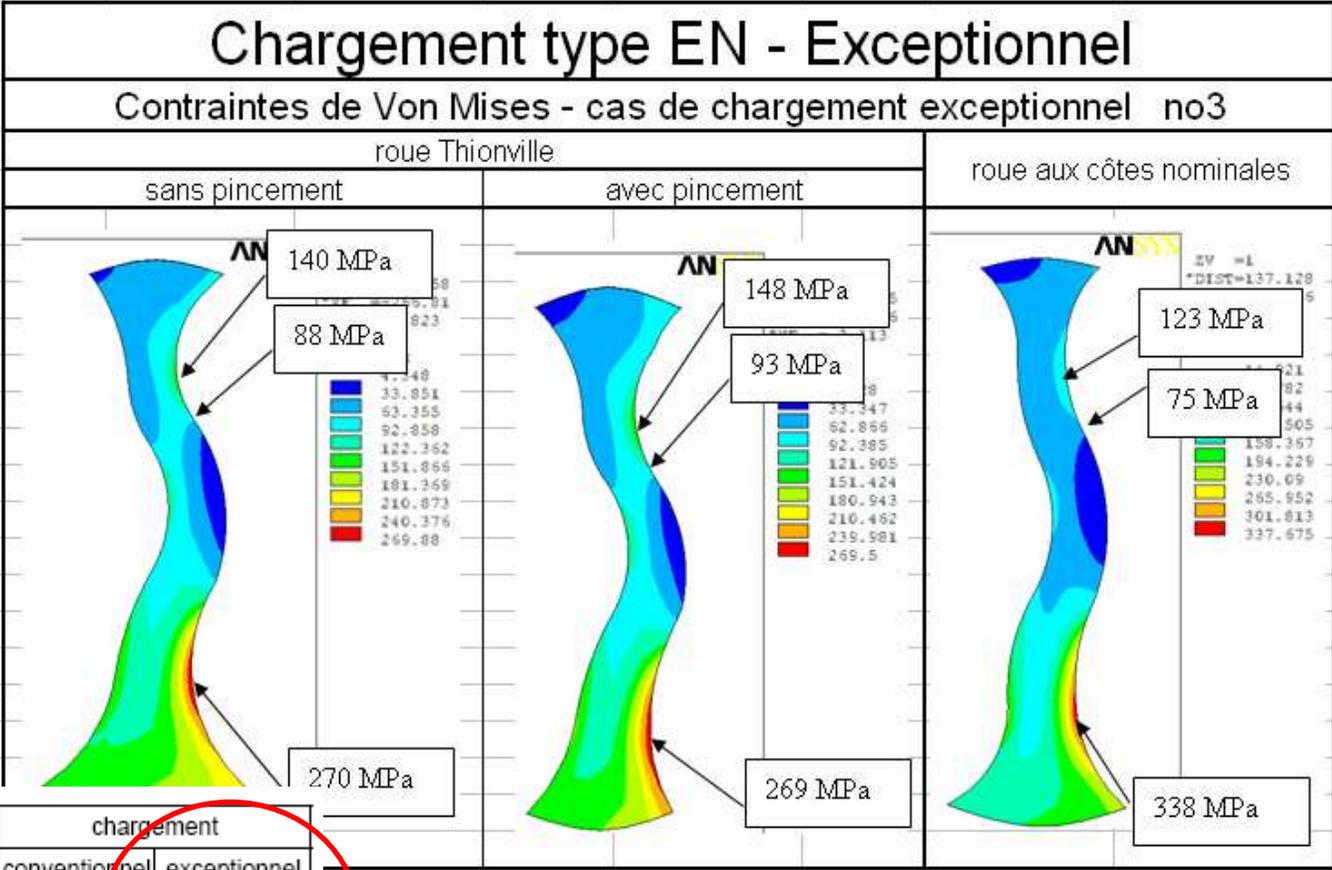
Roue ORE au nominal:
Dépassement en fatigue, zone de pied de toile (145 Mpa)

Roue ORE avec pincement:
Valeur en fatigue supérieure de 10 Mpa vs toile nominal (30% de la limite), pas de dépassement en pied de toile

	chargement	
	conventionnel	exceptionnel
NV	137 953 N	200 000 N
NH2	66 218 N	83 575 N
NH3	39 731 N	

Config. donnant les valeurs max.

1/Contraintes VM sur roue ORE
au nominal vs réel Thionville
(pincement) – 3D



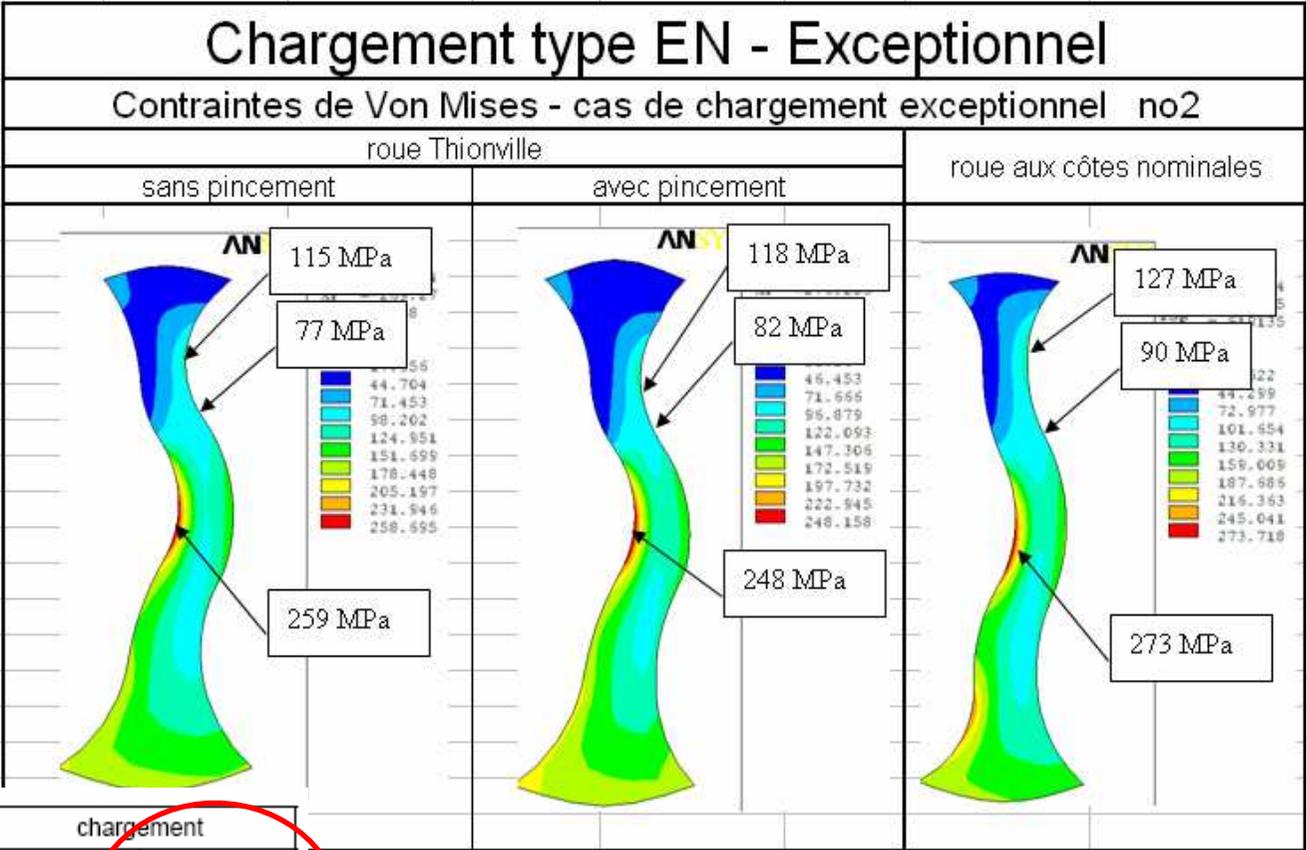
Valeur de Rp0,2%
= 406 Mpa min
dans le rapport AEF

