

RUPTURES EN SERVICE - DESCRIPTION et PREVENTION

A. Pineau

Centre des Matériaux - Ecole des Mines de Paris

UMR CNRS 7633

andre.pineau@enmsp.fr

I - INTRODUCTION

II - RUPTURE FRAGILE

III - FATIGUE

IV - CORROSION et CORROSION SOUS CONTRAINTE

V - BIOLOGIE

VI - MOYENS DE PREVENTION

VII - CONCLUSIONS

RUPTURES EN SERVICE - DESCRIPTION et PREVENTION

A. Pineau

Centre des Matériaux - Ecole des Mines de Paris

UMR CNRS 7633

andre.pineau@enmsp.fr

I - INTRODUCTION

II - RUPTURE FRAGILE

III - FATIGUE

IV - CORROSION et CORROSION SOUS CONTRAINTE

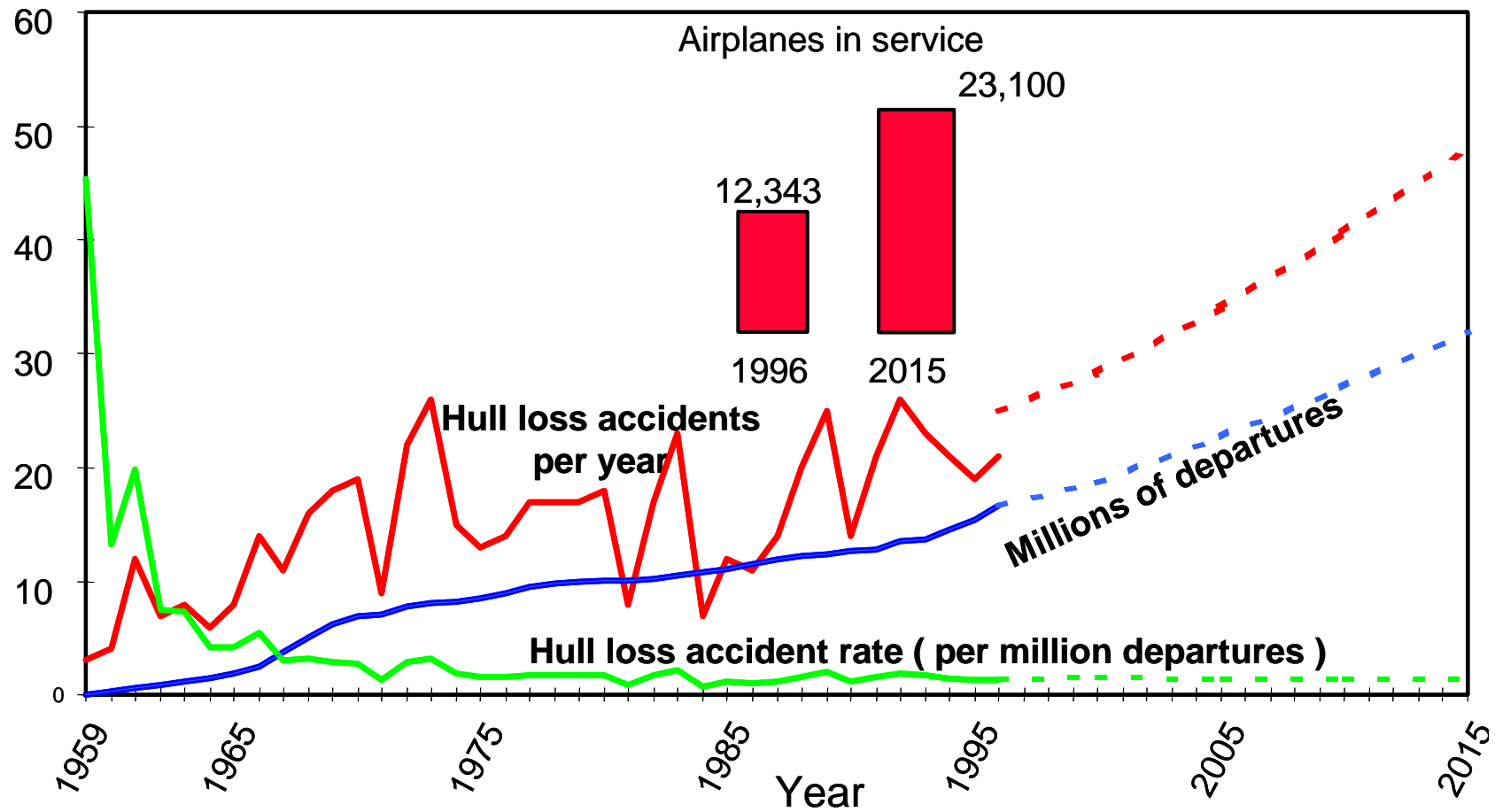
V - BIOLOGIE

VI - MOYENS DE PREVENTION

VII - CONCLUSIONS

Introduction

Géraldine Perrin, 2007



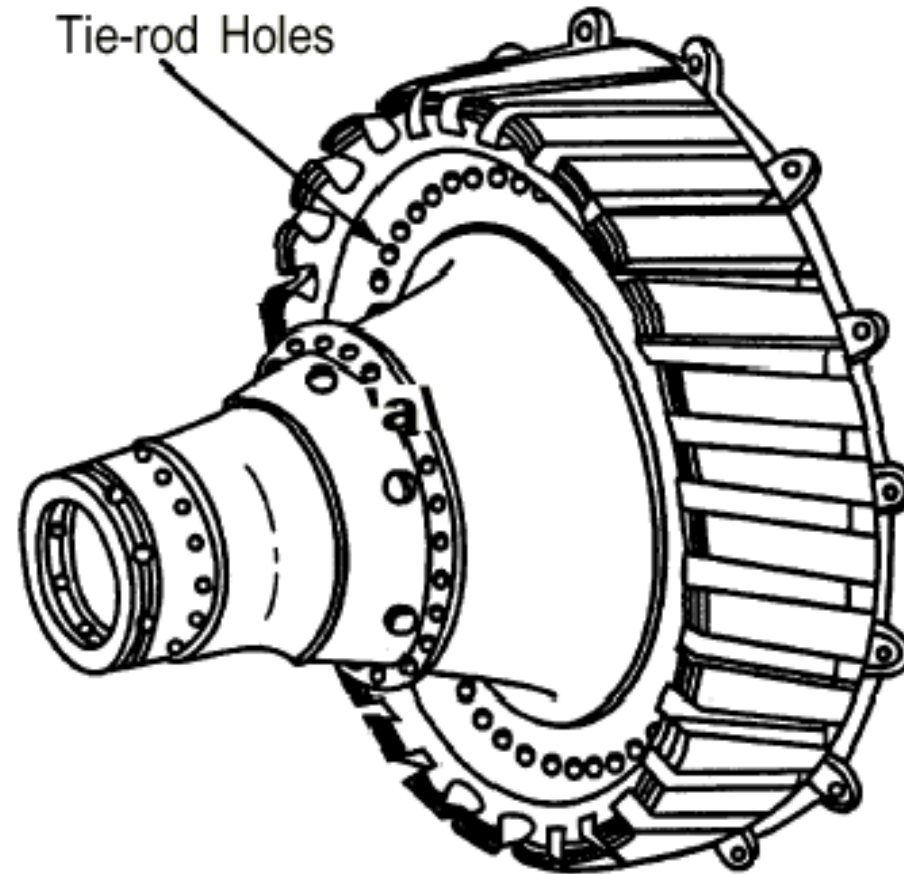
Etude statistique sur l'évolution du trafic aérien et du nombre d'accidents
(source MANHIRP, 2001)

Introduction



Moteur CFM56 (source Snecma)

Introduction



Accident Pensacola, Floride, U.S.A., 06 juillet 1996

Eclatement d'un disque de MD88 Delta Air Lines, Moteur P & W JT8D

Introduction

TA6V. Défaut de perçage. Rupture disque fan.



Accident Pensacola, Floride, U.S.A., 06 juillet 1996

Eclatement d'un disque de MD88 Delta Air Lines, Moteur P & W JT8D

RUPTURES EN SERVICE - DESCRIPTION et PREVENTION

A. Pineau

Centre des Matériaux - Ecole des Mines de Paris

UMR CNRS 7633

andre.pineau@enmsp.fr

I - INTRODUCTION

II - RUPTURE FRAGILE

III - FATIGUE

IV - CORROSION et CORROSION SOUS CONTRAINTE

V - BIOLOGIE

VI - MOYENS DE PREVENTION

VII - CONCLUSIONS

RUPTURE FRAGILE

PLAN

- Barge dans New Hampshire (1978)
- Erika (1999)
- Carling (1984-85)
- Qatar - Gaz liquéfié (mid 70's)
R.M. Pelloux, Montréal Conf. 8-11 July 1991
- Cleuson - Dixence (2000)



Rupture Fragile

BOUCHARD (N.H.), 1978, R.M. Pelloux



Rupture Fragile



*BOUCHARD (N.H.), 1978,
R..M. Pelloux*

Le Monde/MERCREDI 12 JANVIER 2000

Le capitaine de l' *Erika* raconte, heure par heure, le naufrage du pétrolier

Interrogé par un expert judiciaire, Karun Mathur indique qu'il *ne pouvait rien faire*

Le NAUFRAGE de l'*Erika*, dans la nuit du 11 au 12 décembre,
livre peu à peu ses secrets...

"Je suis aussitôt allé sur le pont pour constater moi-même et j'ai vu trois cassures et des flambements de tôle du pont au niveau de la citerne 2 tribord". Les cassures étaient brillantes sur toute l'épaisseur de la tôle... la faille la plus importante est longue de 2,5 mètres et large de 5 centimètres..."

"J'ai pris la décision de ne pas poursuivre le voyage..."



Erika, 12/12/1999



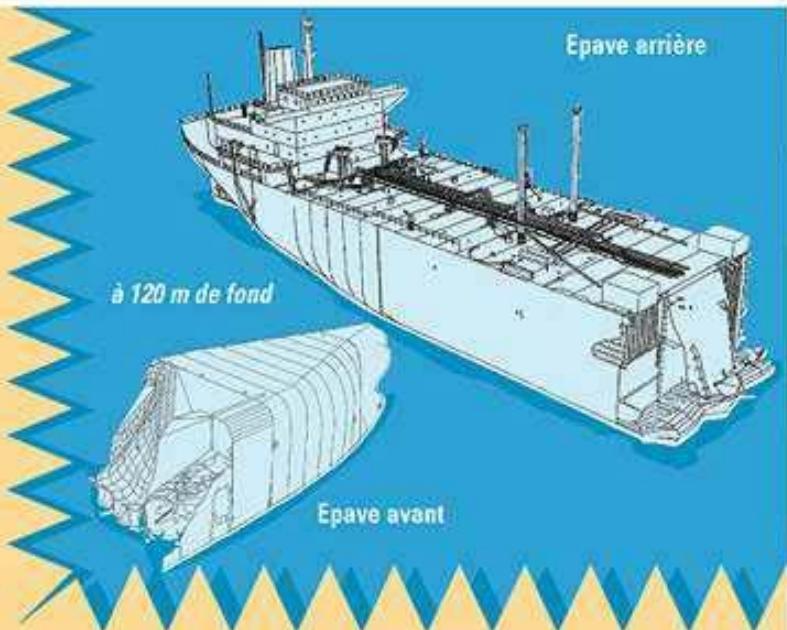
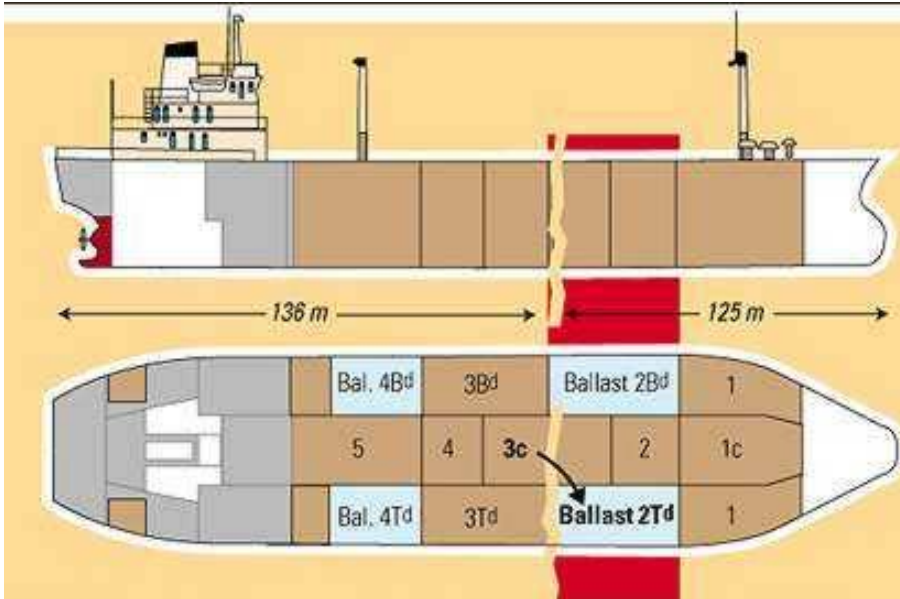
Erika, 12/12/1999



Erika, 12/12/1999



Erika, 12/12/1999



Déjà "sensible" à la corrosion, l'Erika a véritablement commencé à se dégrader quand les citernes 4 et surtout 2 ont été dédiées au ballastage.

► **Constatations avant l'accident**

- Les relevés d'épaisseur de 1997 et de 1998 donnent une moyenne favorable sauf dans la tranche 2.
- Foisonnement de la corrosion et des dépôts de rouille.
- Mauvais état de l'échelle du ballast n°2.
- Le tout conduisant à demander, en décembre 1999, un nouveau contrôle plus approfondi en janvier 2000, et ce moins d'un an après une visite spéciale de reclassification.

► **Constatations pendant l'accident**

- Cassures / effondrement de la cloison entre la citerne n°3 centrale et le ballast n°2 tribord.
- Propagation des cassures dans le bordé de coque et déstructuration du ballast n°2 tribord.
- Inévitable mise en communication avec la mer des citerne n°3 centrale et tribord et du ballast n°2 tribord.
- Cassure du navire dans la tranche 2.

► **Constatations sur l'épave**

- Les pertes d'échantillonnage de plus de 30% sur les tôles d'origine et atteignant 30 % sur les cordons de soudure des renforts confirment une **corrosion généralisée**.
- Les travaux réalisés au chantier de Bijela, au Monténégro, entre juin et août 1998 ont fragilisé le navire : utilisation de tôles d'épaisseurs différentes et plus faibles, positions hasardeuses des coupes, erreurs dans la précision des montages, mauvaise qualité des soudures. Les contraintes ainsi provoquées n'ont pu que favoriser les cassures et fissures.

