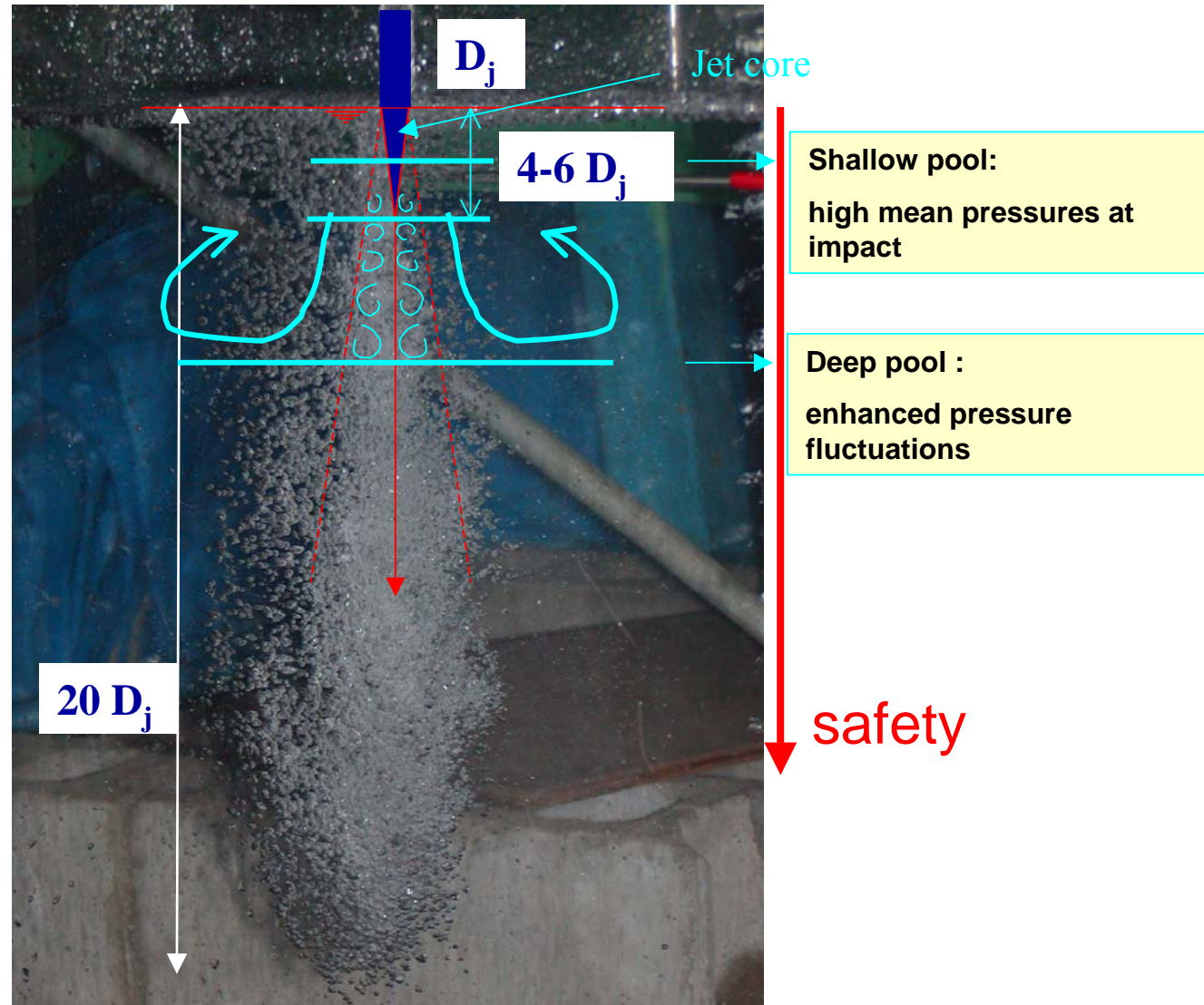


Air bubbles at the  
water-rock interface

# Difusão de jatos mergulhantes



Hartung & Häusler (1973) :

- 70 to 85% of the  $E_c$  is dissipated at  $20D_j$
- Purely hydrodynamic estimate of  $t_u$

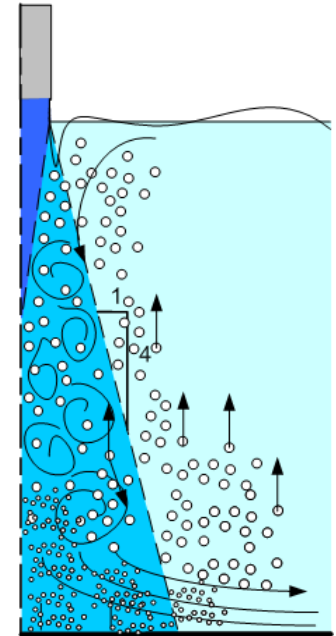
Photo courtesy of H. CHANSON,  
Queensland University, Australia