Pas de plastification, Valeurs nettement supérieures sur la roue ORE nominal, +25% en pied de toile. Valeurs supérieures roue Thionville - pincement, +24% mais 23% de la limite

Config 3 (Contre rail) donnant la valeur max. de la zone de fissuration

← Cas UIC 510-5

1/Contraintes VM sur roue ORE
au nominal vs réel Thionville
(pincement) – 3D



Valeur de Rp0,2%
= 406 Mpa min
dans le rapport AEF

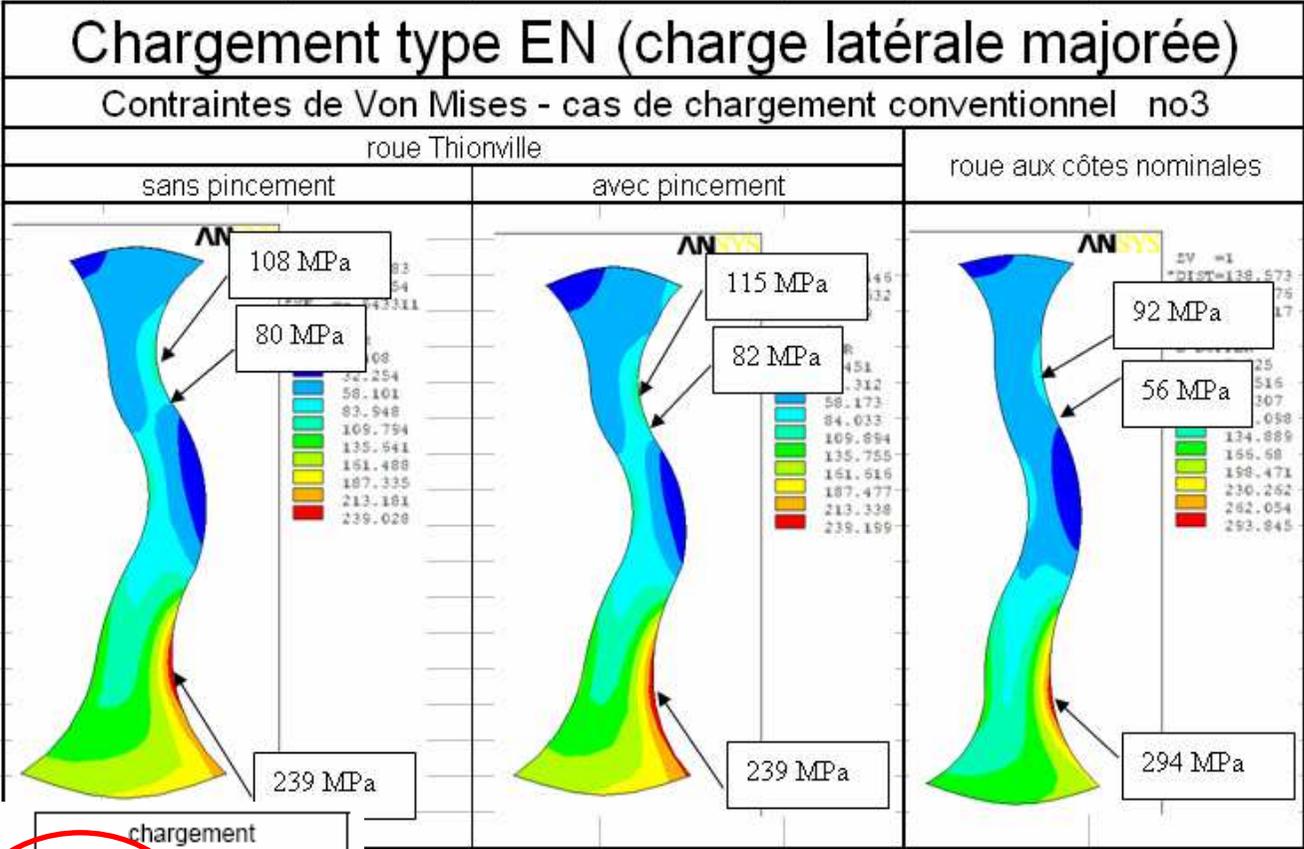
Pas de plastification, Valeurs supérieures sur la roue ORE au nominale en pied de toile et en zone de pincement

	chargement	
	conventionnel	exceptionnel
NV	137 957 N	200 000 N
NH2	66 218 N	83 575 N
NH3	39 731 N	

← Cas UIC 510-5

Config 2 (Courbe) donnant la valeur max. de la zone de fissuration

1/Contraintes VM sur roue ORE
au nominal vs réel Thionville
(pincement) – 3D



Valeur de Rp0,2%
= 406 Mpa min
dans le rapport AEF

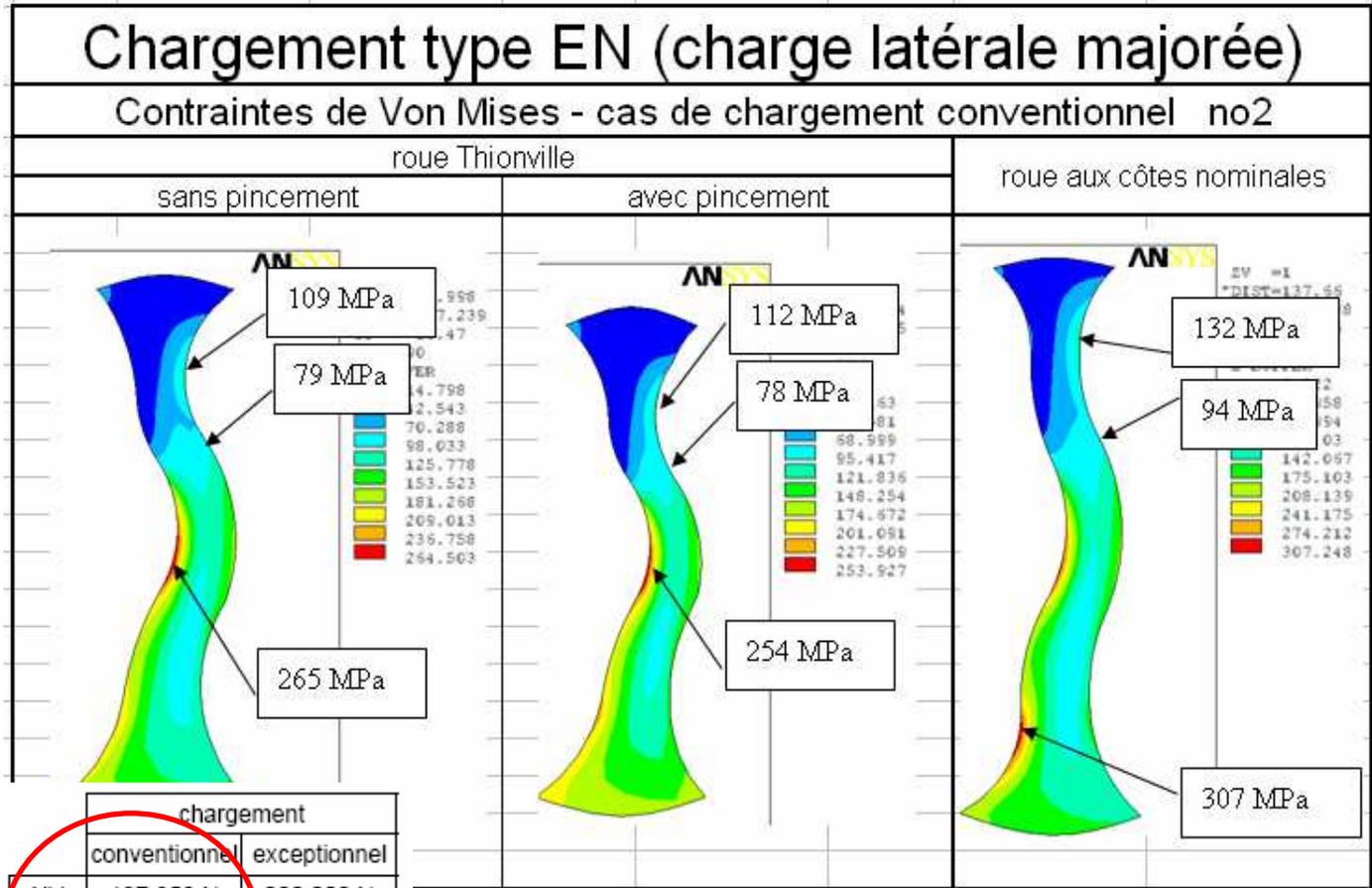
Pas de plastification, Valeurs supérieures sur la roue ORE nominal en pied de toile. Valeurs supérieures roue Thionville - pincement, + 46% mais 20% de la limite

	chargement	
	conventionnel	exceptionnel
NV	137 953 N	200 000 N
NH2	117 720N	
NH3	70 632 N	83 575 N