Le Télégramme / P. Dadozo & L. Sillan
 Source : rapport du bureau enquête accident

■ **Le rapport souligne l'insuffisance d'entretien et la corrosion généralisée**

RUPTURES EN SERVICE - DESCRIPTION et PREVENTION

A. Pineau

Centre des Matériaux - Ecole des Mines de Paris

UMR CNRS 7633

andre.pineau@enmsp.fr

I - INTRODUCTION

II - RUPTURE FRAGILE

III - FATIGUE

IV - CORROSION et CORROSION SOUS CONTRAINTE

V - BIOLOGIE

VI - MOYENS DE PREVENTION

VII - CONCLUSIONS

INTRODUCTION A L'HISTOIRE DE LA FATIGUE

- Voir **Walter SCHÜTZ**, **A history of Fatigue**. *Eng. Fract. Mechanics*, **54**, 263-300 (1996).
- **Introduction du mot "Fatigue"**
 - **A. MORIN**, **Leçons de mécanique pratique -résistance des matériaux**, Paris, Hachette, 456 (1853).
 - **F. BRAITHWAITE**, **On the fatigue and consequent fracture of metals**. *Institution of Civil Engineers, Minutes of the Proceedings*, **XIII**, 463-474 (1854).
- **5 octobre 1842 : Rupture d'un essieu de locomotive à Versailles : 60 morts**
 - Voir **R.A. SMITH**, **The Versailles railway accident of 1842 and the first research into metal fatigue** in *Fatigue 90*, **IV**, EMAS, Birmingham (1990).
- **A. WÖHLER**
 - **Versuche zur Ermittlung der auf die Eisenbahnwagenachsen einwirkenden Kräfte und die Widerstandsfähigkeit der Wagen-Achsen**. *Zeitschrift für Bauwesen*, **X**, 583-616 (1860).
 - **Über die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl**. *Zeitschrift für Bauwesen*, **XX**, 73-106 (1870).
 - **Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl**. Auf Anordnung des Ministers für Handel, Gewerbe und öffentl. Arbeiten, Grafen Itzenblitz, angestellt. Berlin, Ernst und Korn (1870).
 - **Achsen, deren Dimensionen, Form der Achsschenkel, Material**, in *Handbuch für Spezielle Eisenbahn-Technik*, Verlag Wilhelm Engelmann, Leipzig (1870).

Courbe de Wöhler

FATIGUE

I - ENERGIE. OLEO - et GAZODUCS

- Pipeline SPLSE (1981)
- Pipeline Minnesota (juillet 2002)
- Soudures raccordement Tubes PET. Dubois (PA) (août 2004)

II - TRAINS

- ICE - Eschede (Allemagne) (1998)

III - AVIONS

- DC 10 Chicago (1989)
- Aloha (1988)
- Train d'atterrissage
- Disques. Los Angeles (juin 2006)

IV - MOTEURS DIESEL AUTOMOBILE

- Culasses



Fatigue

☸ rupture
09 août 1980
entre St Rémy
de Provence et
Paluds-de-Nove



Provence-Alpes-Côte d'Azur

Après la rupture d'un oléoduc dans les Bouches-du-Rhône

- 9 000 tonnes de pétrole se sont échappées
- La solidité des tuyaux est mise en cause

Marseille. — Ce sont 8 000 à 9 000 tonnes de pétrole brut — et non 2 000 tonnes comme on l'avait dit — qui se sont échappées d'un oléoduc dans la nuit du 9 au 10 août dernier (voir *le Monde* des 12 et 13 août) à Paluds-de-Novés, entre Châteaurenard et Saint-Rémy-de-Provence (Bouches-du-Rhône).

Et l'on commence à peine à dresser le bilan des dégâts. Grâce à la rapidité d'intervention des techniciens de la Société du pipeline européen (S.P.L.S.E.), les vannes ont été fermées en quelques minutes et une partie du pétrole a pu être aspirée aussitôt en amont de la fuite — et, à l'ampleur des moyens mis en œuvre par la sécurité civile, la pollution a pu être circonscrite.

Sur le lieu même de l'accident, 2 à 3 hectares de vergers ont été contaminés par les hydrocarbures qui se sont infiltrés à une profondeur variant entre 20 et 30 centimètres et plus de 2 mètres. Des drains et des puisards ont été creusés pour assainir le terrain. Une partie des terres et des végétaux devra sans doute être incinérée. Le flot de pétrole a, d'autre part, souillé la rivière l'Aiguillon sur 7 kilomètres et a gagné la Durance, où il s'est répandu sur près de 1 kilomètre avant d'être stoppé par des barrages flottants. Les dégâts causés à la faune n'ont pas pu encore être évalués. Selon les responsables de la S.P.L.S.E., de 80 à 90 % du volume des hydrocarbures échappés à l'oléoduc seront, en définitive, récupérés par pompage.

Les opérations de nettoyage, qui ont été confiées à des sociétés privées après le dégagement, lundi 18 août, des militaires, se poursuivront encore pendant plusieurs semaines. Il conviendra ensuite de tirer tous les enseignements de cet accident,

De notre correspondant régional

qui aurait pu prendre des allures de catastrophe, en particulier pour les six cents exploitants agricoles de la région utilisant l'eau de la Durance et de l'Aiguillon. Tous les frais engendrés par le sinistre et notamment les indemnités aux agriculteurs lésés seront pris en charge par la société exploitant l'oléoduc.

A plus long terme, on s'interroge sur les causes de l'accident et sur la solidité de l'oléoduc. En effet, c'est la deuxième fois qu'un accident de ce type survient en moins de deux ans sur les installations de la société du pipeline européen. Or, comme en novembre 1978 à Saint-Martin-de-Crau, c'est une soudure longitudinale qui s'est rompue.

Il semble donc, dans un cas comme dans l'autre, que la qualité du matériel livré par les constructeurs puisse être incriminée. Les fuites se sont produites sur deux canalisations de calibres et d'âges différents : celle de 24 pouces installée en 1962 à Saint-Martin-de-Crau, et celle de 40 pouces datant de 1972 à Paluds-de-Novés. Elles n'ont pas été construites par les mêmes sociétés et, selon la société d'exploitation, ces ouvrages avaient été testés de façon concluante avant leur mise en service. La canalisation endommagée de Saint-Martin-de-Crau ne présentait sans doute pas toutes les garanties de solidité puisqu'au lendemain de l'accident la S.P.L.S.E. n'avait pas hésité à remplacer 12 kilomètres de lignes « pour éviter de prendre des risques supplémentaires ». Il est vrai qu'une première fuite, aux conséquences limitées, et que l'on

a apprise récemment, avait déjà été constatée dans le même secteur en septembre 1976. Pourtant, le remplacement des tuyaux sur une grande longueur — mesure draconienne et coûteuse — n'est pas envisagée pour l'instant à Paluds-de-Novés.

GUY PORTE.

Ile-de-France

La construction de l'Institut du monde arabe

NOUVELLES PROPOSITIONS DE LA MAIRIE DE PARIS

M. Jacques Chirac a proposé le lundi 8 septembre au ministère des affaires étrangères sept terrains de remplacement pour l'implantation de l'Institut du monde arabe ailleurs que rue de la Fédération dans le quinzième arrondissement.

Les deux premiers terrains proposés par la mairie sont respectivement situés près de la Porte Champerret (17^e arrondissement) et sur les terrains Citroën (15^e). Les cinq autres propositions sont les suivantes : le terrain Peugeot (16^e), à Bercy (12^e), Citroën (15^e), le palais du Bardo dans le parc Montsouris (14^e) et en bordure de la place d'Italie (13^e), là où devait se dresser la tour « Apogée ».

Pour M. Philippe Ardant, coresponsable de l'Institut du monde arabe, « les propositions de la mairie de Paris ne remettent pas en cause le choix du terrain de la rue de la Fédération. Car ces terrains ont déjà été refusés ou ne sont pas utilisables immédiatement ».

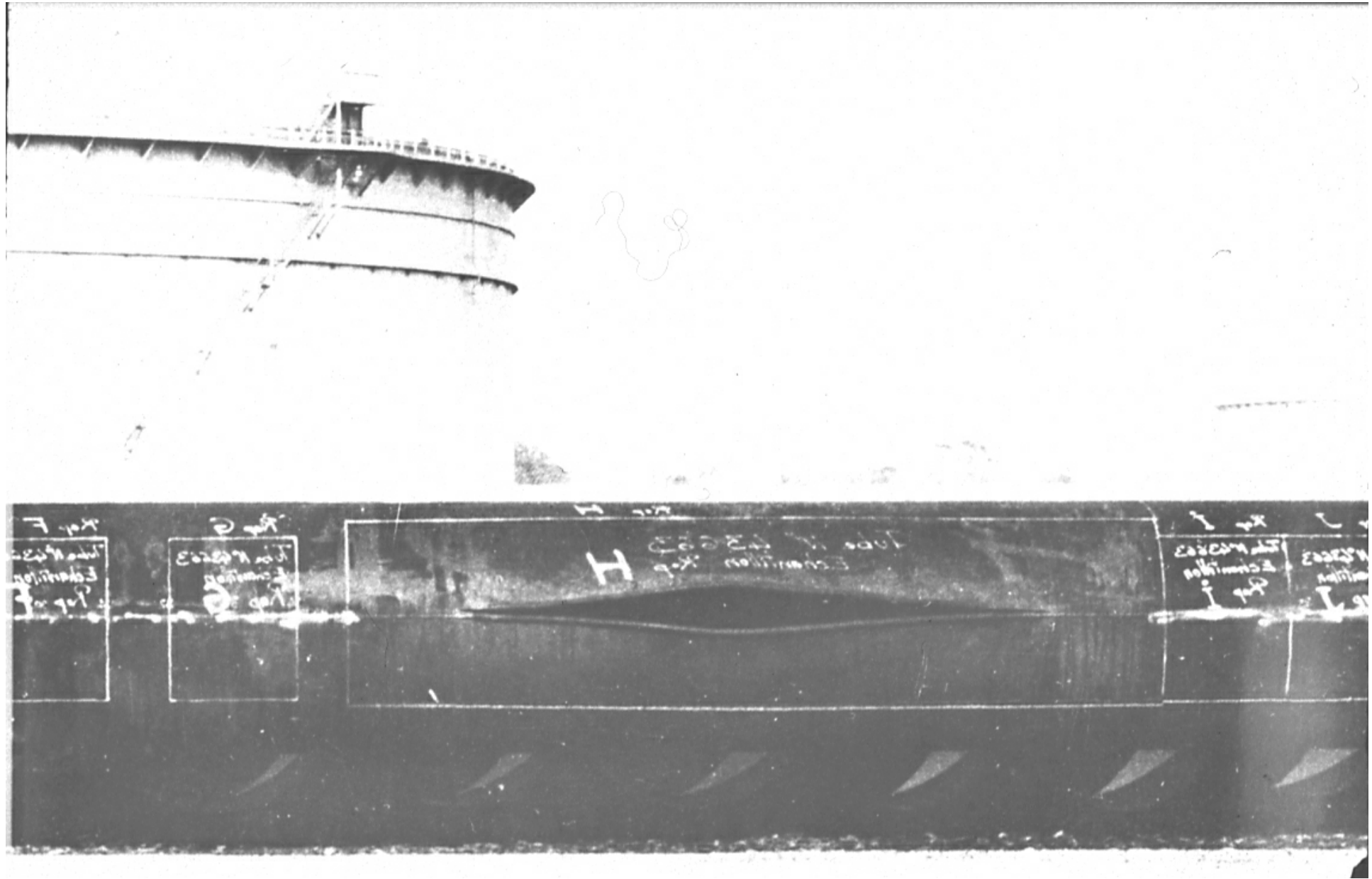


SPLSE

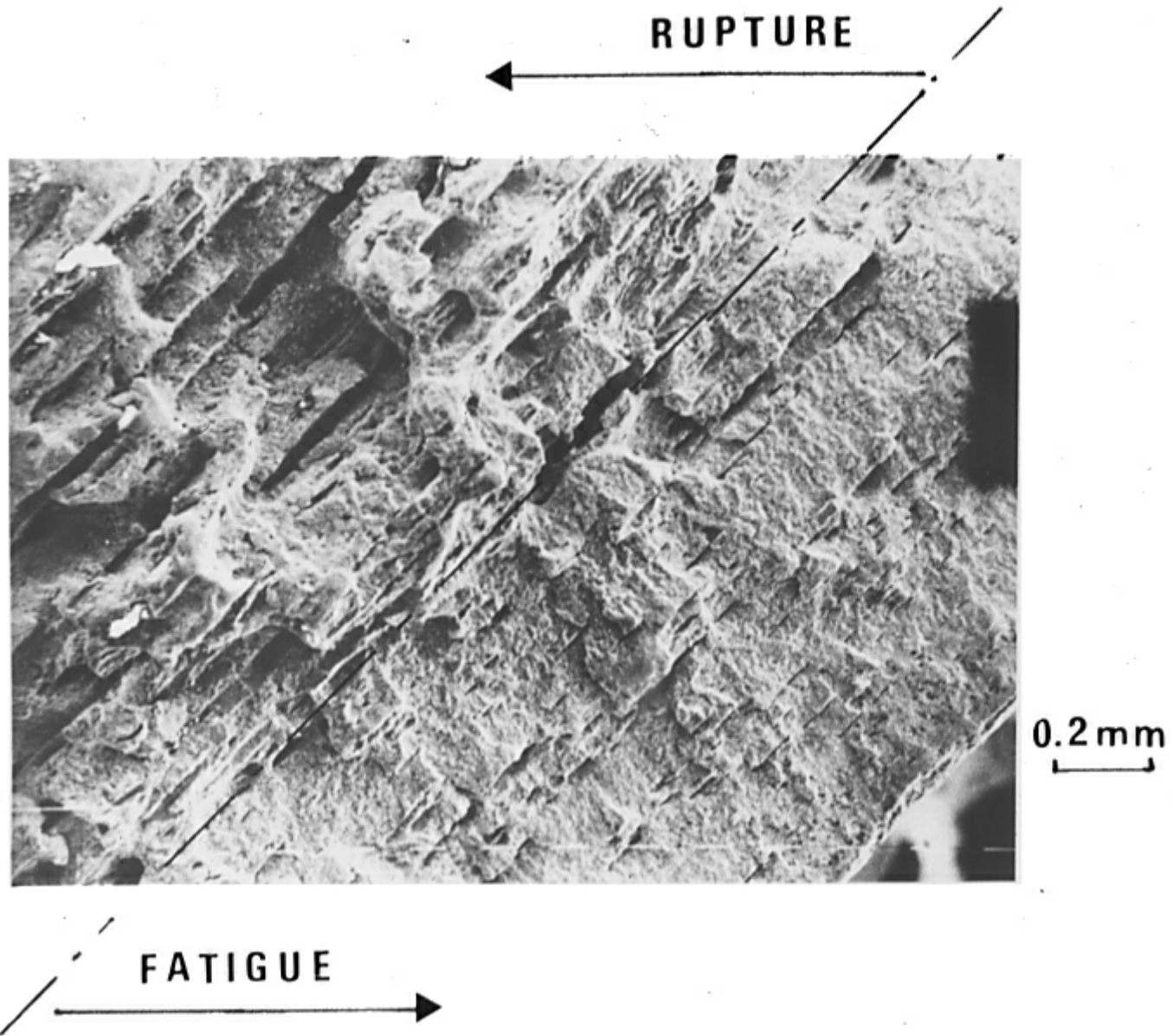
- Terminal maritime Fos-sur-Mer
 - 40 réservoirs = 2.26 millions m³
 - Stockage pétrole brut en transit
- 3 pipelines reliant ce terminal aux raffineries
 - Ligne de 34" (86 cm) Fos - Karlsruhe (actuellement inactive)
 - Ligne de 40" (102 cm) Fos - Strasbourg
 - Ligne de 24" (61 cm) Fos - Lyon
- 12 stations pompage. Livraison 35 millions Tonnes/an