# Background

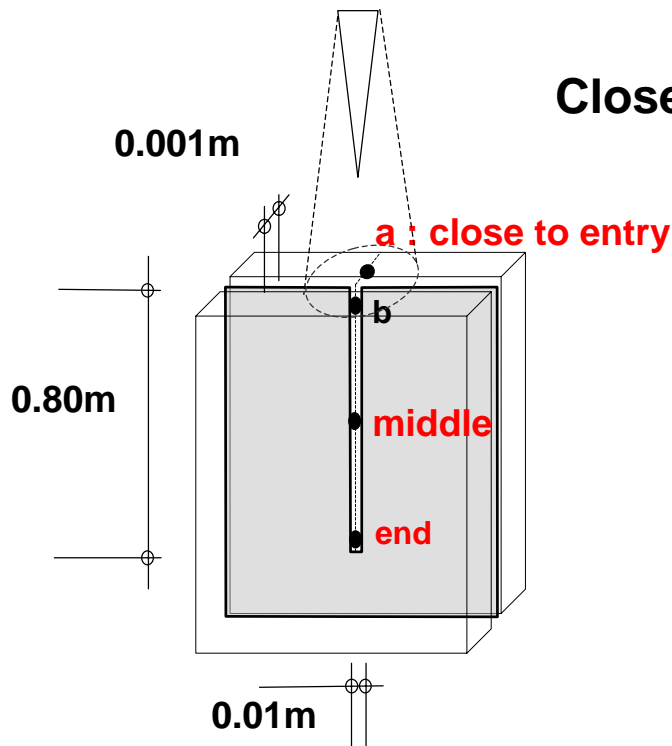
## Influence of entrained air on impact pressures and rock scour

### In the pool

- Buoyancy acts in counter-flow
- Enhances jet diffusion / dissipation
- Reduction of mean impact pressures
- Increase of turbulent fluctuations (RMS, Cs, K)