Config 3 (Contre rail) donnant la valeur max. de la zone de fissuration

+78% sur NH2 et NH3

1/Contraintes VM sur roue ORE
au nominal vs réel Thionville
(pincement) – 3D



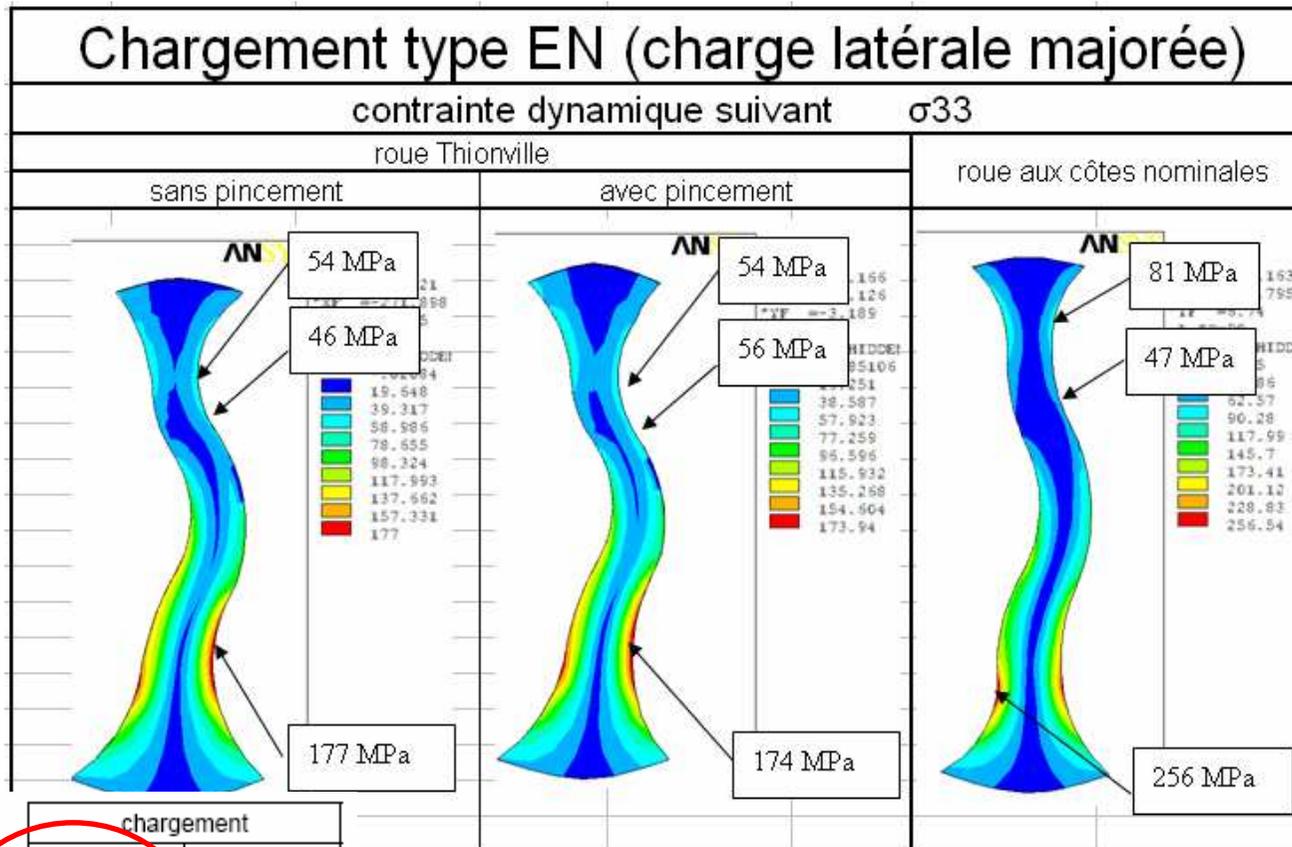
Valeur de Rp0,2%
= 406 Mpa min
dans le rapport AEF

Pas de plastification, Valeurs supérieures en pied de toile et zone de fissuration, sur la roue ORE au nominal

	chargement	
	conventionnel	exceptionnel
NV	137 953 N	200 000 N
NH2	117 720 N	
NH3	70 632 N	83 575 N

Config 2 (Courbe) donnant la valeur max. de la zone de fissuration

1/Contraintes fatigue sur roue
ORE au nominal vs réel Thionville
(pincement) – 3D



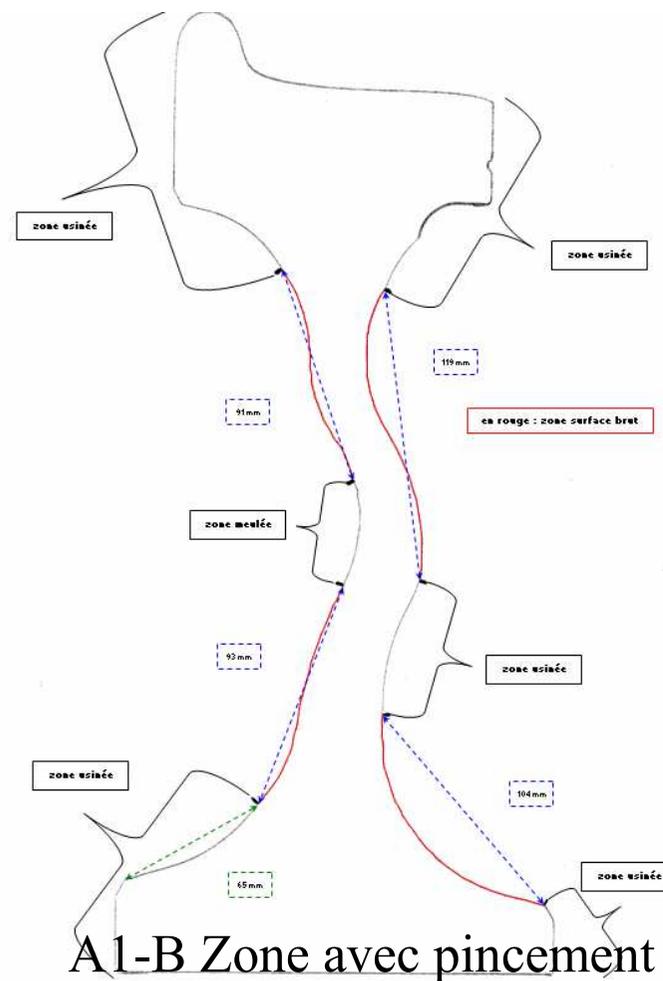
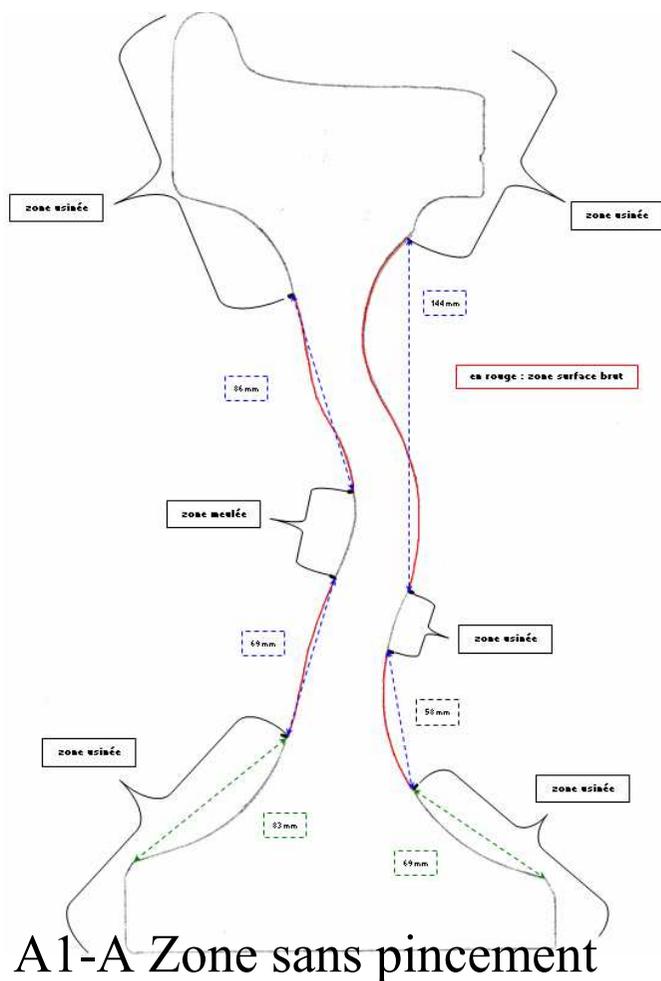
Valeur de $R_{p0,2\%}$
= 406 Mpa min
dans le rapport AEF