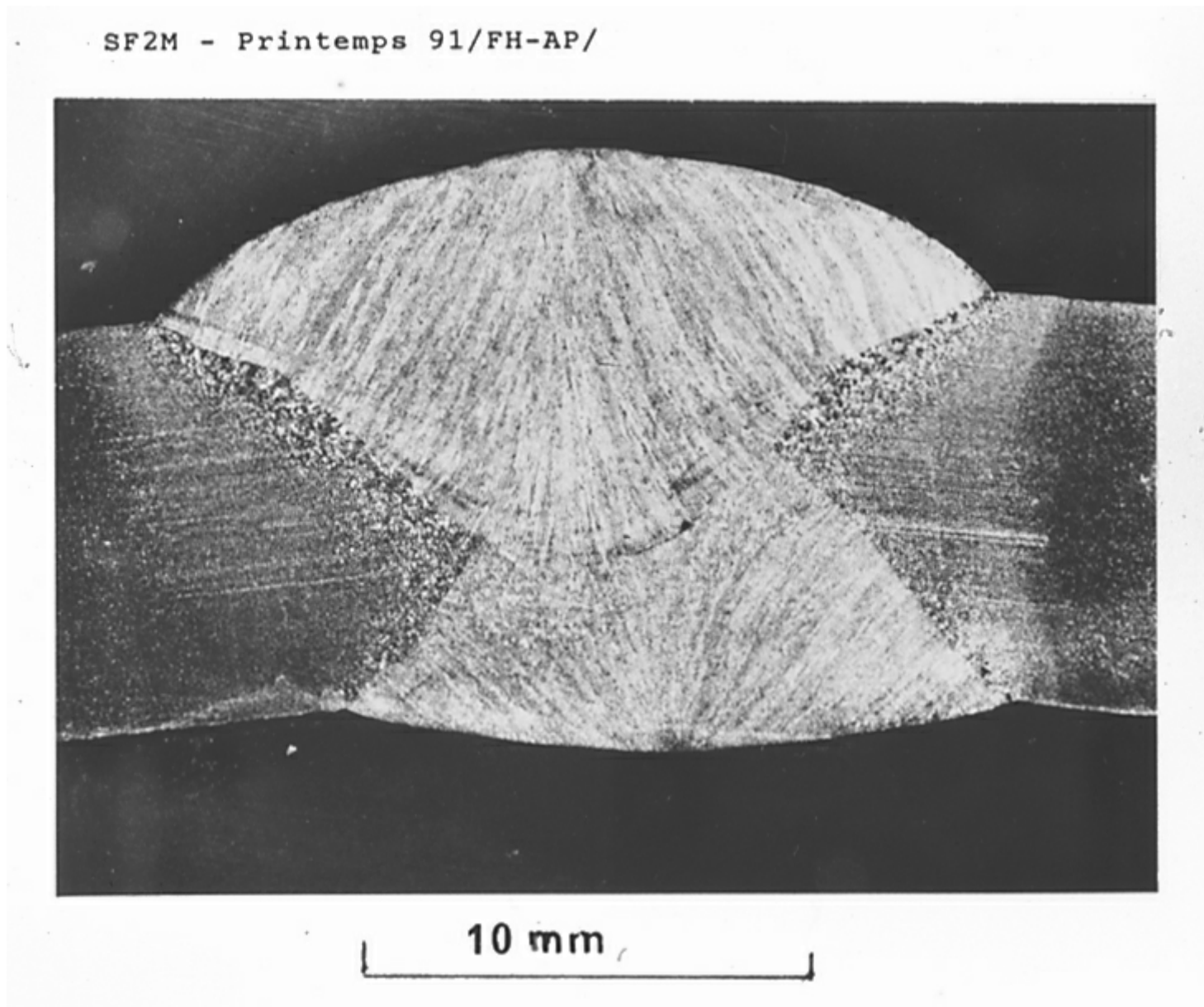
Fatigue



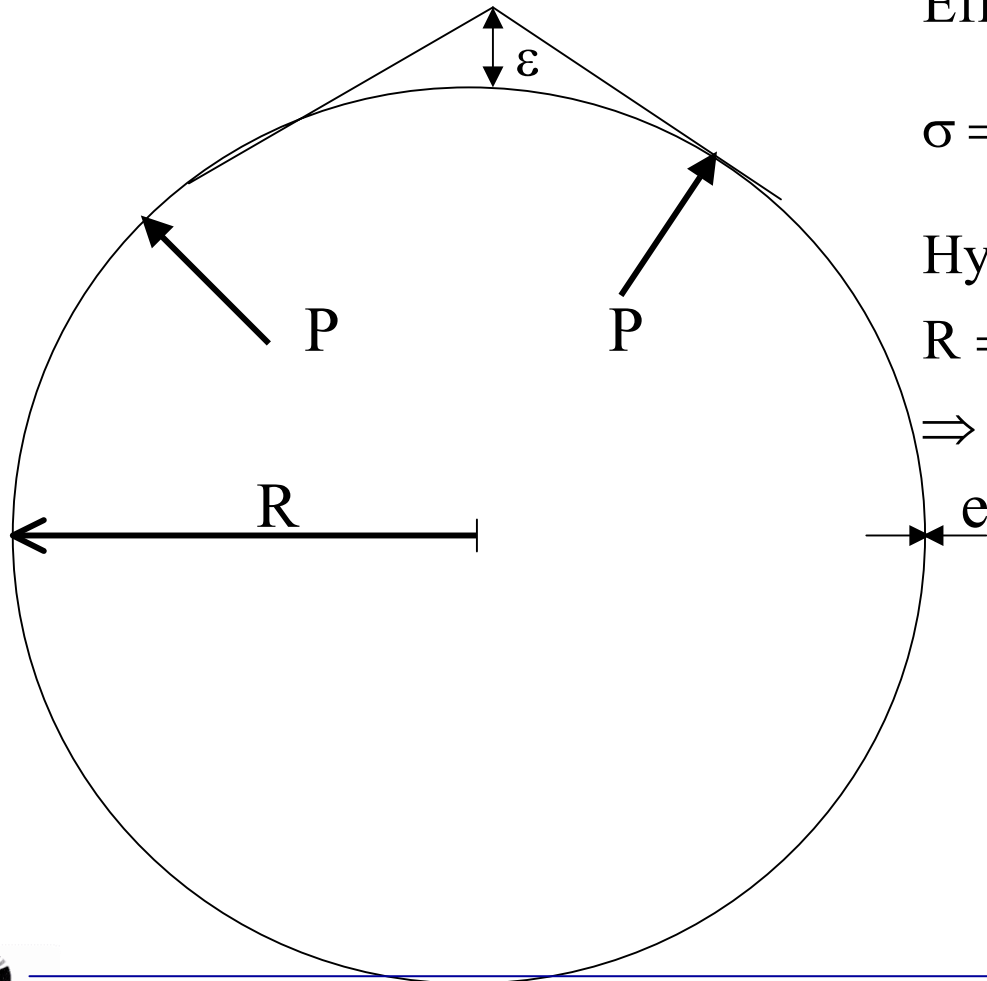
SF2M - Printemps 91/FH-AP/



Fatigue



NOCIVITE EFFET DE TOIT



$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{PR}{e}$$

Effet de toit (ε)

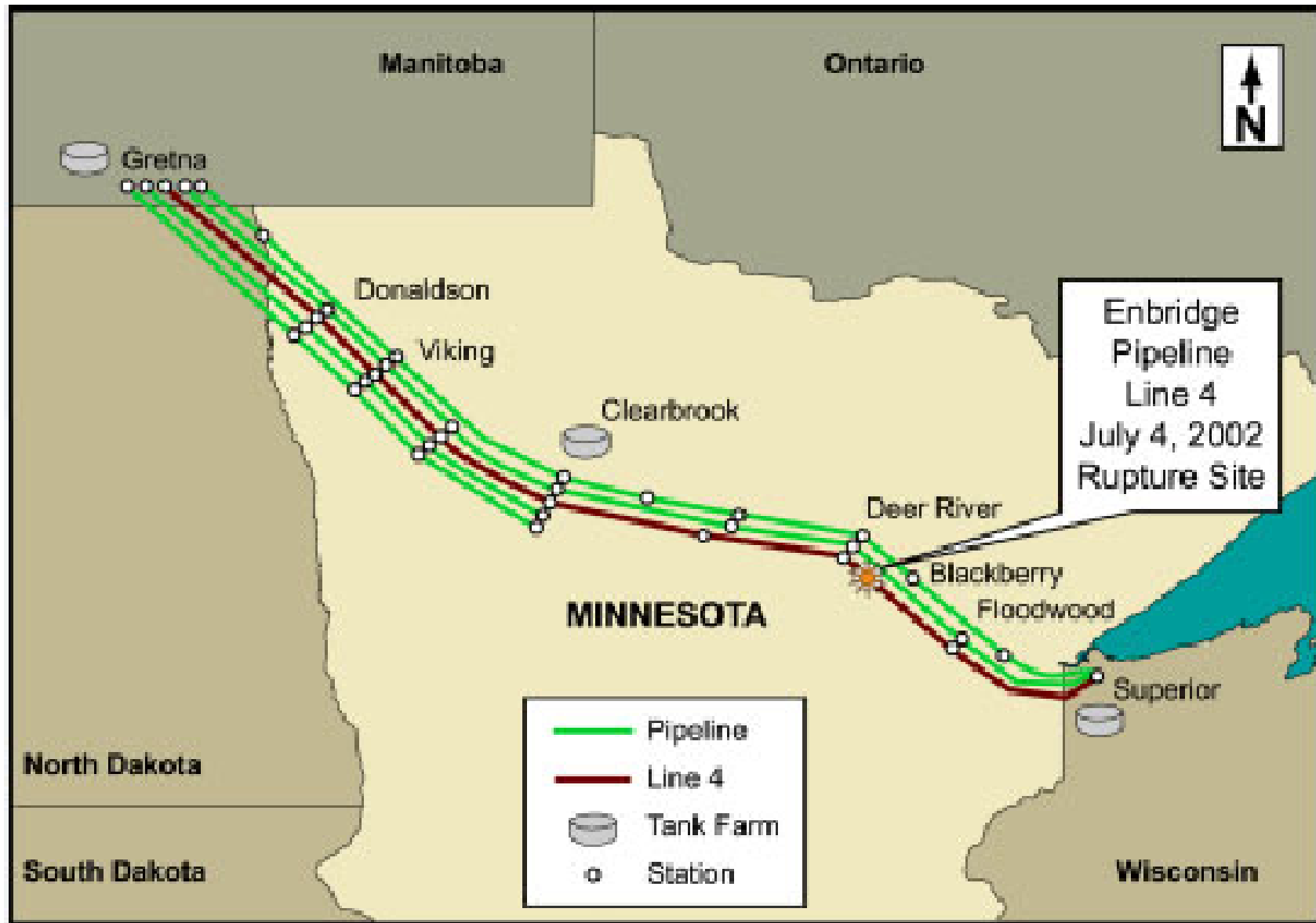
$$\sigma = \sigma_{\text{nom}} \left[1 + \frac{6\varepsilon}{e} \right]$$

Hyp: Petits déplacements

$$R = 500 \text{ mm}; \quad \varepsilon = 5 \text{ mm}; \quad e = 10 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \sigma = 4\sigma_{\text{nom}} !$$

Pipeline Minnesota, juillet 2002



ENBRIDGE (Minnesota) Pipeline

- Pipeline diameter 34"(865 mm); $e = 0.312"$ (8mm)
- Pressure 687 psi(48 bars)
- Steel X 52(365 Mpa). Fabrication US Steel (P.A.)
- Rupture July 4, 2002 (252 000 gallons crude oil released)
- Construction Date = 1967



Pipeline Minnesota, juillet 2002



Figure 3. Controlled burn surrounded by white fire retardant.

Pipeline Minnesota, juillet 2002



Figure 4. Smoke plume 1 mile high and 5 miles long.

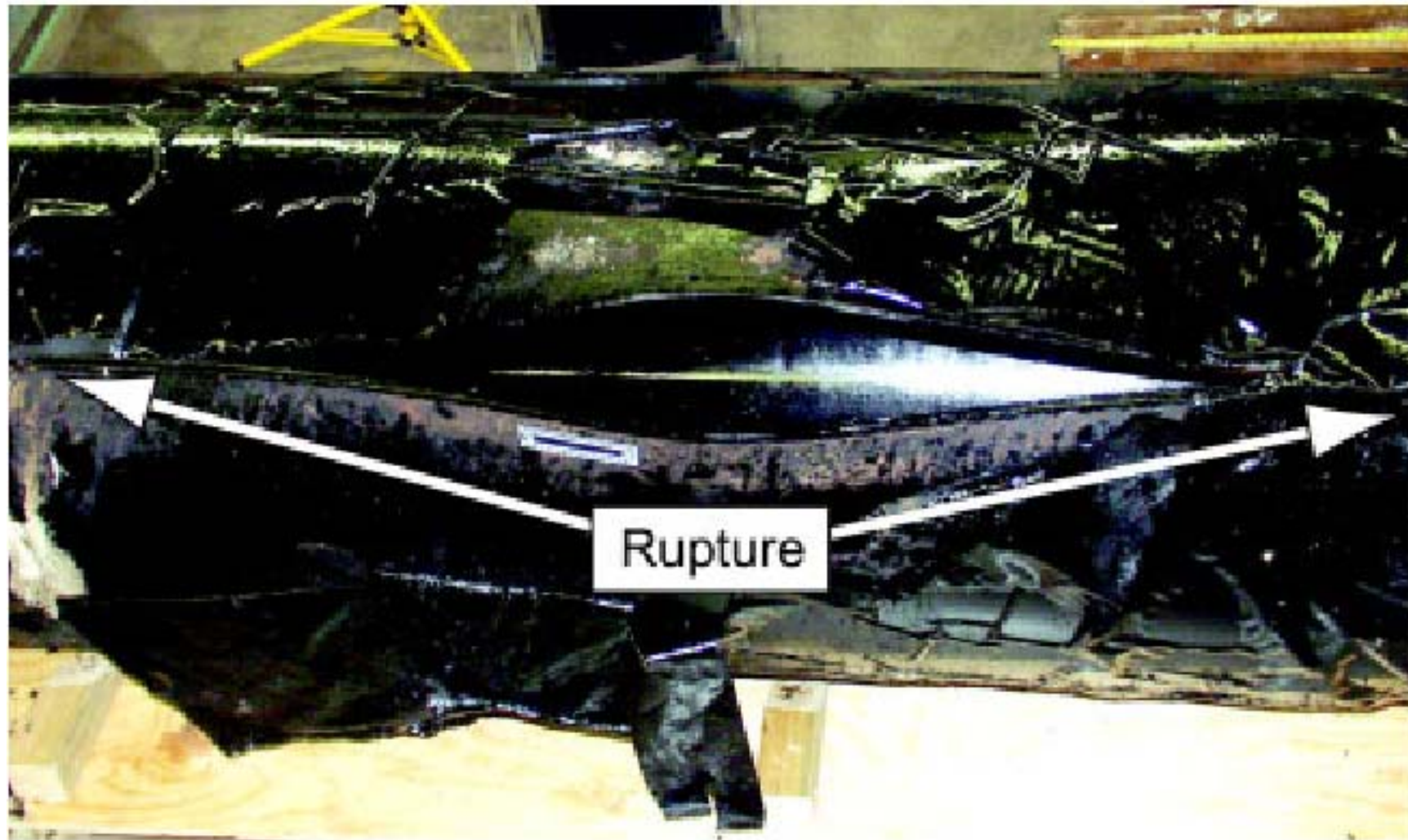


Figure 5. Rupture in accident pipe.