### Investigations on transients inside fissures at EPFL



### Closed-end Fissure

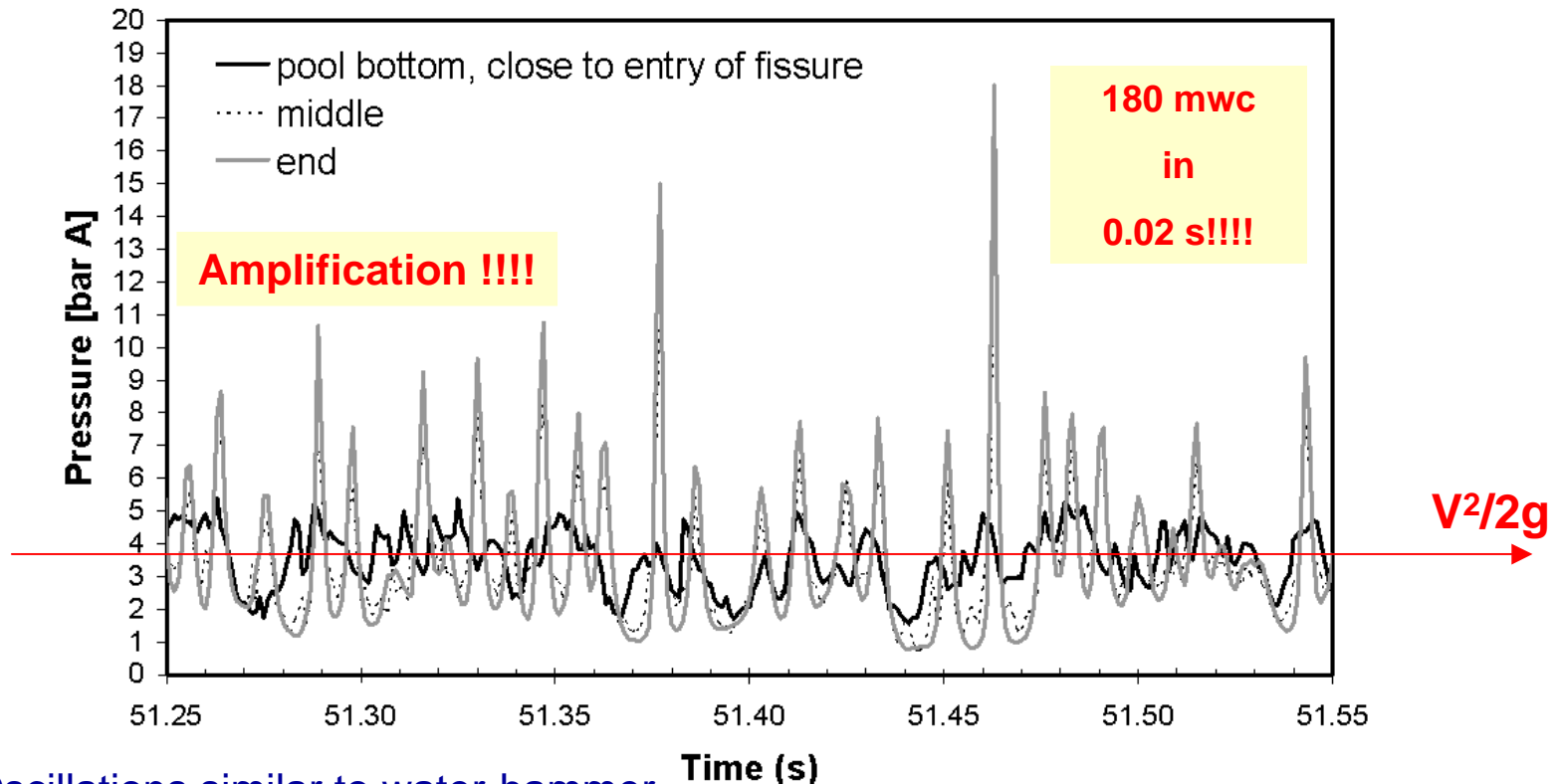
### Test parameters, flat pools

- Jet velocities  $7.5 - 30 \text{ m/s}$ ,  $Tu = 4 - 8 \%$ ,
- Pool depth  $Y/D = 1.04 \text{ to } 12.4 \text{ (sub)}$ ;
- break-up  $L/L_b = 0.02 - 0.44$

# Investigations on transients inside fissures

Bollaert (2002); Manso (2006)

FB3, Y/D = 9.3, V = 27 m/s, 1 kHz (filtered at 0.5 kHz)



Oscillations similar to water-hammer

Oscillations at regular intervals => frequencies between 10 - 100 Hz

Time lag between spikes at **middle** and **end** sections => low wave celerity

Pressures spikes < atmospheric pressure => Water column separation

=> Crack propagation by brittle failure (sudden) or fatigue (cyclic)



# Investigations on transients inside fissures

Fiorotto & Rinaldo (1988, 1992), Liu et al. (1998), Bollaert (2002); Manso (2006)

## Presence of air bubbles inside rock fissures or slab joints

- **Reduction in density**, increase in compressibility,
- Reduction of pressure wave celerity “c” (speed of sound in air-water)
- Pressure wave modulation (superposition)

**Negative? .....**

### Amplification

- energy concentration around lower (most-energetic) frequencies
- $f_{\text{excitation}} / f_{\text{mode}} > 0.6 - 1.0 \Rightarrow$   
Resonance