Dépassement de la limite de fatigue en pied de toile, 256 Mpa (+77%), pour la roue au nominal et roue Thionville(+22%)
Valeur supérieure dans le rayon toile 81 Mpa, roue au nom. .Valeur supérieure dans la zone de pincement Thionville +19% (39% de la limite)

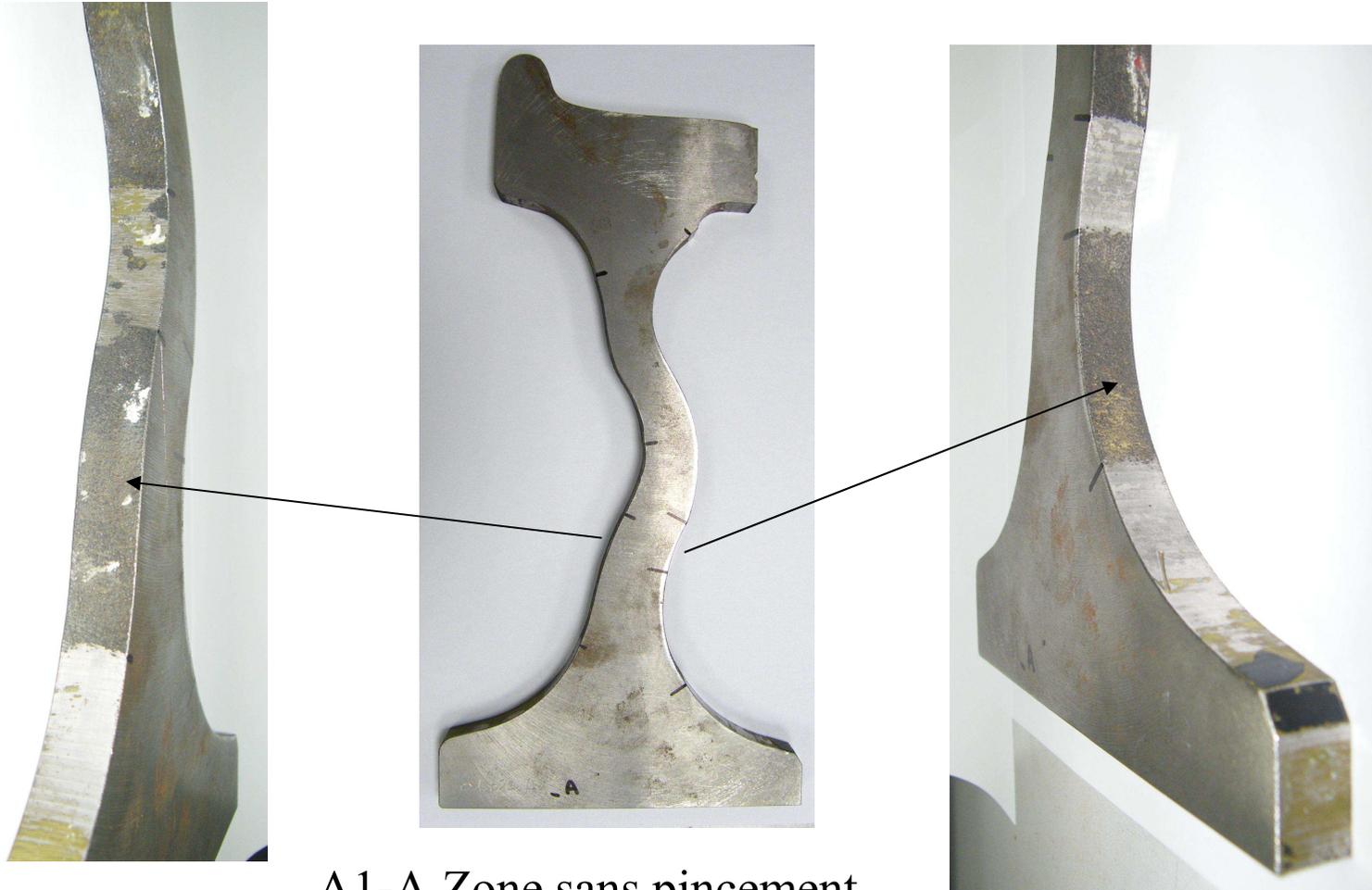
	chargement	
	conventionnel	exceptionnel
NV	137 953 N	200 000 N
NH2	117 720 N	
NH3	70 632 N	83 575 N

Config. donnant les valeurs max.