Crack length : about 70"

Pipeline Minnesota, juillet 2002

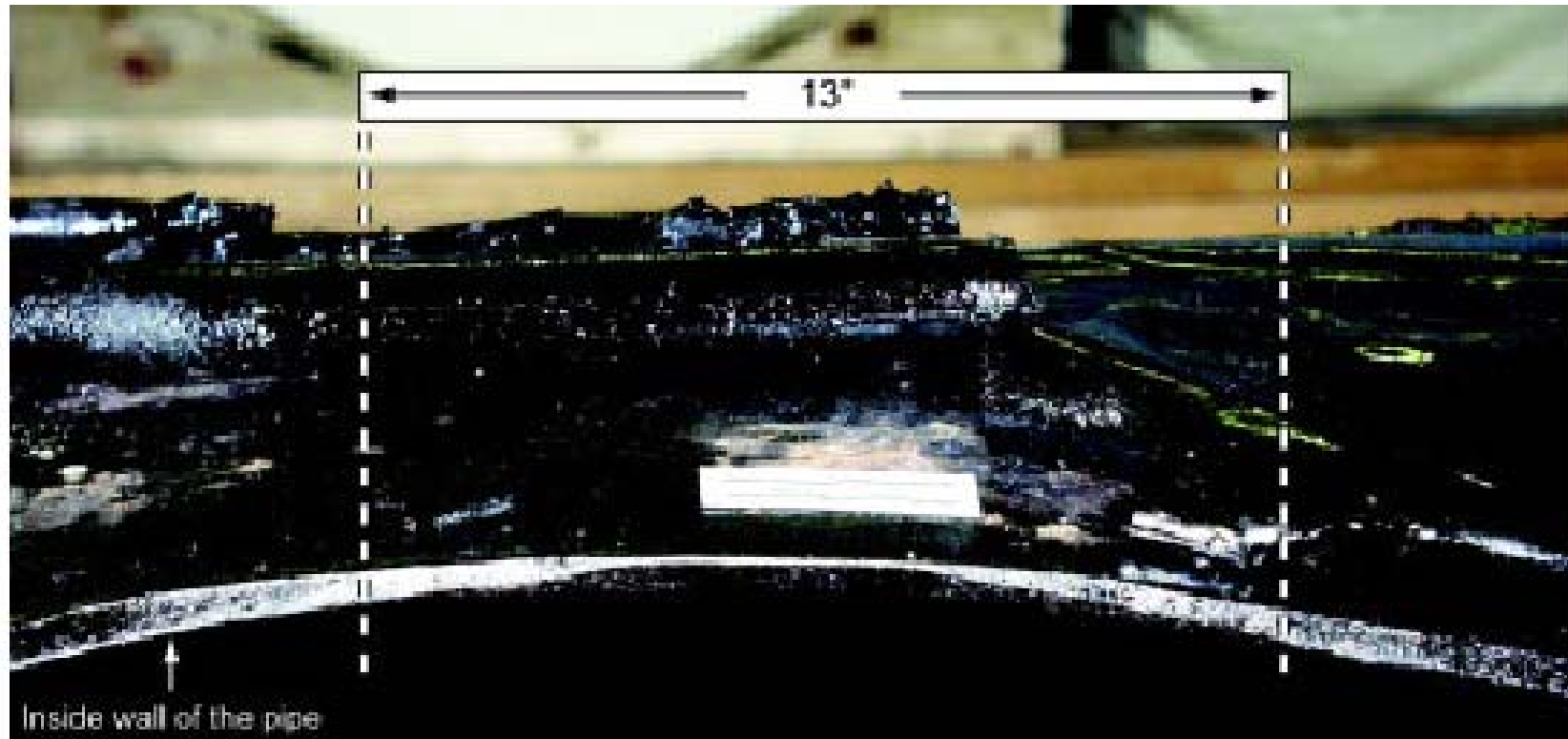


Figure 6. View of top fracture surface of 13-inch-long crack, showing penetration nearly through pipe wall in center.

Pipeline Minnesota, juillet 2002

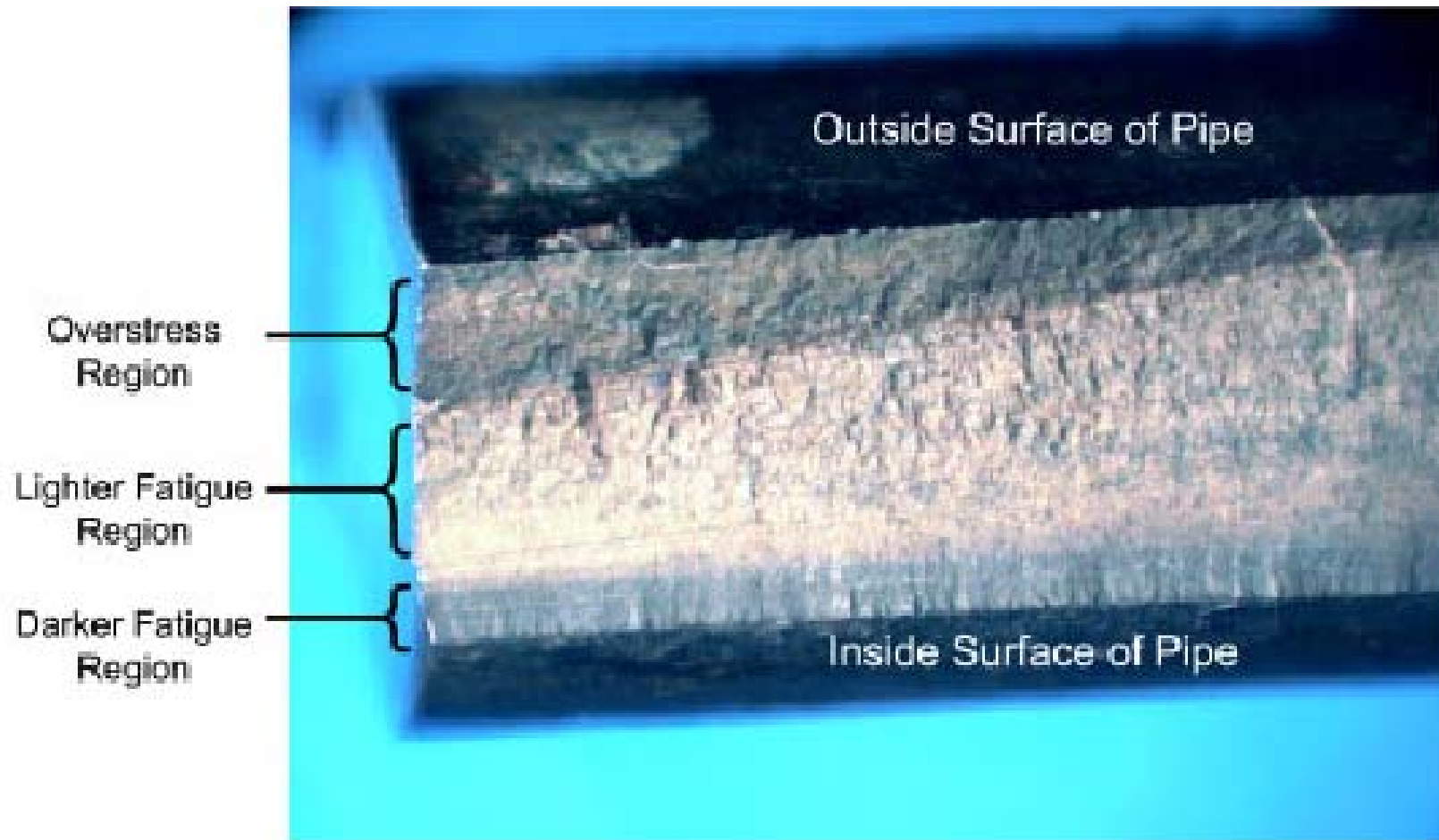


Figure 7. Face of fracture in accident pipe.

Pipeline Minnesota, juillet 2002

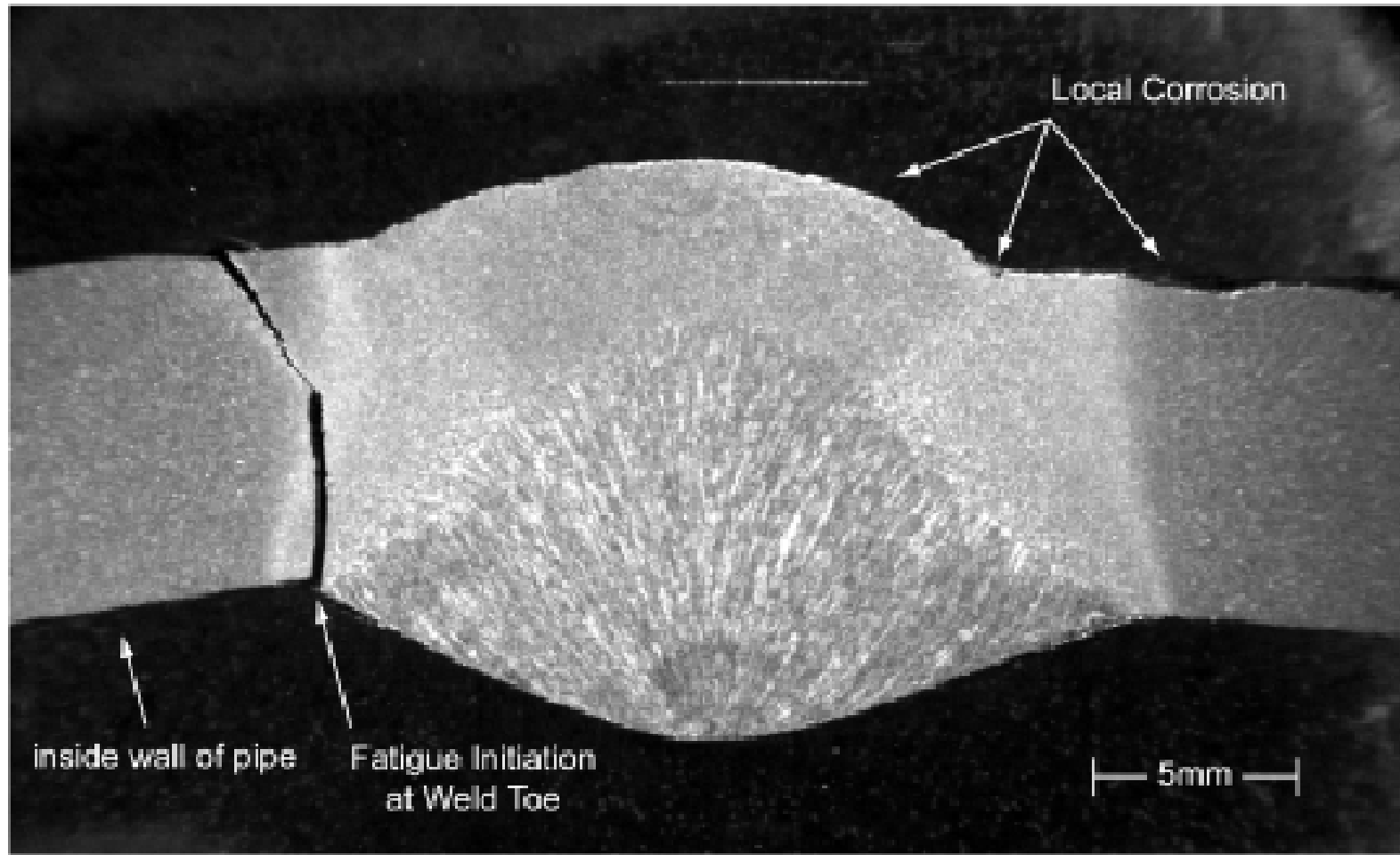


Figure 8. Fatigue initiating at toe of weld on interior surface of pipe.

EXPLANATION

FATIGUE CRACK INITIATION DURING TRANSPORTATION

The paper goes on to say :

The stresses developed during shipment (usually most severe during rail shipments because of higher stacks and higher g-loadings) depend on the diameter, thickness, loading configuration, and number of bearing strips.

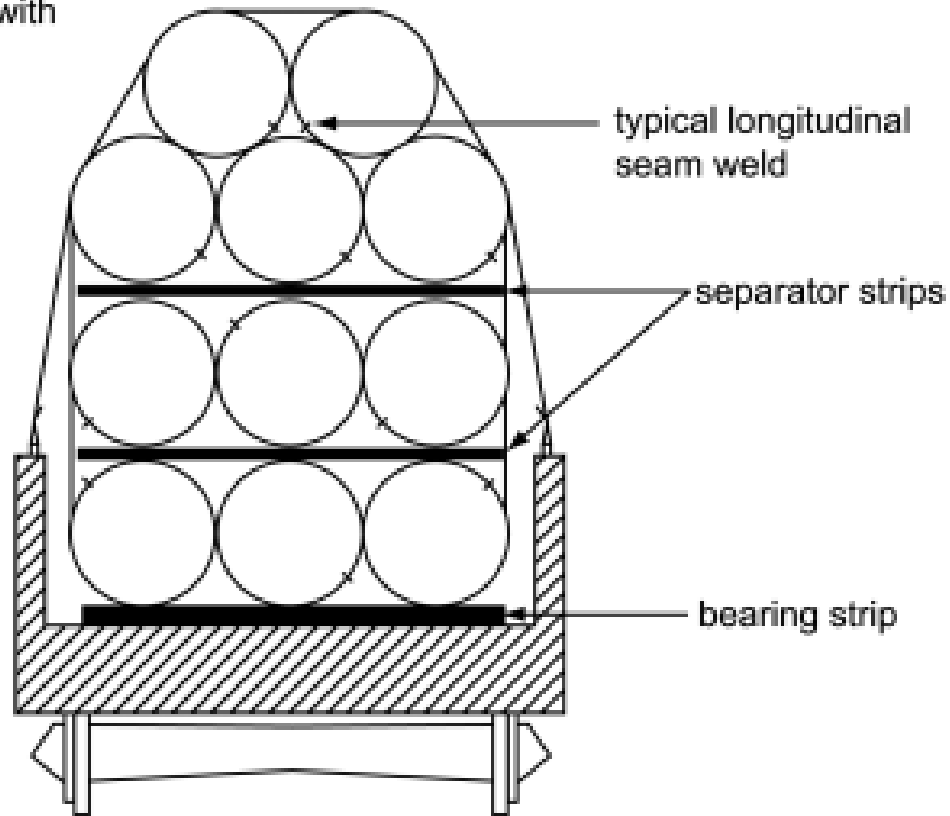
The potential damage done, of course, depends on the number of cycles of stress which are imposed during shipment.



Pipeline Minnesota, juillet 2002

Note:

Pipes randomly loaded with longitudinal seam weld at 45° to the vertical.



Cross Section

Not to scale

Figure 10. Typical pipe configuration on railroad car.