**Positive? .....**

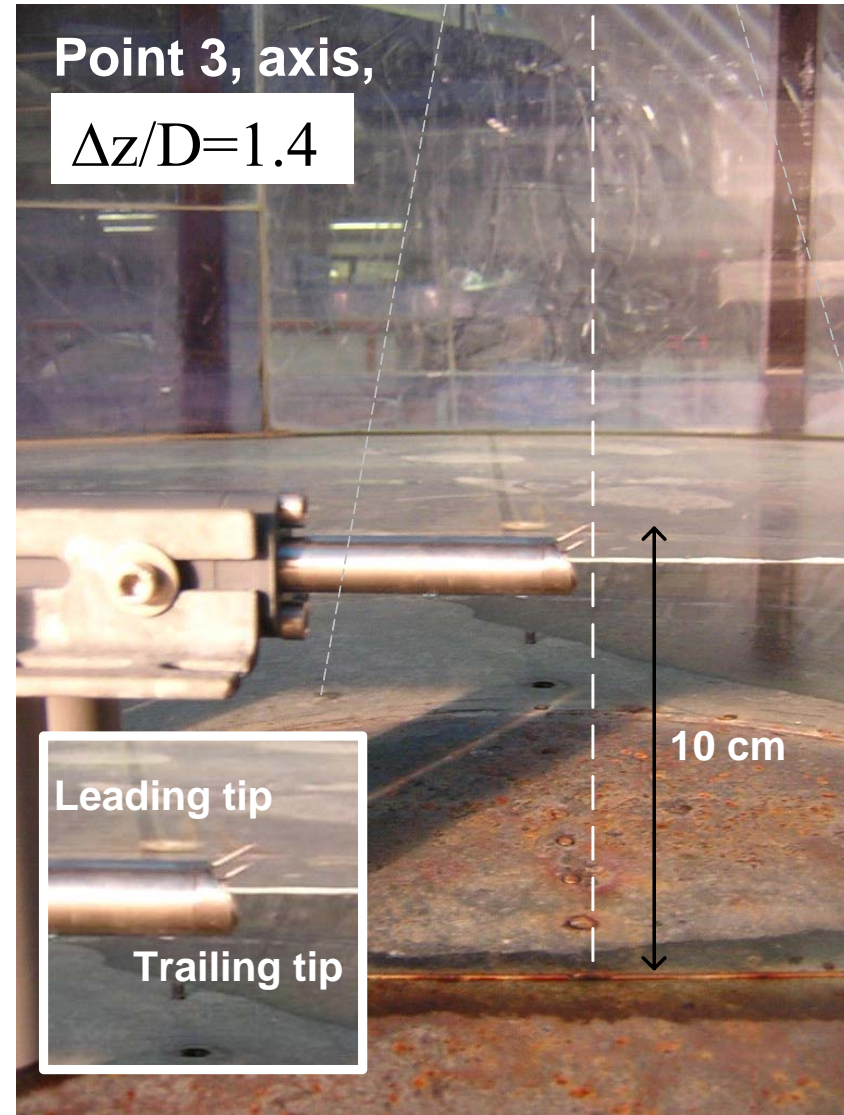
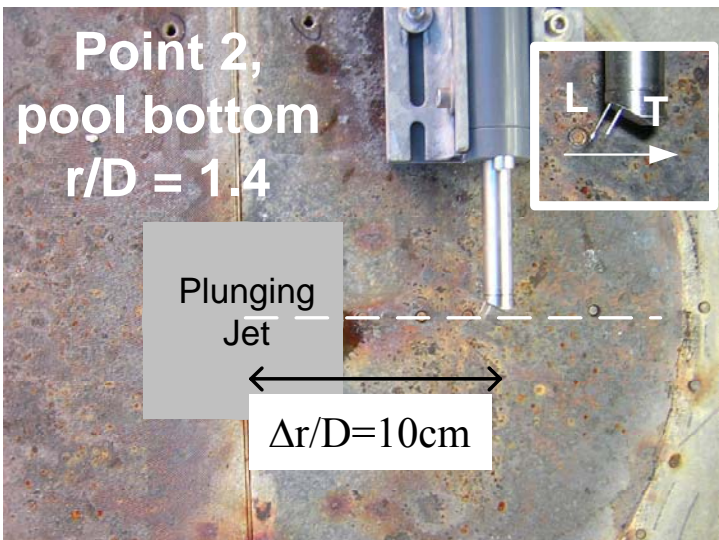
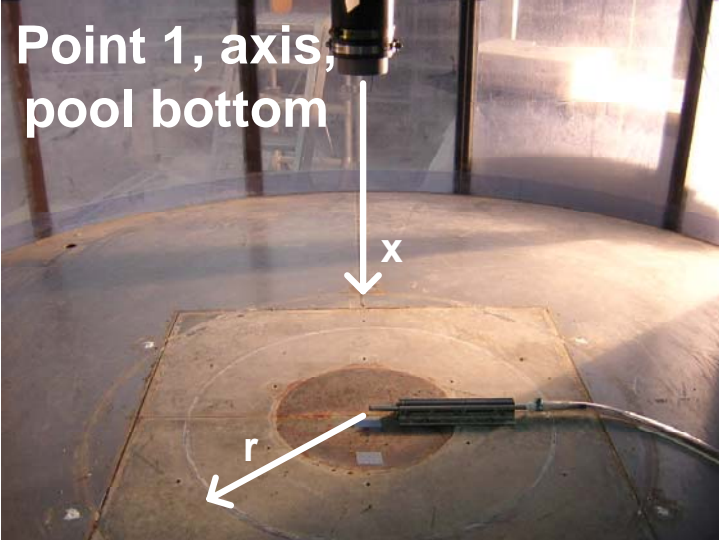
### Damping