1/Positionnement des zones de toile brute sur les roues Thionville

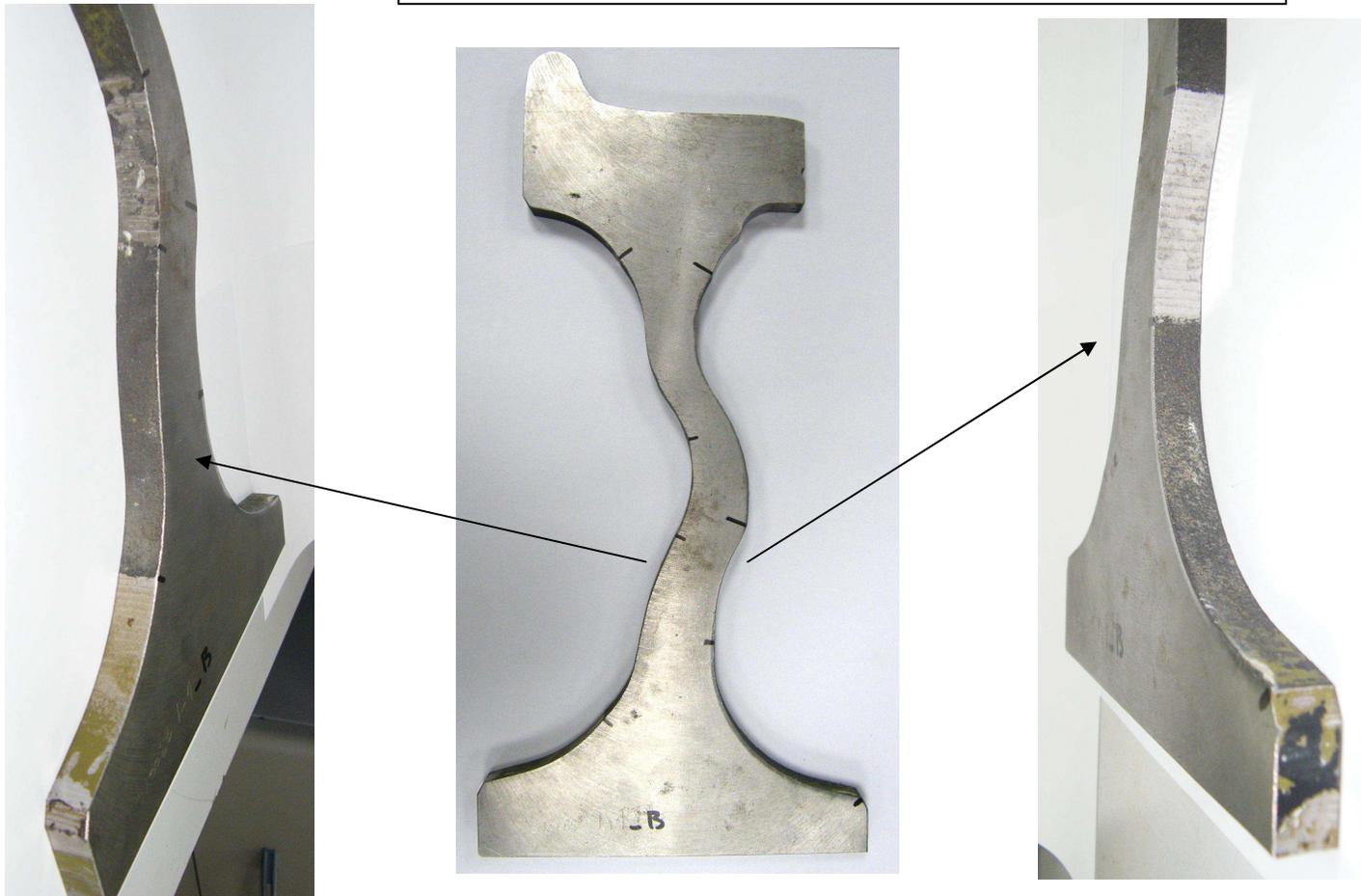


1/Positionnement des zones de
toile brute sur les roues Thionville



A1-A Zone sans pincement

1/Positionnement des zones de
toile brute sur les roues Thionville

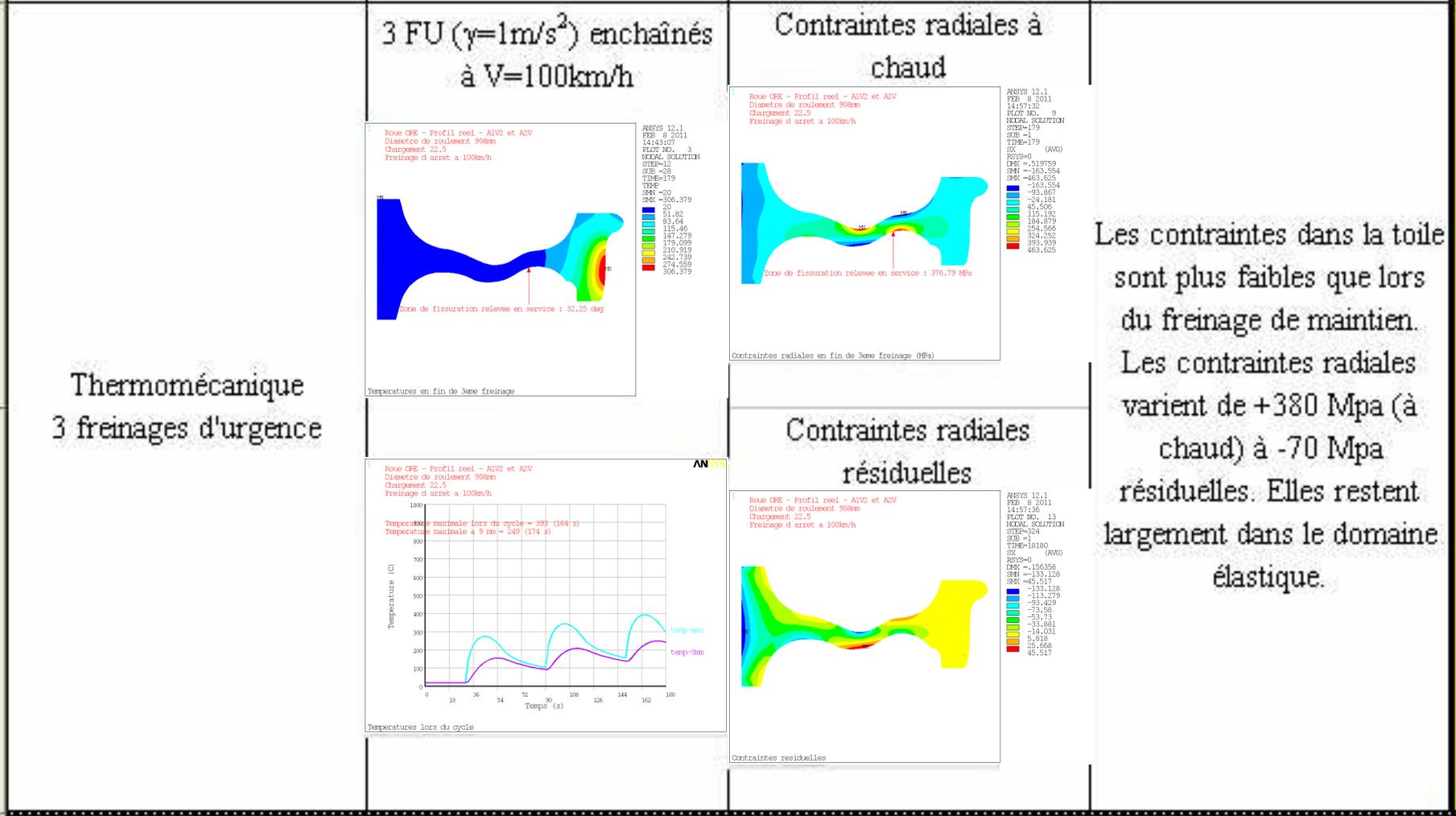


A1-B Zone avec pincement

Conclusions – calculs mécaniques charges conventionnelles et charges axiales majorées

- La zone de pied de toile est la plus contrainte, en particulier sur la roue au nominal
- La roue avec pincement Thionville ne conduit pas à des majorations de contraintes. Le défaut géométrique ne fragilise pas la structure de la roue
- L'augmentation de la charge axiale conduit principalement à une augmentation des contraintes dans le pied de toile, sans dépassement de la limite de 145 Mpa dans la zone de pincement (39% max de la limite)
- Les efforts exceptionnels ne conduisent pas à une plastification de la toile
- Le chargement conventionnel seul ou majoré axialement ne conduit pas à une sur-contrainte en zone de pincement

1/Contraintes liées au freinage d'urgence (3 freinages)

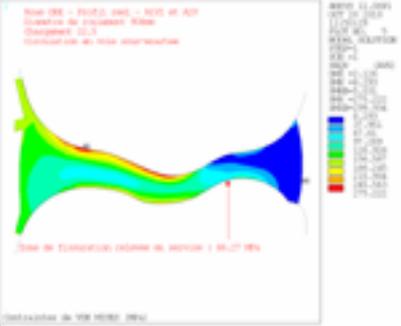


Les contraintes dans la toile sont plus faibles que lors du freinage de maintien. Les contraintes radiales varient de +380 Mpa (à chaud) à -70 Mpa résiduelles. Elles restent largement dans le domaine élastique.

Conclusions – calculs thermiques

- Le milieu de toile est le plus contraint.
- Les contraintes radiales dans la zone de fissuration restent dans le domaine élastique.
- Le delta de contrainte peut favoriser la propagation d'une fissure déjà initiée, en particulier pour le freinage de maintien (adapté).