MEMOIRES D'UN TOURISTE, 1838

STENDHAL

La Charité, 13 avril

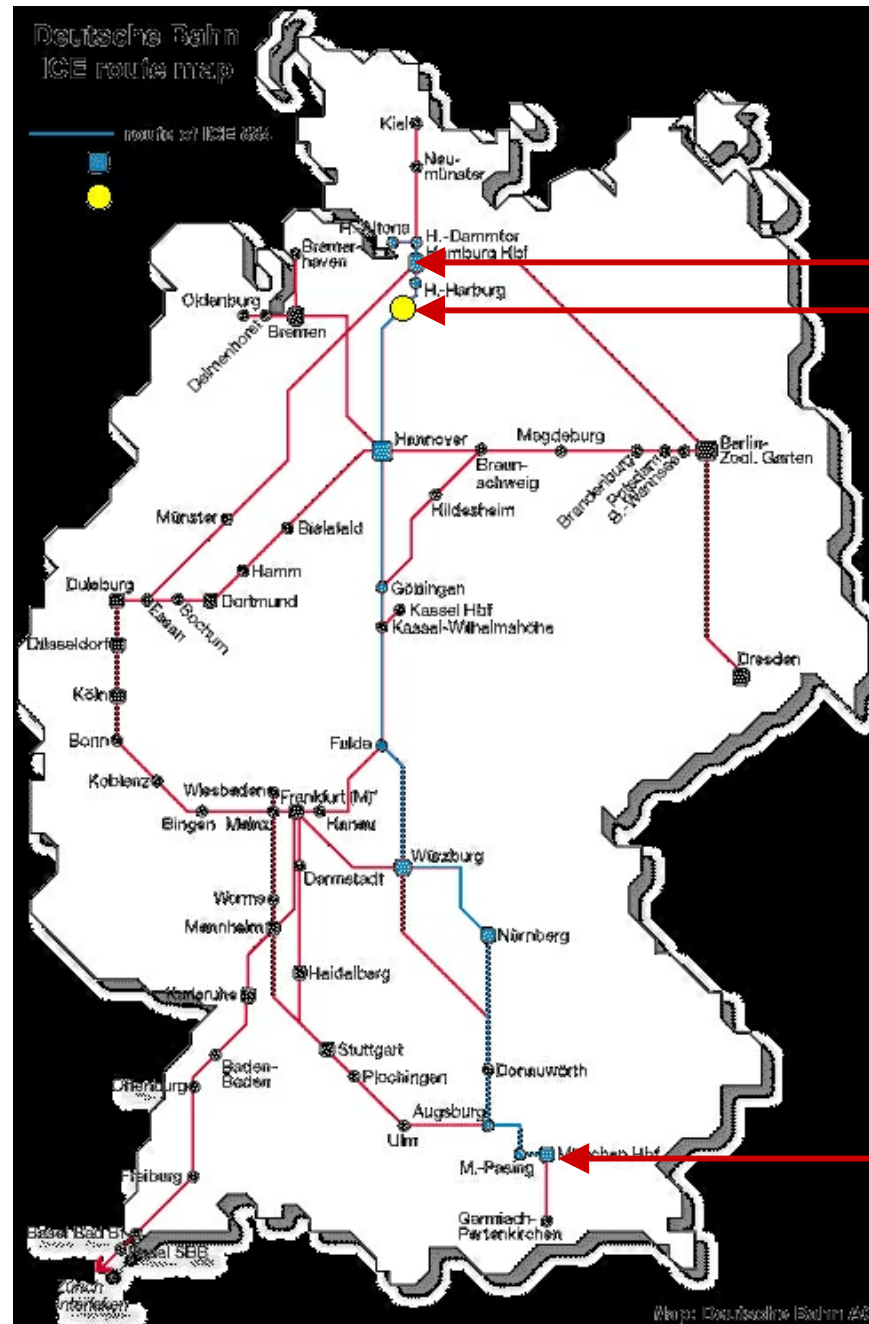
Je traversais au grand trot la petite ville de La Charité, lorsque, pour me punir d'avoir pensé longuement ce matin aux maladies du fer, l'essieu de ma calèche casse net...

J'examine le grain du fer de mon essieu; il est devenu gros, apparemment qu'il sert depuis longtemps. J'examine le génie du forgeron...

Fatigue

100 people died

Münich/Hambourg
round trip →
1 million cycles



**HAMBURG
ESCHEDÉ**

MÜNICH



ICE ACCIDENT ESCHEDE (03 juin 1998)



ICE ACCIDENT ESCHEDE (03 juin 1998)



ICE ACCIDENT ESCHEDE (03 juin 1998)



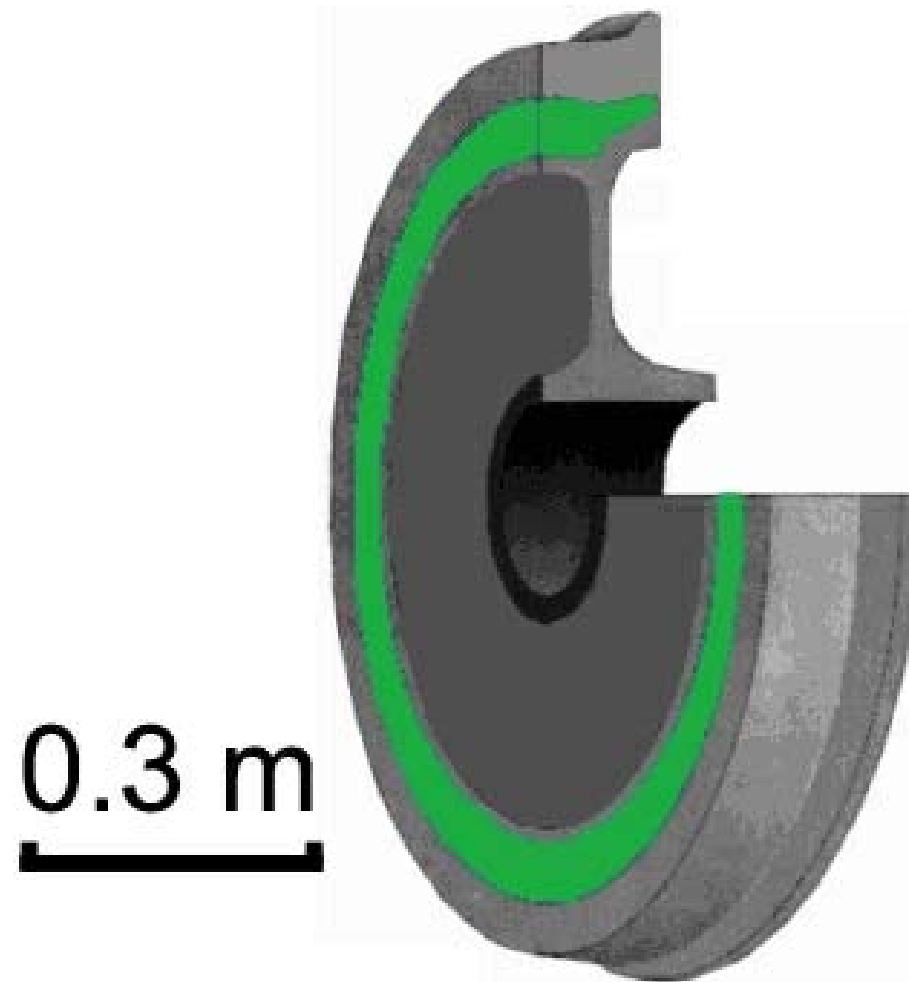
ICE ACCIDENT ESCHEDE (03 juin 1998)

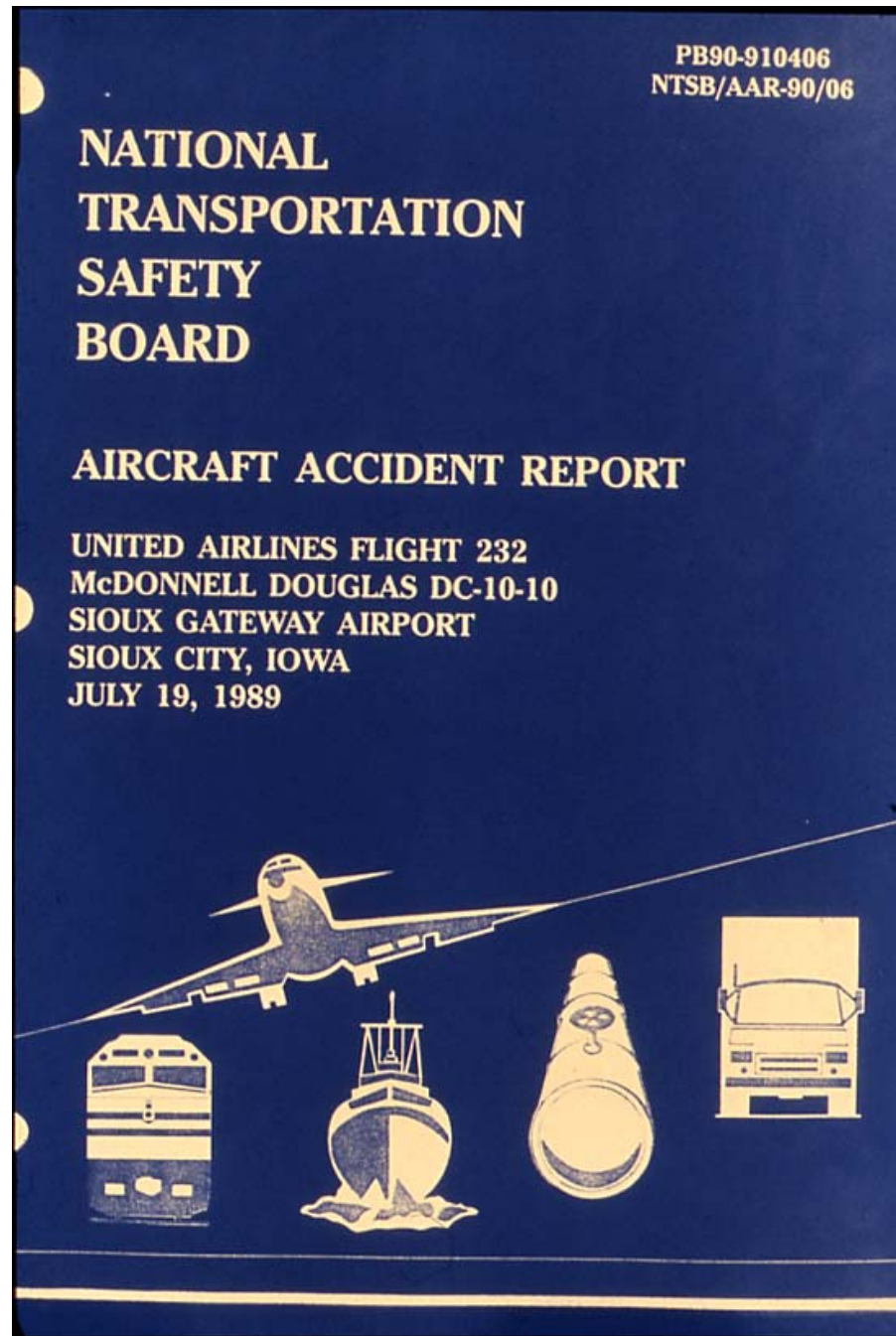


COLORADO



ICE ACCIDENT ESCHEDE (03 juin 1998)



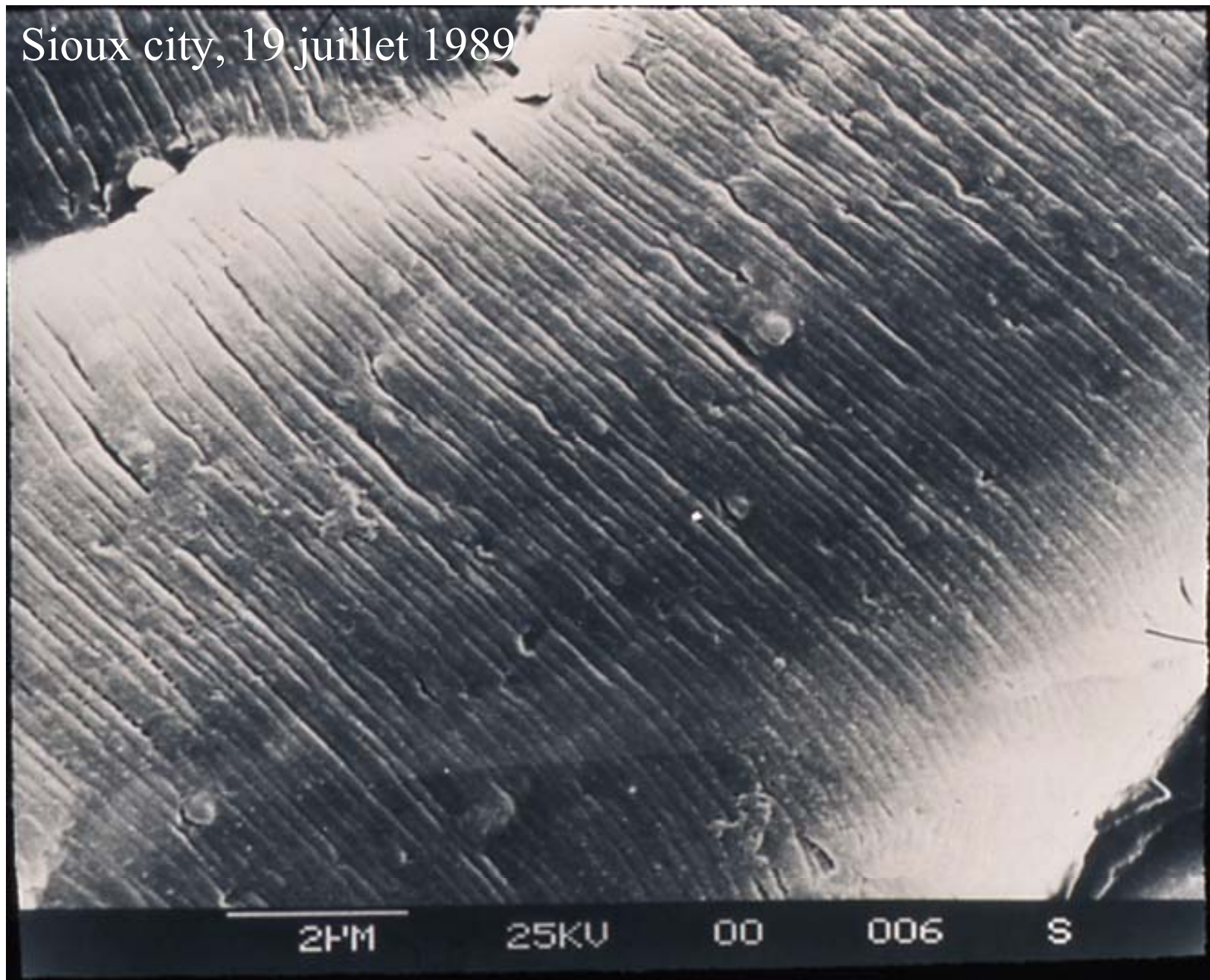


Sioux city, 19 juillet 1989



Sioux city, 19 juillet 1989





ALOHA AIRLINES Boeing 737 - 200

NTSB

- 28 April 1988
- Flight 243 : Explosive decompression and structure failure at 24 000 feet
En route from Hilo to Honolulu, Hawaiï
- 89 passengers and 6 crewmembers
- One flight attendant swept overload
7 passengers + 1 flight attendant seriously injured
- Emergency descent and landing at Kahului Airport (Island of Maui)

- Significant disbonding and fatigue damage → failure of lap joint and separation of the fuselage upper lobe
- Safety issues
 - Quality of air carrier maintenance programs
 - Engineering design. Special emphasis on multiple site fatigue cracking of the fuselage lap joints