- Phase difference
- Low “net” balance

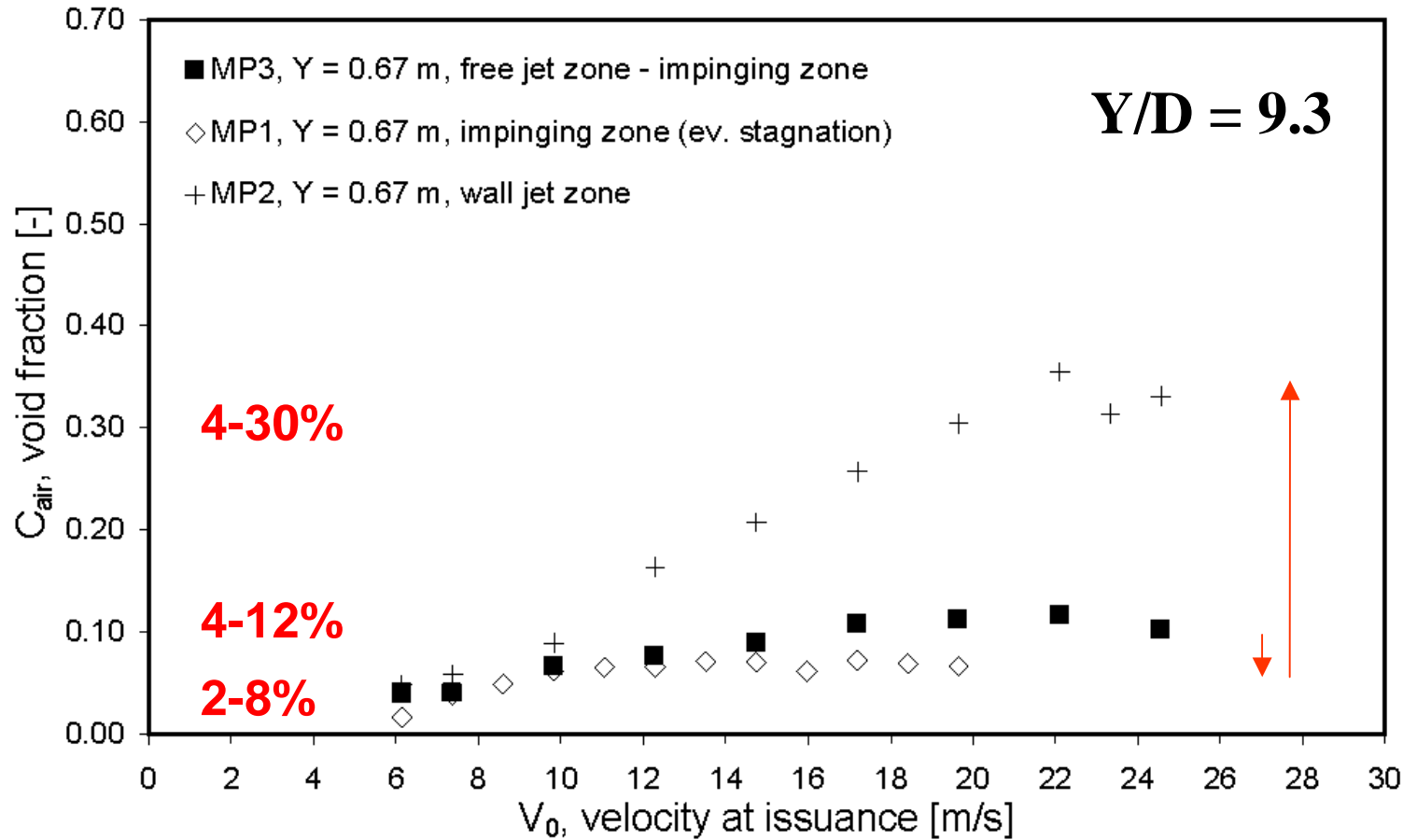
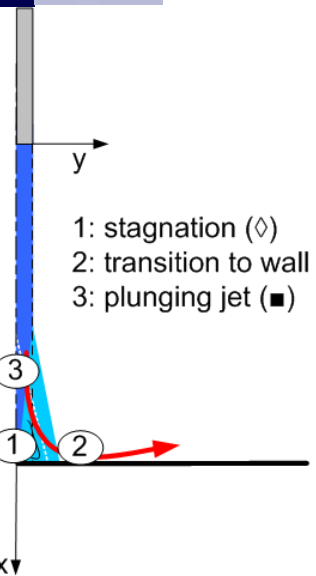
### Transient flows

- = f (Pxx).....aerated pool-jet dynamics
- = f (density)... **AIR**
- = f (fissure) ... friction, shocks

# Investigation on air bubble behaviour close to stagnation



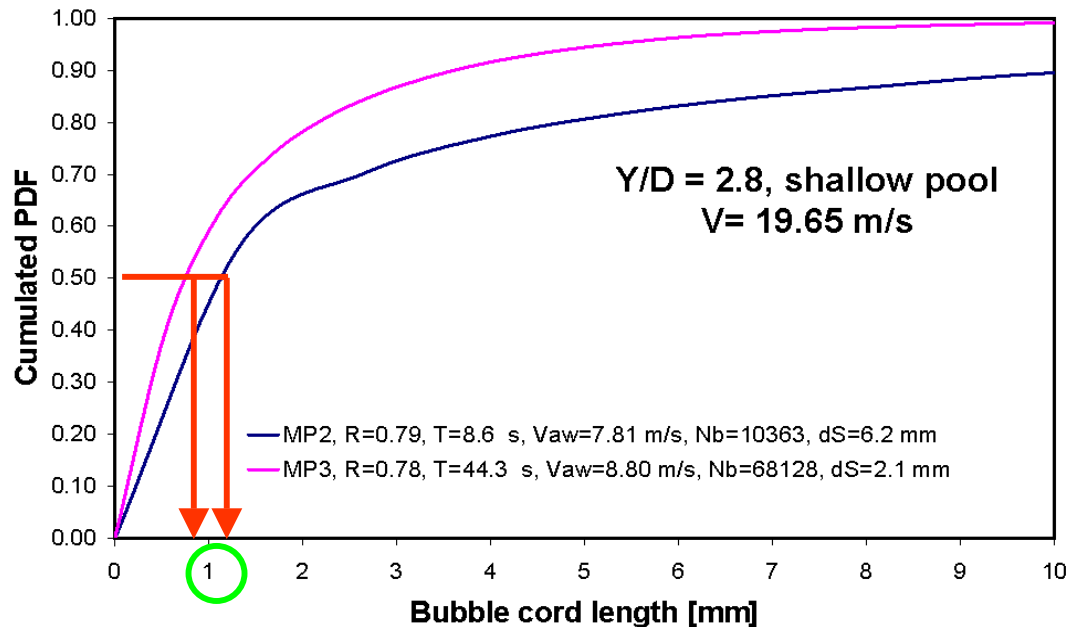
# Spatial distribution of the void fraction