2/Influence des chargements non conventionnels: Contraintes liées au sous écartement

<p>Mécanique - chargement exceptionnel Passage en voie sous écartée</p>	<p>Resserrement des faces internes de 5mm (Ea=1421mm) et de 10mm (Ea=1426mm)</p>		<p>Le passage en voies sous écartées augmentent les contraintes en pied de toile. Le limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte.</p>
---	--	---	--

Pas de plastification – Contraintes de VM de 275 Mpa en pied de toile et 88 Mpa en zone de fissuration

Valeur de $R_{p0,2\%} = 406 \text{ Mpa min}$ dans le rapport AEF

Hypothèse: Resserrement des faces internes de 5 mm sur l'EM
→ effort de 80 kN à la jante (à la roue)

Conclusions – Sous écartement

- La zone de pied de toile présente le plus fort niveau de contraintes de Von Mises
- La toile ne présente pas de plastification
- Le sous-écartement est similaire au cas de chargement avec majoration de l'effort axial – le blocage de la roue restant au niveau de l'encastrement de la portée de calage

2/ Influence des freins de voie:
Observations faites sur les roues des wagons citernes

ANNEXE 4 : autres constatations
Présence de marques profondes sur faces internes



Usure atypique des faces internes



Usure en sifflet de la face interne

Traces de friction
sur les faces
externes des jantes



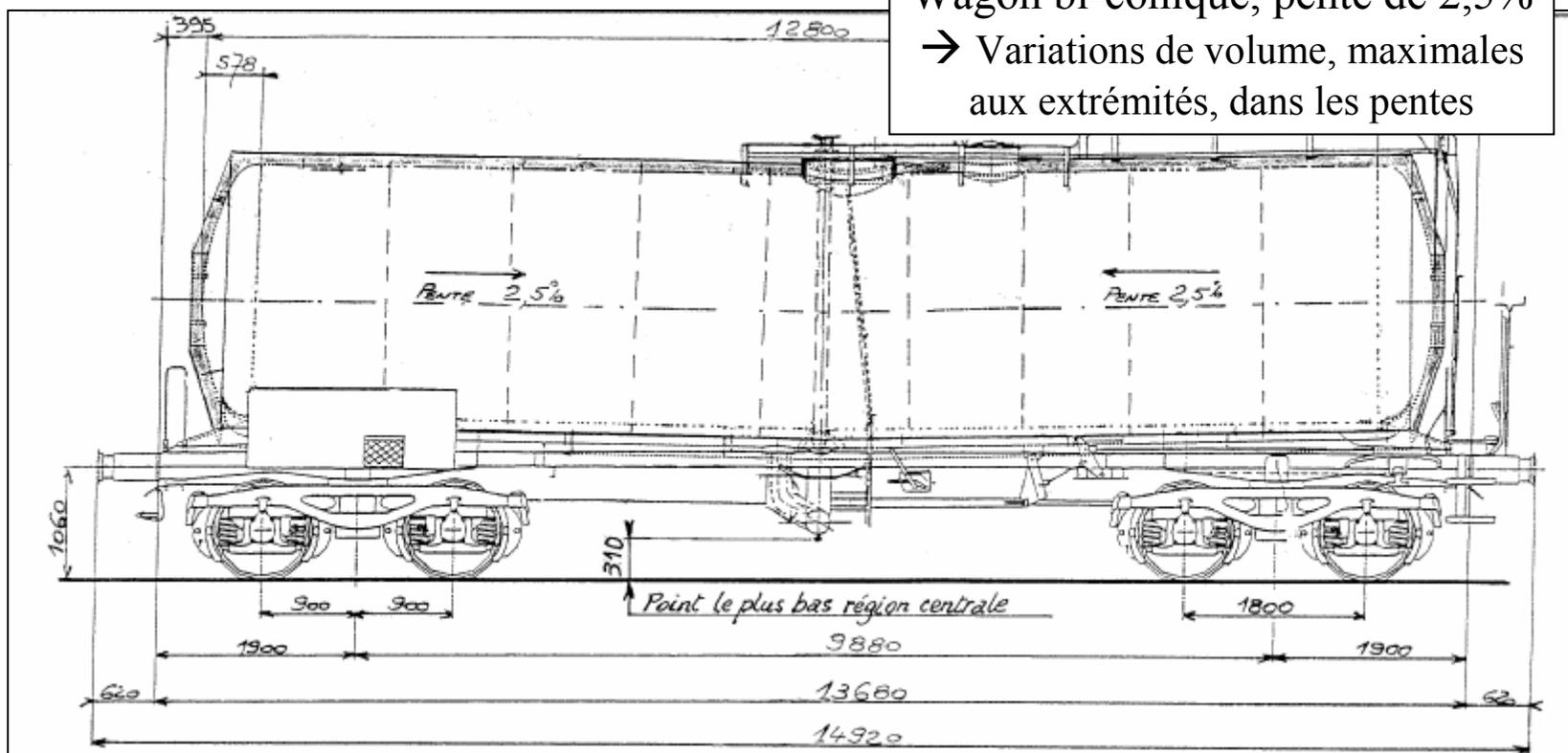
Usure atypique sur les
faces internes

2/ Conditions de passage dans les freins de voies

- Descente de la butte de triage, passage en courbe, freinage sur le premier frein de voie, 9 m/s → 5 m/s – Serrage des deux files de roues.
- Deuxième courbe, freinage final sur le deuxième frein de voie permettant une vitesse quasi nulle au contact du wagon en stationnement – Serrage d'une seule file de roues.

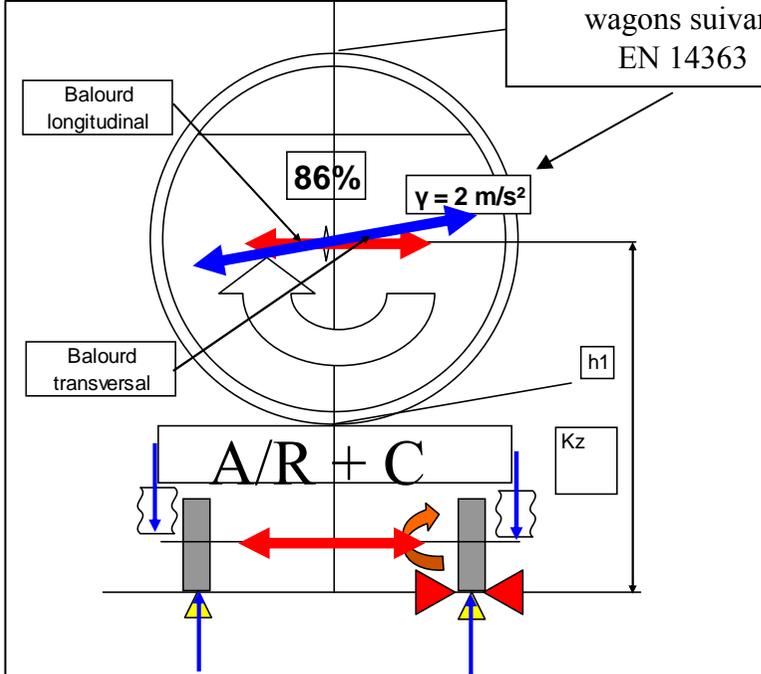
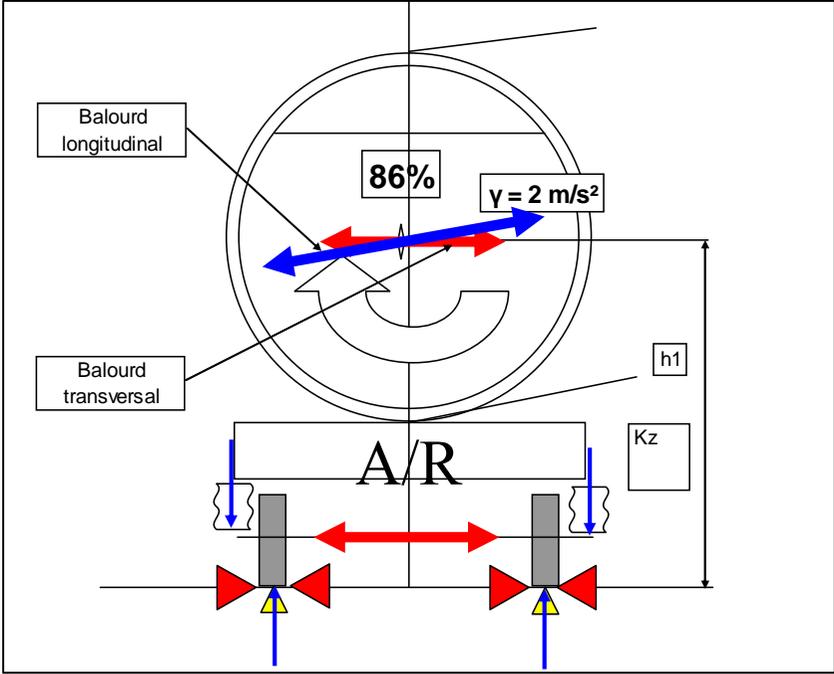
2/Wagon produits chimiques – 70 m³