Aloha, 28 avril 1988

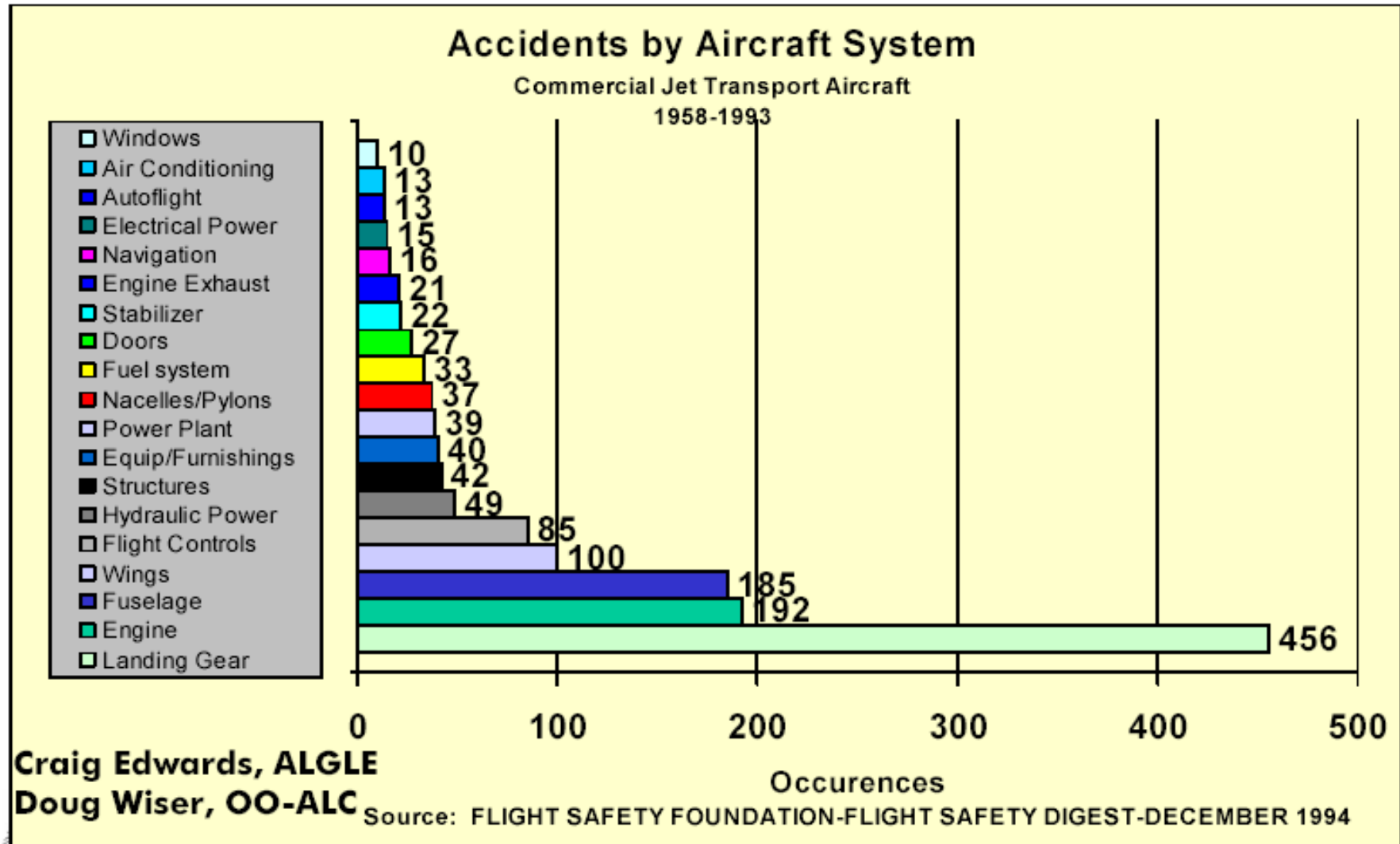


Fatigue

Aloha, 28 avril 1988



Why landing gear?



Linking Global Technologies with Markets

Keith Legg klegg@rowantechology.com

Messier-Dowty / Roles of landing gears

M&P in Messier-Dowty



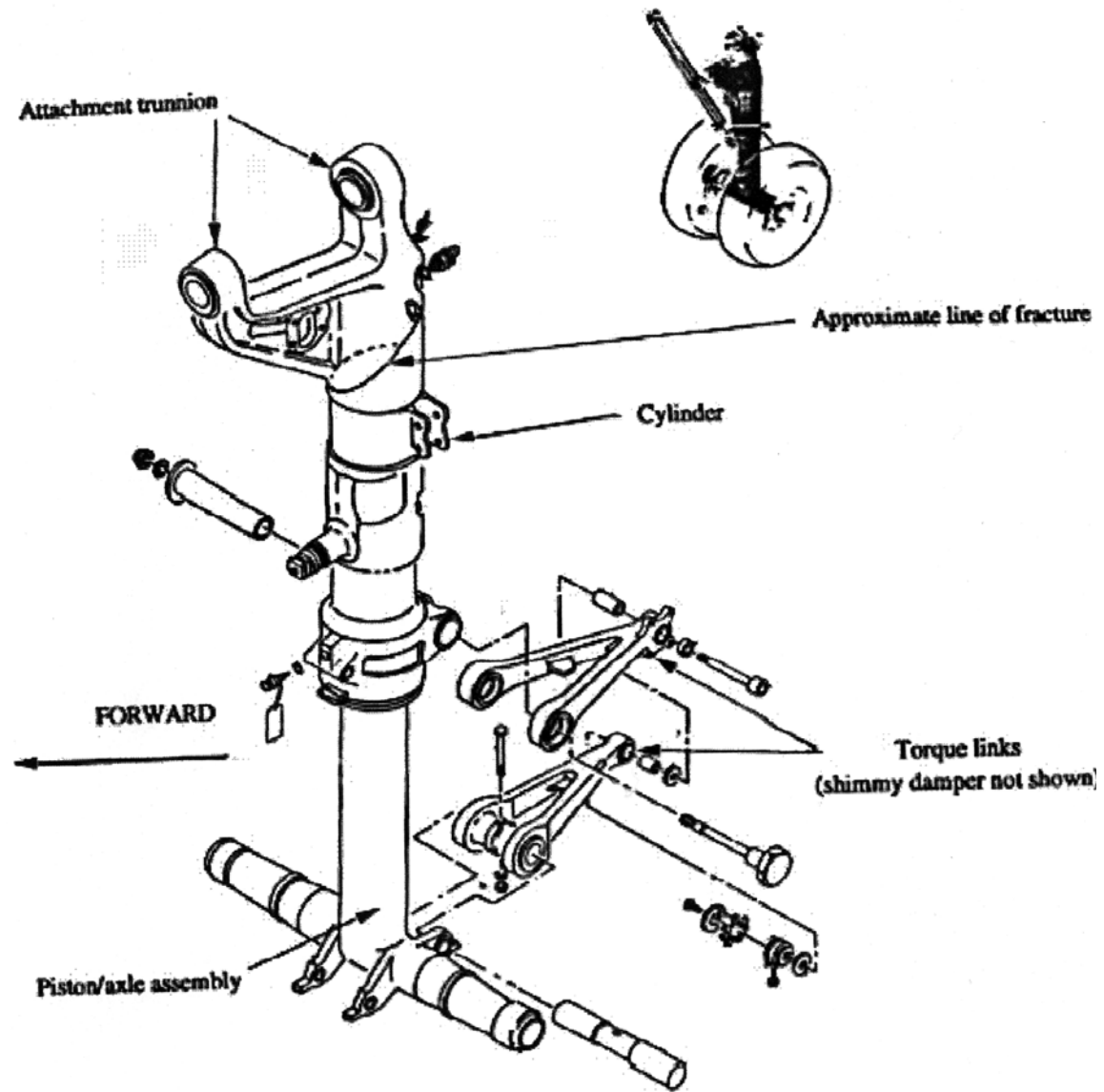
- ▶ Support the plane (park, taxi, runway)
- ▶ Steer the plane on ground
- ▶ Absorb the energy at landing
- ▶ Extend & Retract
- ▶ In the bay during the flight