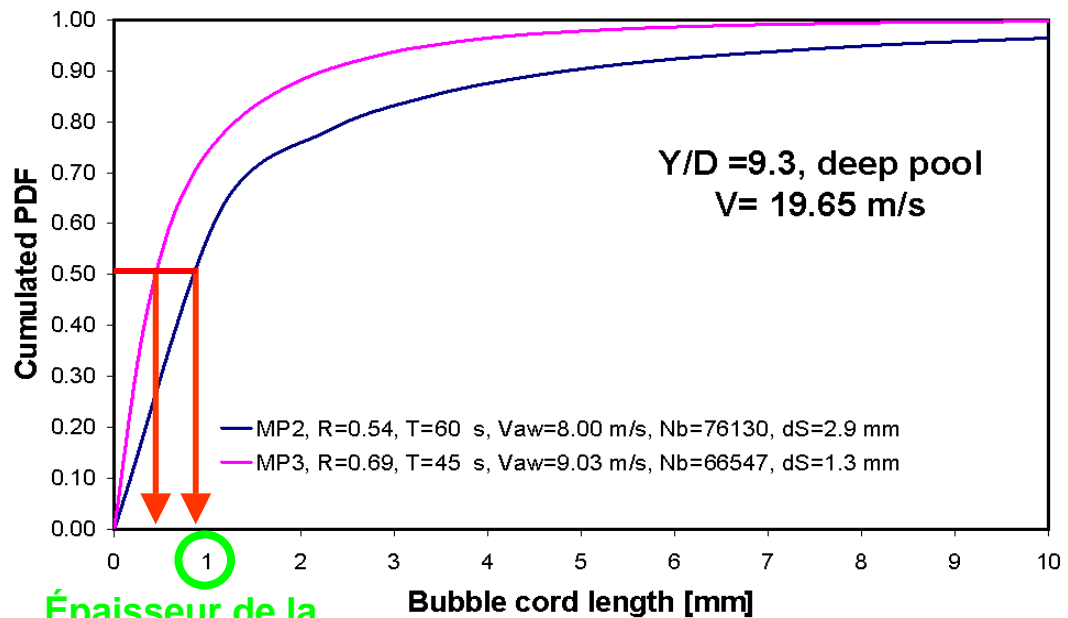
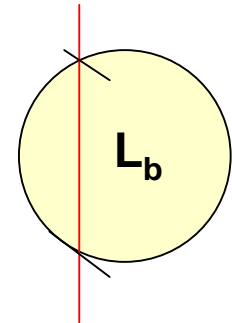
**compression / (re-) solution**