Wagon bi-conique, pente de 2,5%
 → Variations de volume, maximales aux extrémités, dans les pentes



2/ Sollicitations au frein de voie primaire (FVP) et secondaire (FVS)

Valeur limite de γ pour l'homologation des wagons suivant EN 14363



Frein de voie primaire – mvt du fluide L&T + blocage des 2 files

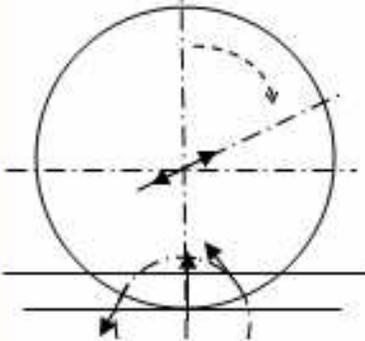
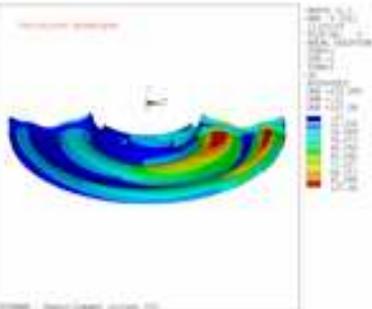
Frein de voie secondaire – mvt du fluide L&T + blocage 1 file

2/Contraintes de fatigue liées au balourd longitudinal sur FVP

<p>Valeur établie pour $\gamma = 2m/s^2$</p> <p>Effort de serrage du frein de voie</p>	<p>Fatigue mécanique Chargement conventionnel + balourd citerne (4t) longitudinal en frein de voie (150kN)</p> <p>ALLER</p>		<p>- zone de fissuration : 58 MPa</p>	<p>Le balourd longitudinal de la citerne en frein de voie ne générerait pas de contraintes inacceptables.</p>
<p>Circulation dans les 2 sens pour le calcul en fatigue</p>	<p>Fatigue mécanique Chargement conventionnel + balourd citerne (4t) longitudinal en frein de voie primaire (150kN)</p> <p>ALLER/RETOUR</p>		<p>- zone de fissuration : 61 Mpa - maxi toile : 107 (P)</p>	<p>Le passage en frein de voie primaire (avec balourd longitudinal de la citerne) ne générerait pas de contraintes inacceptables.</p>

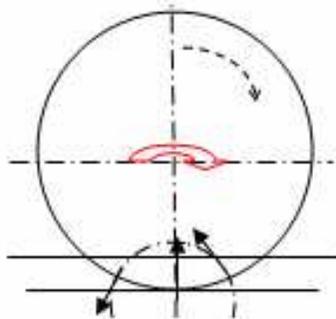
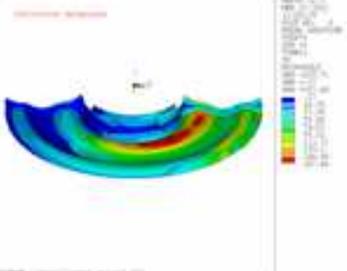
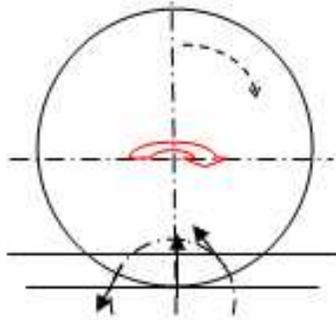
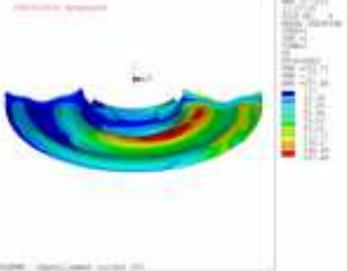
FVP – Balourd longitudinal (4t) –Mouvement A seul et A/R

2/Contraintes de fatigue liées au balourd longitudinal/transversal sur FVP

<p>Fatigue mécanique Chargement conventionnel + balourd citerne (4t) longitudinal et transversal en frein de voie primaire (150kN) <u>ALLER</u></p>		 <p>- zone de fissuration : 91 MPa</p>	<p>Le balourd longitudinal et transversal de la citerne cumulé au passage en frein de voie primaire génèrerait des contraintes inacceptables.</p>
--	--	---	---

FVP – Balourd longitudinal et transversal (4t) – Mouvement A seul

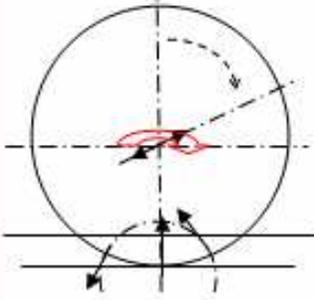
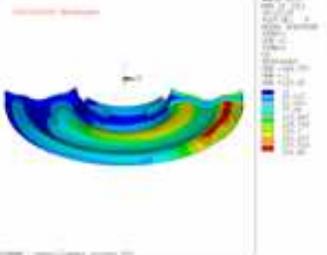
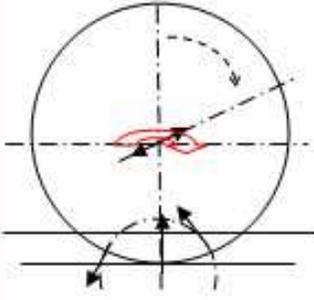
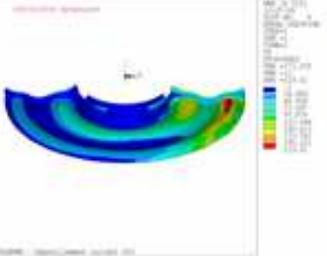
2/Contraintes de fatigue liées au balourd longitudinal FVP et FVS

<p>Fatigue mécanique Chargement conventionnel + balourd citerne (4t) longitudinal en frein de voie secondaire (100kN + 31kNm)</p> <p><u>ALLER/RETOUR</u></p>		 <p>- zone de fissuration : 71 Mpa - maxi toile : 167 (P)</p>	<p>Le passage en frein de voie secondaire (avec balourd longitudinal de la citerne) génèrerait des contraintes inacceptables en pied de toile.</p>
<p>Fatigue mécanique Chargement conventionnel + balourd citerne (4t) longitudinal en frein de voie primaire (150kN) puis secondaire (100kN + 31kNm)</p> <p><u>ALLER/RETOUR</u></p>		 <p>- zone de fissuration : 105 Mpa - maxi toile : 167 (P)</p>	<p>Le passage en frein de voie primaire puis secondaire (avec balourd longitudinal de la citerne) génèrerait des contraintes inacceptables dans la zone de fissuration et en pied de toile (max en pied de toile).</p>