M&P for Aeronautical equipment
Patrick MONCLAR
AAAF, Nov. 22, 2006
7



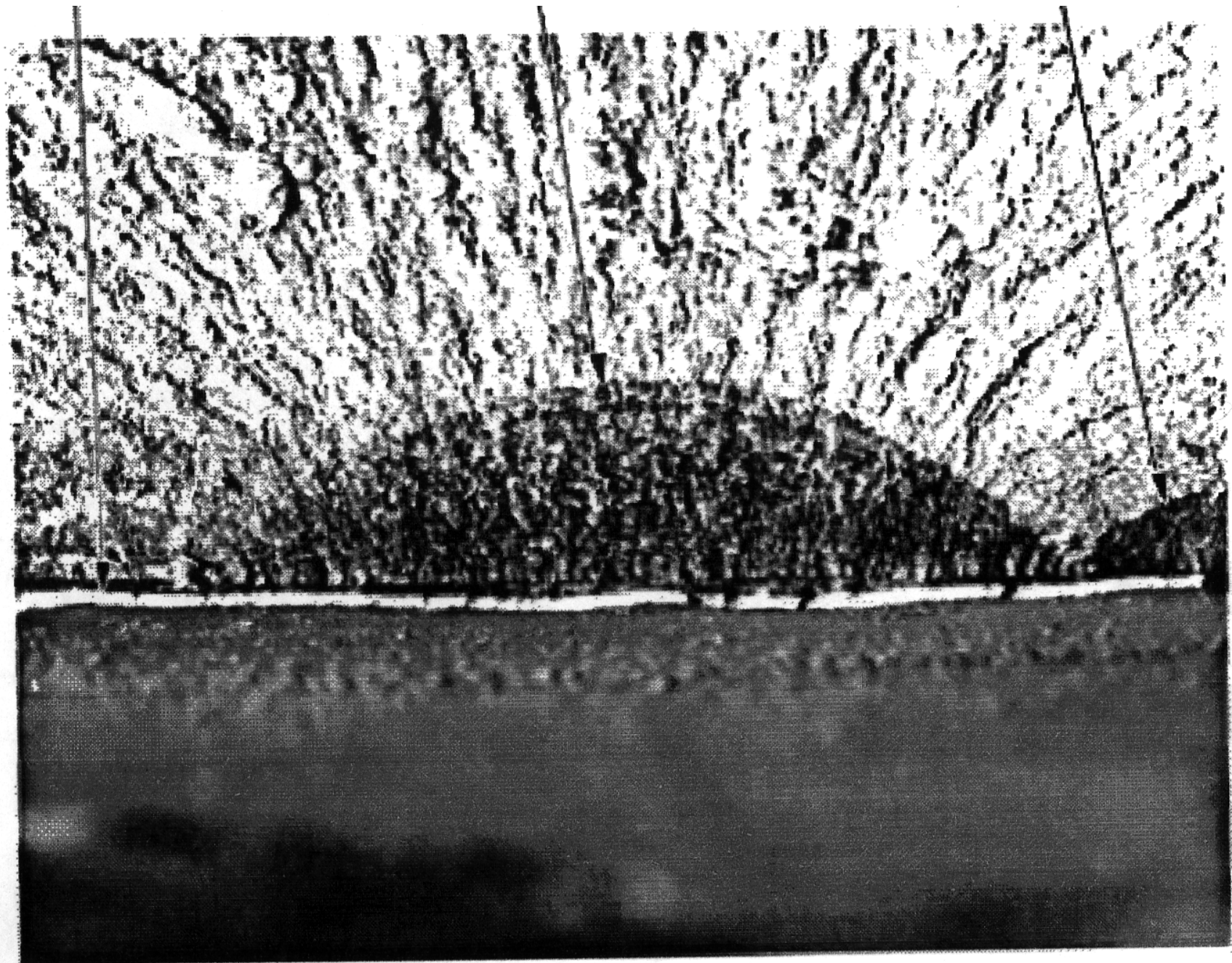
Fatigue

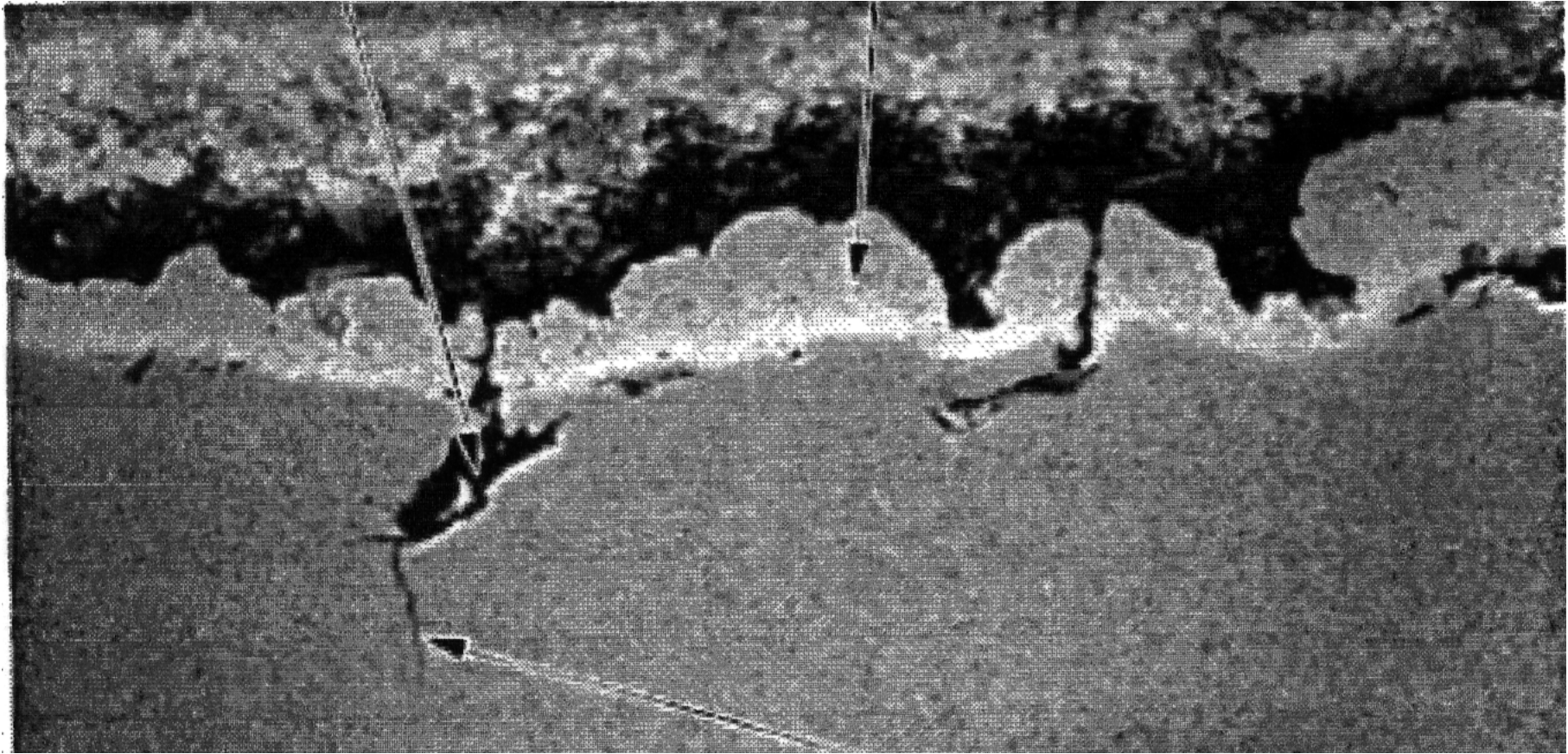


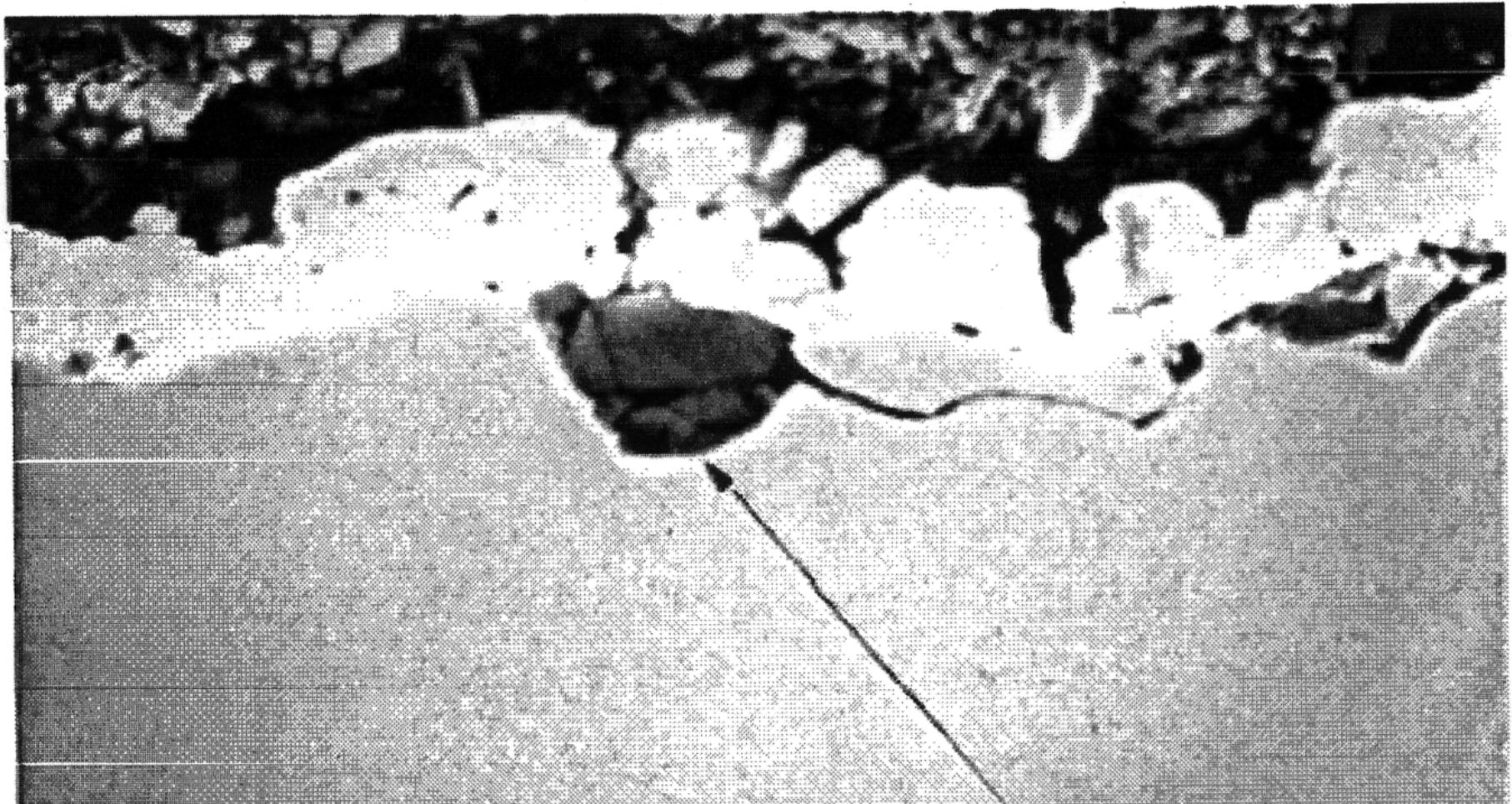


MD-80 series Main Landing Gear oleo strut

Fatigue







Boeing 767 Los Angeles, 02 juin 2006
engine type : GE CF6-80A2



Boeing 767 Los Angeles, 02 juin 2006
engine type : GE CF6-80A2



Boeing 767 Los Angeles, 02 juin 2006
engine type : GE CF6-80A2





Boeing 767 Los Angeles, 02 juin 2006
engine type : GE CF6-80A2



Fatigue

Boeing 767 Los Angeles, 02 juin 2006

engine type : GE CF6-80A2



Fatigue

Boeing 767 Los Angeles, 02 juin 2006
engine type : GE CF6-80A2

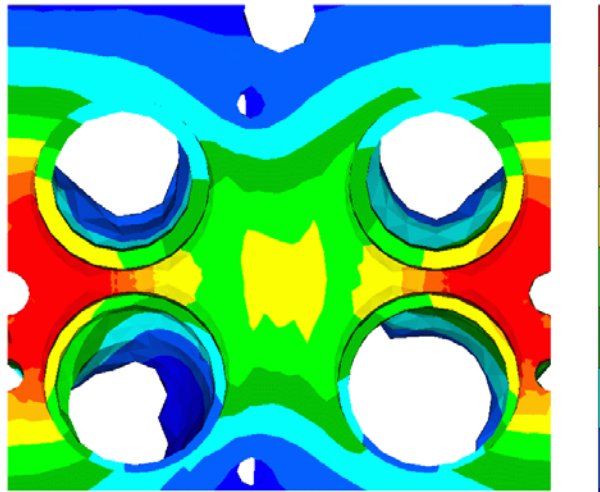


Boeing 767 Los Angeles, 02 juin 2006
engine type : GE CF6-80A2



PROBLEM ANALYSIS

Key points of the problem

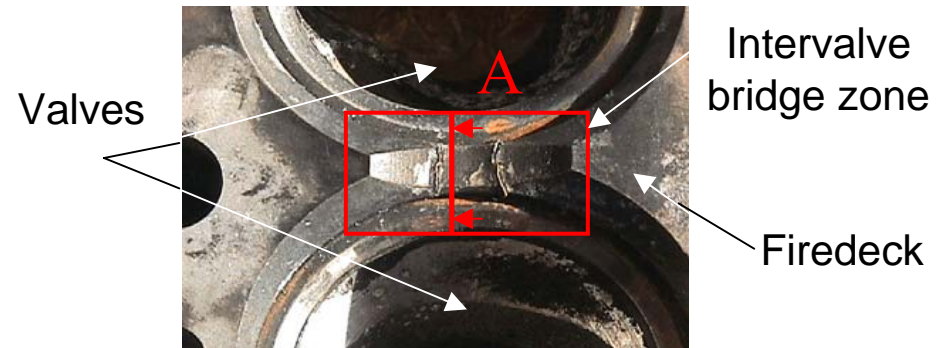


Thermal maximum temperature on a cylinder head firedeck

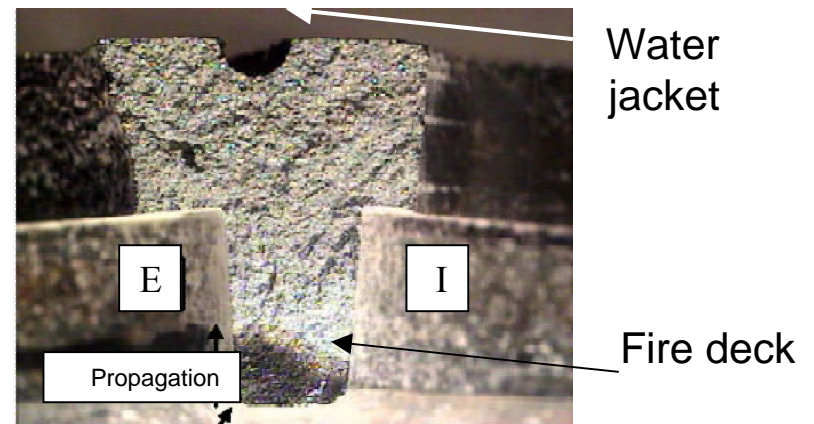
Firedeck loadings : Anisothermal Fatigue

- Tension-compression
- Plastic strain gradient in high temperature zones
- Loading dispersion due to operating conditions
- Fatigue life dispersion due to the foundry process

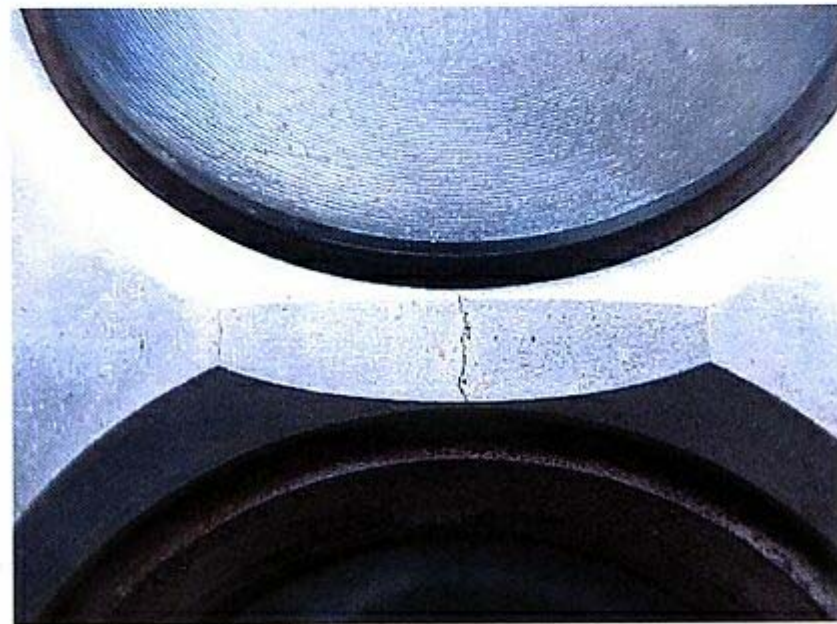
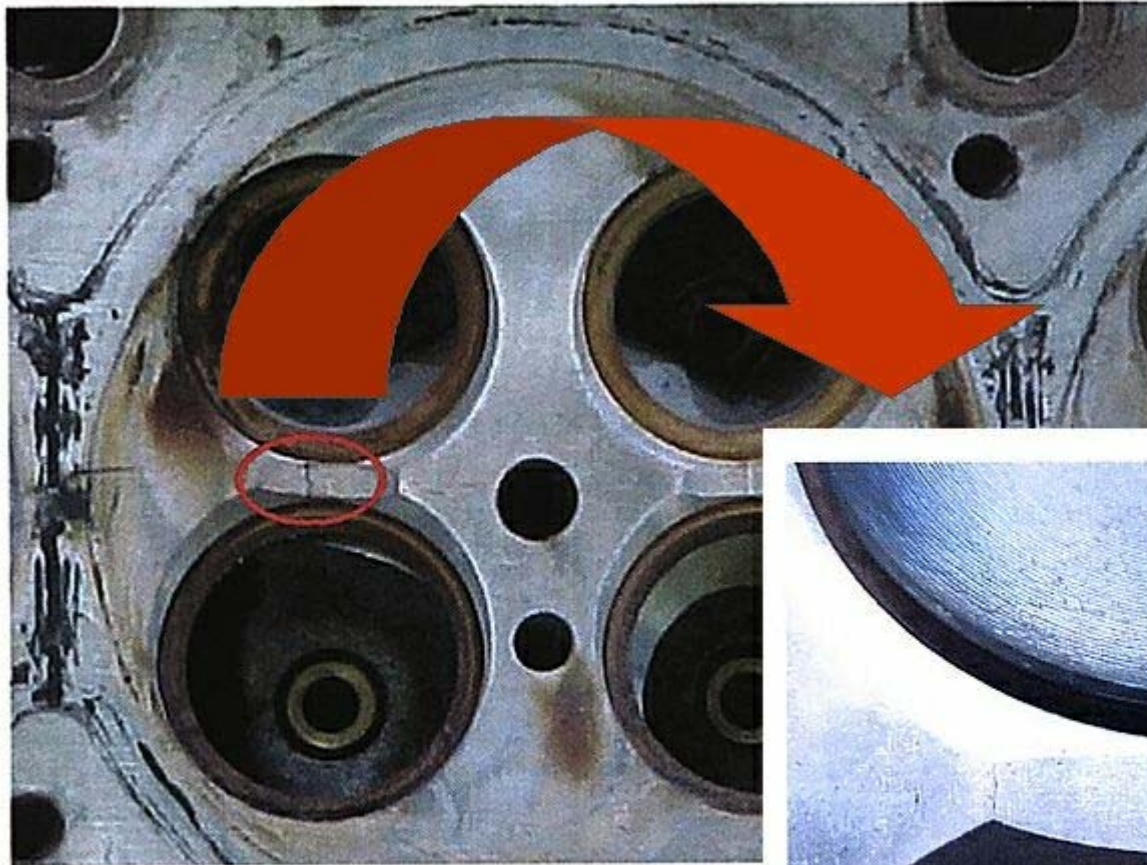
Crack localisation



A Crack Morphology

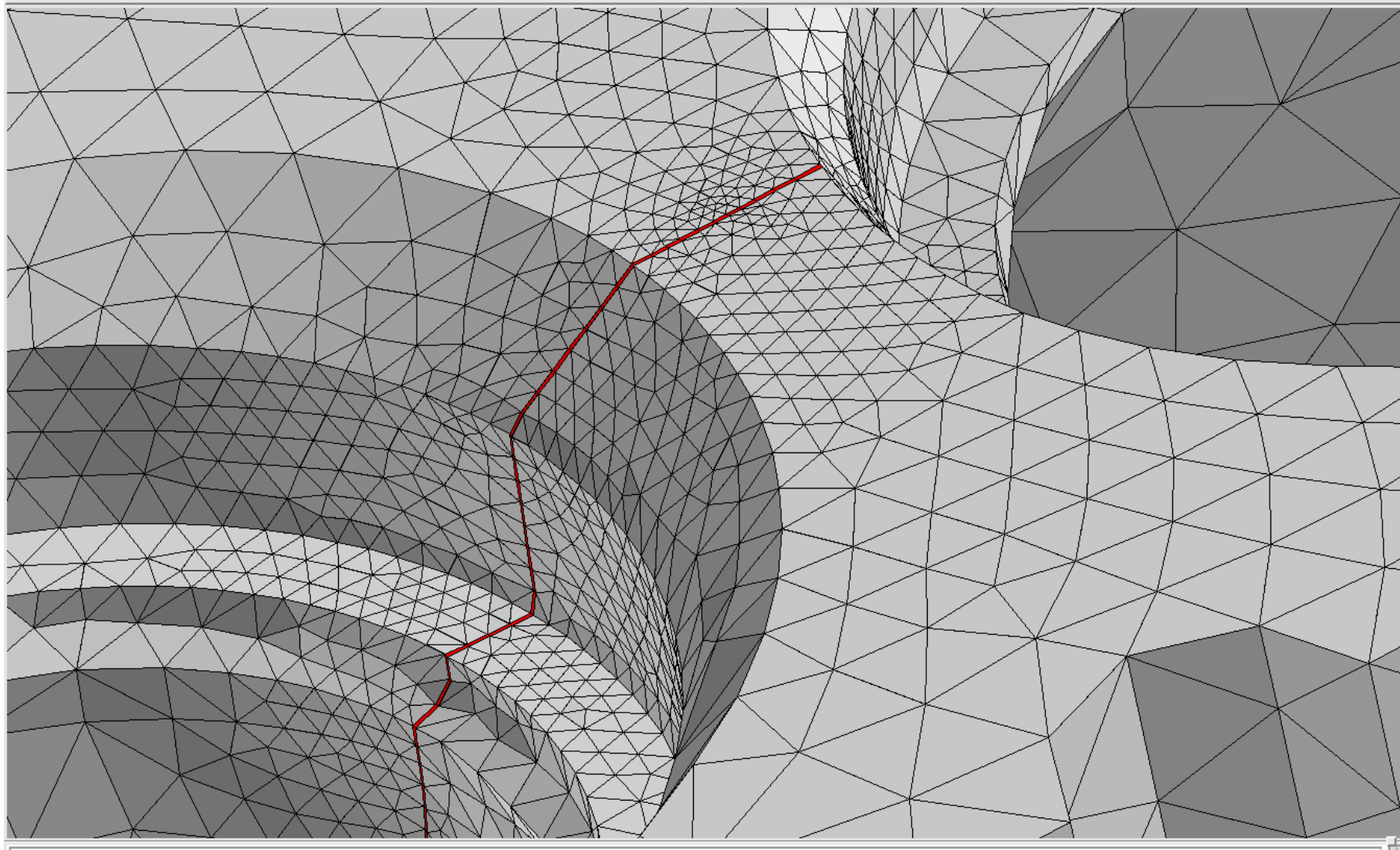


- Present know-how of engineers : **Models for predicting crack initiation**
- Objective of the study : **Design using a damage tolerance approach (model for crack propagation)**