**expansion / release (gasification)**

# Longueur des cordes des bulles d'air interceptées

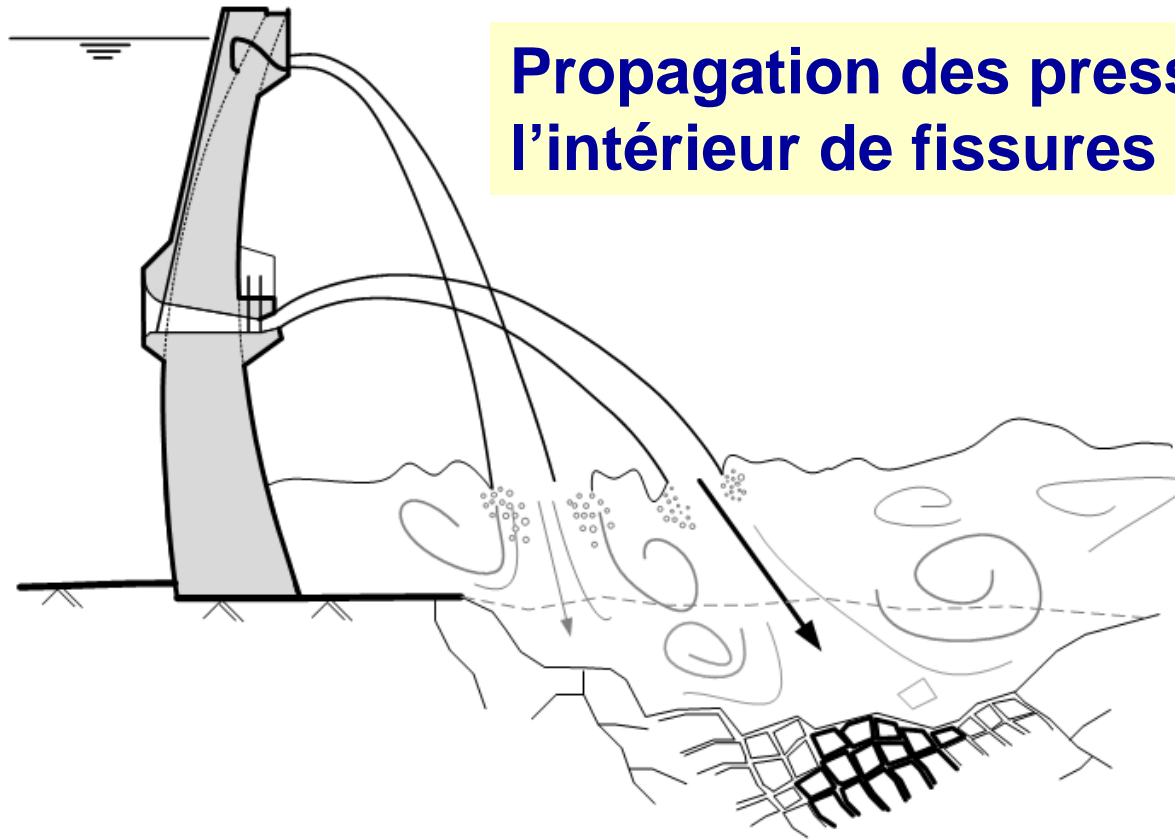


$$L_b = V_{aw} \cdot \tau_i$$



**Bulles d'air de dimensions comparables aux fissures en nature**

**Épaisseur de la fissure**



## Propagation des pressions à l'intérieur de fissures

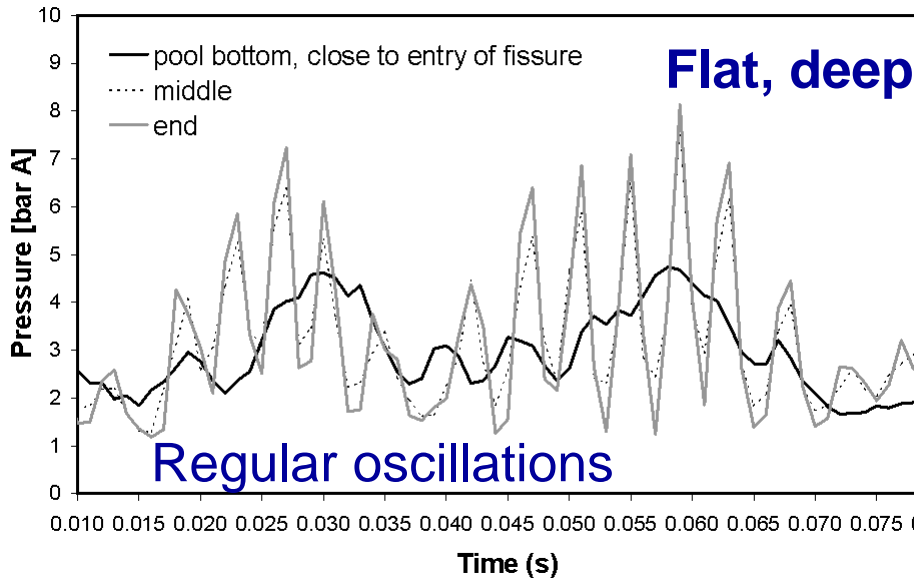
### Bassins à fond plat vs. Bassins étroits