FVS – Balourd longitudinal (4t) –Mouvement A/R

FVP + FVS – Balourd longitudinal (4t) – Mouvement A/R



<p>Fatigue mécanique Chargement conventionnel + balourd citerne (4t) longitudinal et transversal en frein de voie secondaire (100kN + 31kNm) <u>ALLER/RETOUR</u></p>		 <p>- zone de fissuration : 204 Mpa - maxi toile : 233 (T)</p>	<p>Le passage en frein de voie secondaire (avec balourd longitudinal et transversal de la citerne) génèrerait des contraintes inacceptables dans la zone de fissuration et en pied de toile (max dans la zone de fissuration).</p>
<p>Fatigue mécanique Chargement conventionnel + balourd citerne (4t) longitudinal et transversal en frein de voie primaire (150kN) puis secondaire (100kN + 31kNm) <u>ALLER SEUL</u></p>		 <p>- zone de fissuration : 197 Mpa - maxi toile : 220 (T)</p>	<p>Le passage en frein de voie primaire puis secondaire (avec balourd longitudinal et transversal de la citerne) génèrerait des contraintes inacceptables dans la zone de fissuration et en pied de toile (max dans la zone de fissuration).</p>

FVS – Balourd longitudinal + transversal (4t) –Mouvement A/R
FVP + FVS – Balourd longitudinal + transversal (4t) – Mouvement A seul

- La simulation du passage en frein de voie, avec des hypothèses de chargement liées aux balourds du fluide (longitudinal et transversal), conduisent à des contraintes inacceptables dans la zone de fissuration.
- Avec ces hypothèses, on note la migration des maxima de contraintes du pied de toile vers la zone de fissuration.
- Le balourd longitudinal seul ne conduit pas à des dépassements (145 MPa) dans la zone de fissuration.

3/ Influence de l'occurrence des cycles sur la fragilisation de la roue(1)



Equation de Manson Coffin : $\Delta\varepsilon/2 = \varepsilon_f'(N^c) + ((\sigma_f' - \sigma_m)/E)(N^{bs})$

limite élastique:	$\sigma_y (Re) =$	406 MPa
résistance à la traction	$\sigma_u (Rm) =$	702 MPa
module de Young	$E =$	200 GPa
coefficient de résistance à la fatigue	$\sigma_f =$	1047 MPa
coefficient d'état de surface	$k_a =$	0,72
exposant de résistance	$b_s =$	$-1/6 \times \text{LOG}(2\sigma_f / (\sigma_u \times K_a))$
	$b_s =$	-0,103
exposant de ductilité	$c =$	-0,6
coefficient de striction	$RA =$	49%
amplitude de déformation totale :	$\Delta\varepsilon/2 =$	$(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min})/2$
contrainte moyenne:	$\sigma_m =$	$(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$
coefficient de ductilité en fatigue	$\varepsilon_f' =$	$\ln(100/(100 - \%RA)) = 0,67$

Déformation total
= déformation
plastique +
déformation
élastique

Règle de Miner : $1/N_t = \sum (n_i / N_i)$ $N_t = 1 / \sum (n_i / N_i)$

3/ Influence de l'occurrence des cycles sur la fragilisation de la roue(2)

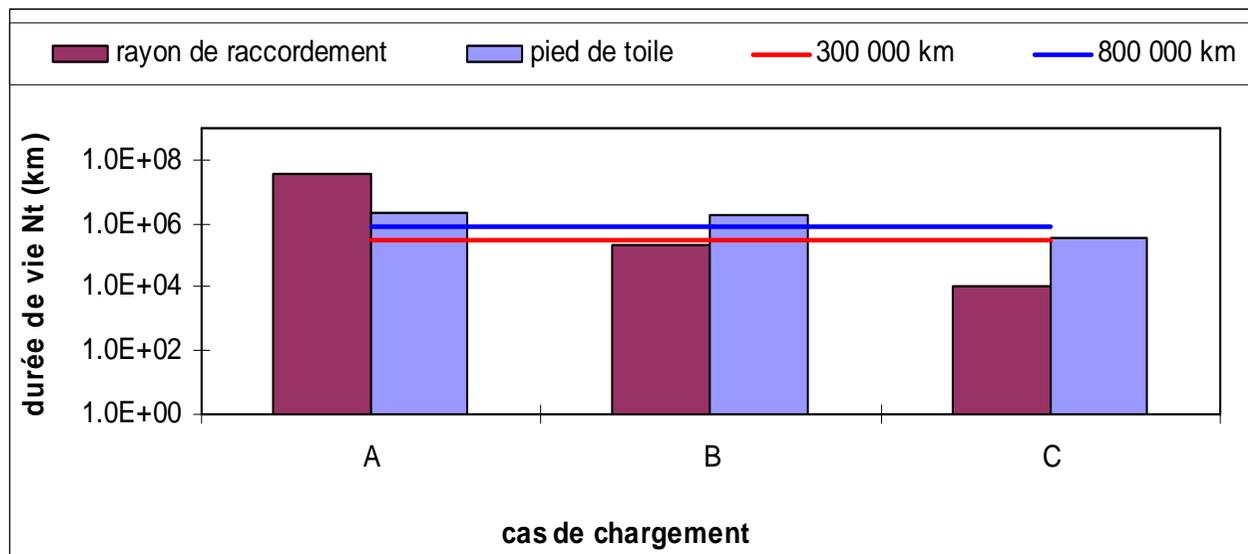
- Calcul aux éléments finis pour chaque cas de charge → détermination pour les nœuds critiques de la structure (pied de toile ou zone de fissuration) des valeurs de $\Delta\varepsilon$, $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$
- Equation de Manson Coffin : $\Delta\varepsilon/2 = \varepsilon_f(N^c) + ((\sigma_f - \sigma_m)/E)(N^{bs}) \rightarrow N_i$ et $1/N_i$ = taux d'endommagement pour le cas de chargement i
- Nombre d'occurrence du cas de chargement $i \rightarrow n_i$
- $n_i/N_i \rightarrow$ Dommage sur la période considérée lié au cas de chargement i
- Loi de cumul de dommage de MINER $\rightarrow 1/N_t = \sum (n_i/N_i)$
- Détermination de la durée de vie en fatigue $N_t = 1 / \sum (n_i/N_i)$
- Pour chaque cas de charge (ou cumul) comparaison avec le kilométrage à la rupture de la roue Thionville (300000 km) ou la durée de vie estimée (800000 km), cf graphes – échelle log en ordonnée

- *Hypothèse sur la loi de MINER – valable dans le domaine élastique*

3/ Influence de l'occurrence des cycles sur la fragilisation de la roue(3)

Hypothèses	
nombre cycle chargement mécanique conventionnel (répartition des 3 cas de charge (LC1: 94% , LC2: 5% , LC3: 1%))	105 454 085 cycles pour 300000 km
nombre passage en frein de voie	4800 cycles
Nombre de km/ <i>Durée de vie estimée</i>	300 000/ <i>800000</i> km

3/ Influence de l'occurrence des cycles sur la fragilisation de la roue(4)



En A, sous un chargement conventionnel le pied de toile est la zone la plus critique

En B, le passage en freins de voie avec balourd longitudinal uniquement conduit au basculement de la zone critique vers la zone de fissuration

En C, le passage en freins de voie avec balourd longitudinal et transversal conduit à une réduction drastique de la durée de vie de la zone de fissuration

Colonnes A: cas de chargement conventionnels

Colonnes B: cas de chargement conventionnels + non conventionnel (FVP + FVS longitudinal)

Colonnes C: cas de chargement conventionnels + non conventionnel (FVP + FVS longitudinal et travers)

- Les chargements conventionnels avec ou sans valeurs exceptionnelles ainsi que le sous écartement conduisent à des maxima de contraintes (VM et fatigue) dans la zone de pied de toile
- Le chargement thermique facilite la propagation d'une fissure déjà initiée
- Le transfert des maxima de contraintes vers la zone de fissuration est observé dans une configuration du type passage de frein de voie avec prise en compte du balourd de la masse liquide et en particulier en cumulant l'effet des deux dispositifs – le deuxième générant un couple. Ce transfert de zone critique est observé pour un faible nombre d'occurrences