Fatigue





RUPTURES EN SERVICE - DESCRIPTION et PREVENTION

A. Pineau

Centre des Matériaux - Ecole des Mines de Paris

UMR CNRS 7633

andre.pineau@enmsp.fr

I - INTRODUCTION

II - RUPTURE FRAGILE

III - FATIGUE

IV - CORROSION et CORROSION SOUS CONTRAINTE

V - BIOLOGIE

VI - MOYENS DE PREVENTION

VII - CONCLUSIONS

MOYENS DE PREVENTION

- Plus facile de prévoir le passé que l'avenir !
- Assurance Qualité - Normalisation - Standardisation
- Formation. "Technically Literate Societies"

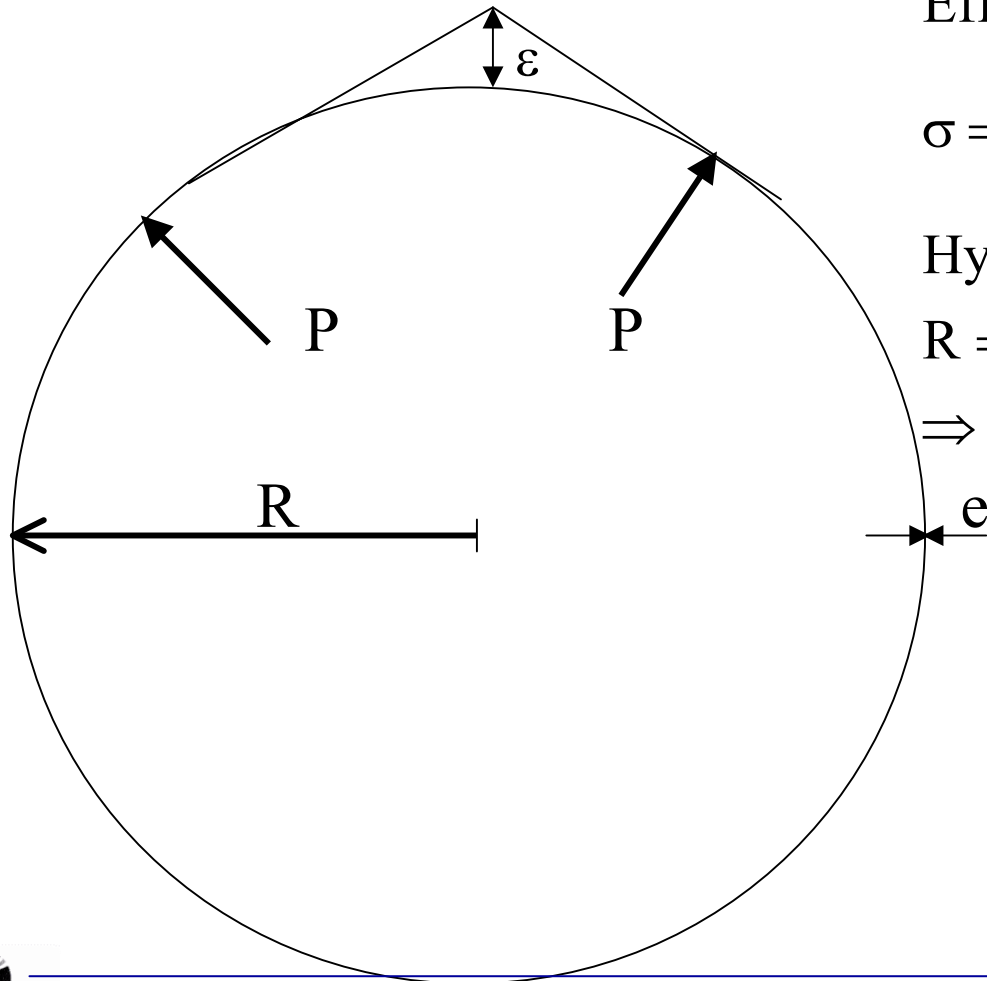
MESURES CONSERVATOIRES

- Exemple du Pipeline SPLSE

MESURES CONSERVATOIRES - EXEMPLE SPLSE

- Continuer (après réparation) l'exploitation de l'oléoduc
 - Réduction de Pression → Augmentation Taille critique du défaut
Par ex. 10 bars → 750 μm
 - Analyse à la propagation de défauts similaires à celui ayant engendré la rupture
 - * Relevé des fluctuations de pression
 - * Décompte des cycles : règle de Rainflow
 - * Courbe $da/dN - \Delta K$
- Elimination des tubes présentant un effet de toit non tolérable
 - Durée de vie visée 40 ans
 - Une trentaine de tubes répartis sur 800 Km éliminés (construction d'un système d'inspection robotisé)
- Réhabilitation de l'installation
 - Epreuve hydraulique. Retour à la pression nominale
 - Suivi depuis 1982 en propagation "potentielle"

NOCIVITE EFFET DE TOIT



$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{PR}{e}$$

Effet de toit (ε)

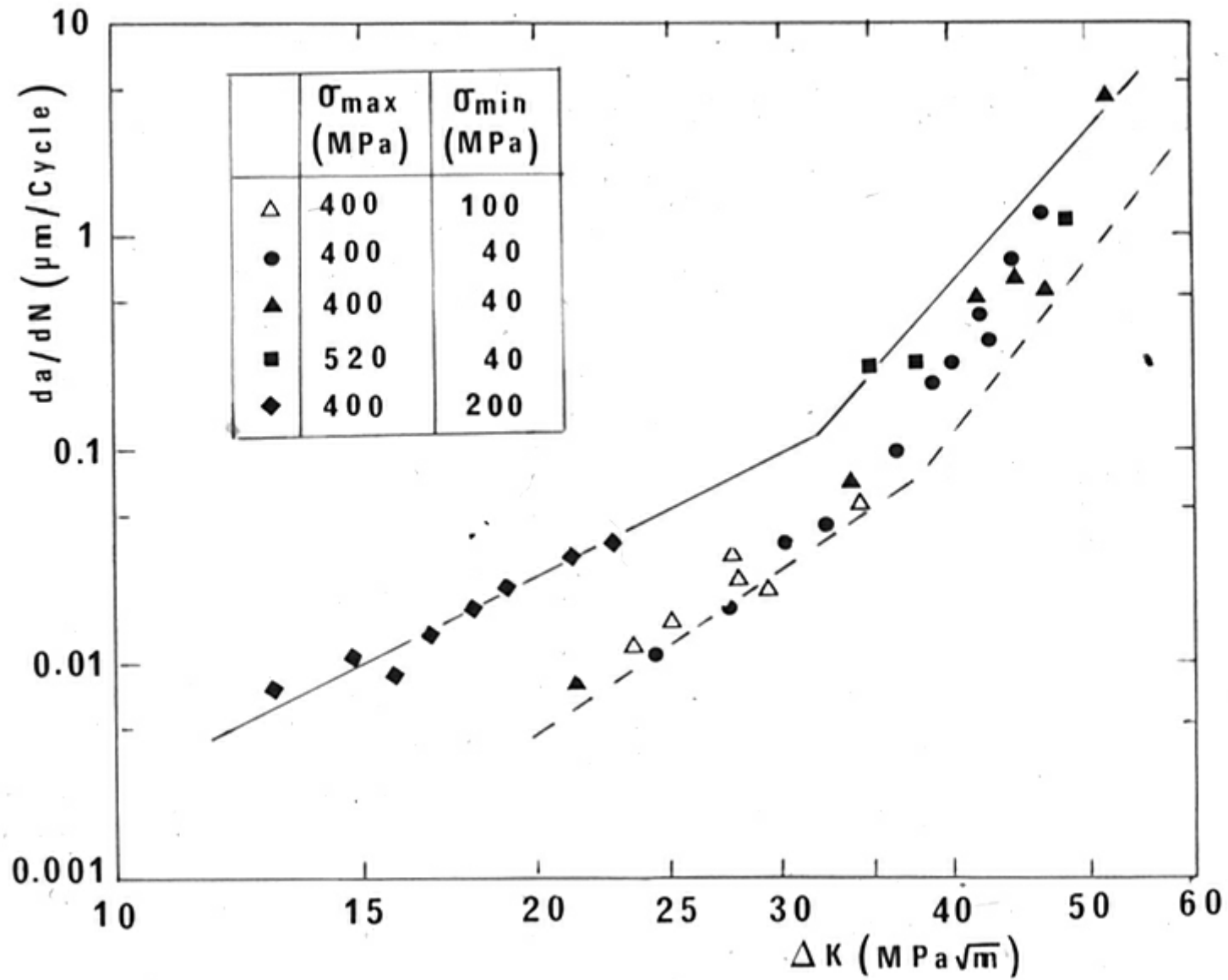
$$\sigma = \sigma_{\text{nom}} \left[1 + \frac{6\varepsilon}{e} \right]$$

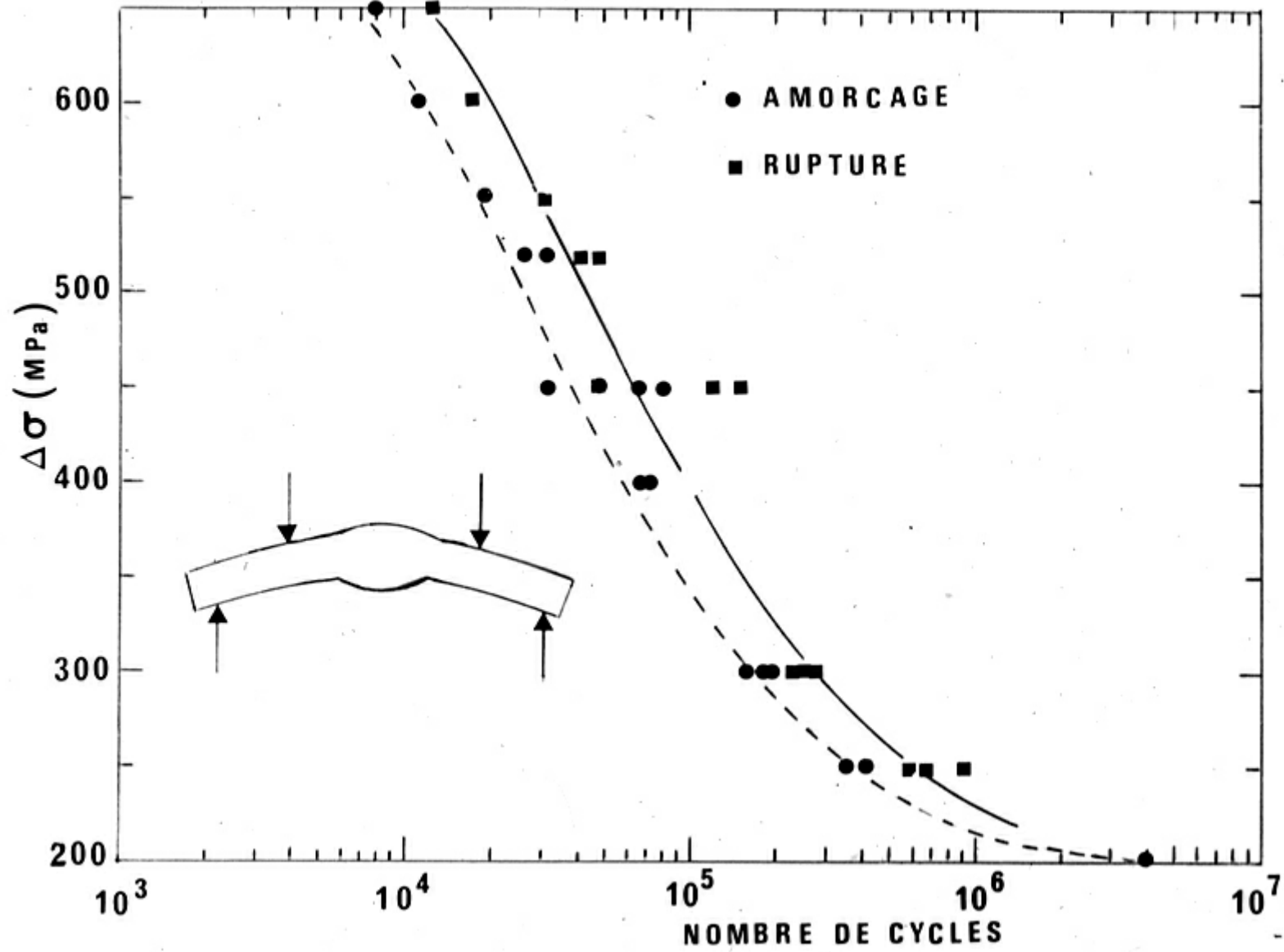
Hyp: Petits déplacements

$$R = 500 \text{ mm}; \quad \varepsilon = 5 \text{ mm}; \quad e = 10 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \sigma = 4\sigma_{\text{nom}} !$$







RUPTURES EN SERVICE - DESCRIPTION et PREVENTION

A. Pineau

Centre des Matériaux - Ecole des Mines de Paris

UMR CNRS 7633

andre.pineau@enmsp.fr

I - INTRODUCTION

II - RUPTURE FRAGILE

III - FATIGUE

IV - CORROSION et CORROSION SOUS CONTRAINTE

V - BIOLOGIE

VI - MOYENS DE PREVENTION

VII - CONCLUSIONS

CONCLUSIONS

CONCEPTION

- **S'appuyer sur les normes**
- **Bureaux d'études souvent trop compartimentés**
- **Incidences de la délocalisation...**

EXPLOITATION

- **Introduction des concepts Industrie Aéronautique
SAFE LIFE/RETIREMENT FOR CAUSE**
- **Nombreux dangers avec la corrosion**

MATERIAUX

- **Encore des marges à gagner - Inventer nouveaux mécanismes
amélioration TÉNACITÉ**
- **Se méfier des aciers à très haute résistance si CST non étudiée**

FORMATION & RECHERCHE

- **Professionnelle**
- **Modes d'endommagement pas encore assez enseignés**
- **Vaste champ d'investigation en biologie**
- **Nombreux couplages : fatigue/fluage/oxydation**



MERCI POUR VOTRE PATIENCE

andre.pineau@ensmp.fr