Amplification pour bassins profonds,  
e.g.  $Y/D=9.3$

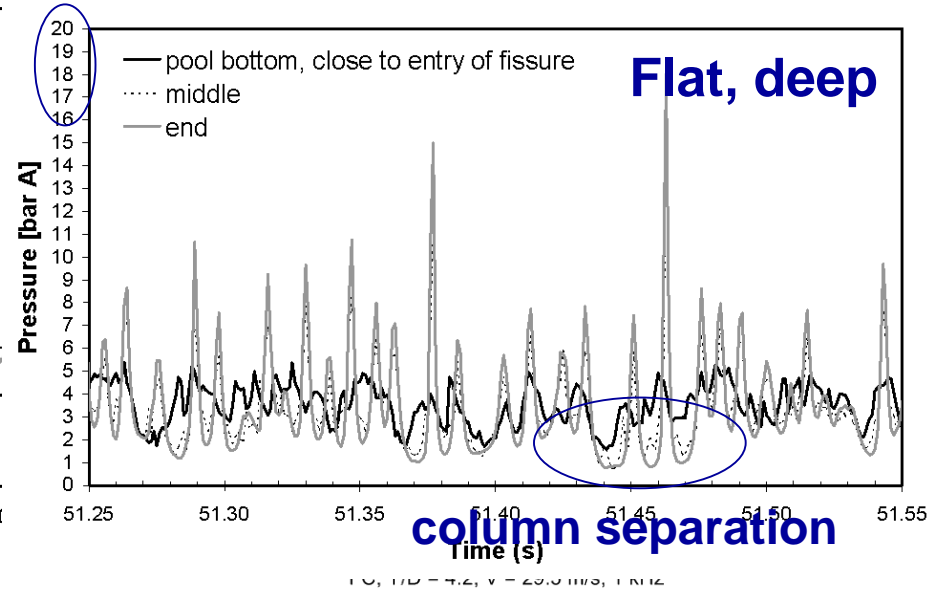
?

# Pressure time series inside closed-end fissures

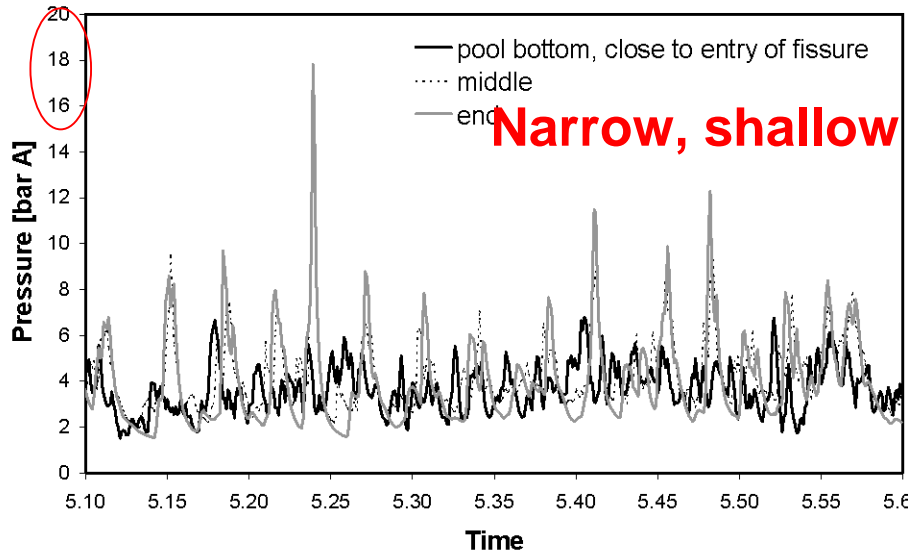
FB3, Y/D = 9.3, V = 27 m/s, 1 kHz



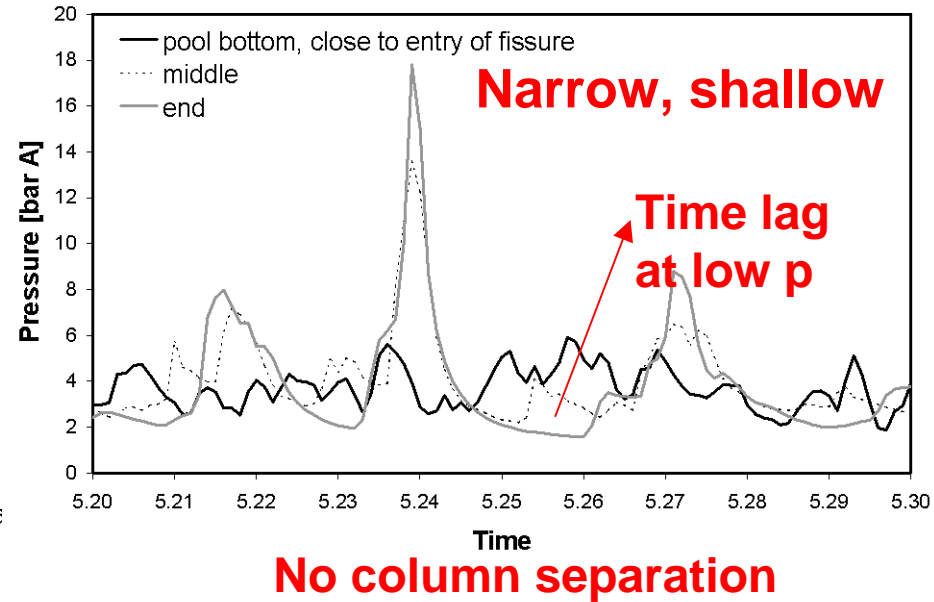
FB3, Y/D = 9.3, V = 27 m/s, 1 kHz (filtered at 0.5 kHz)



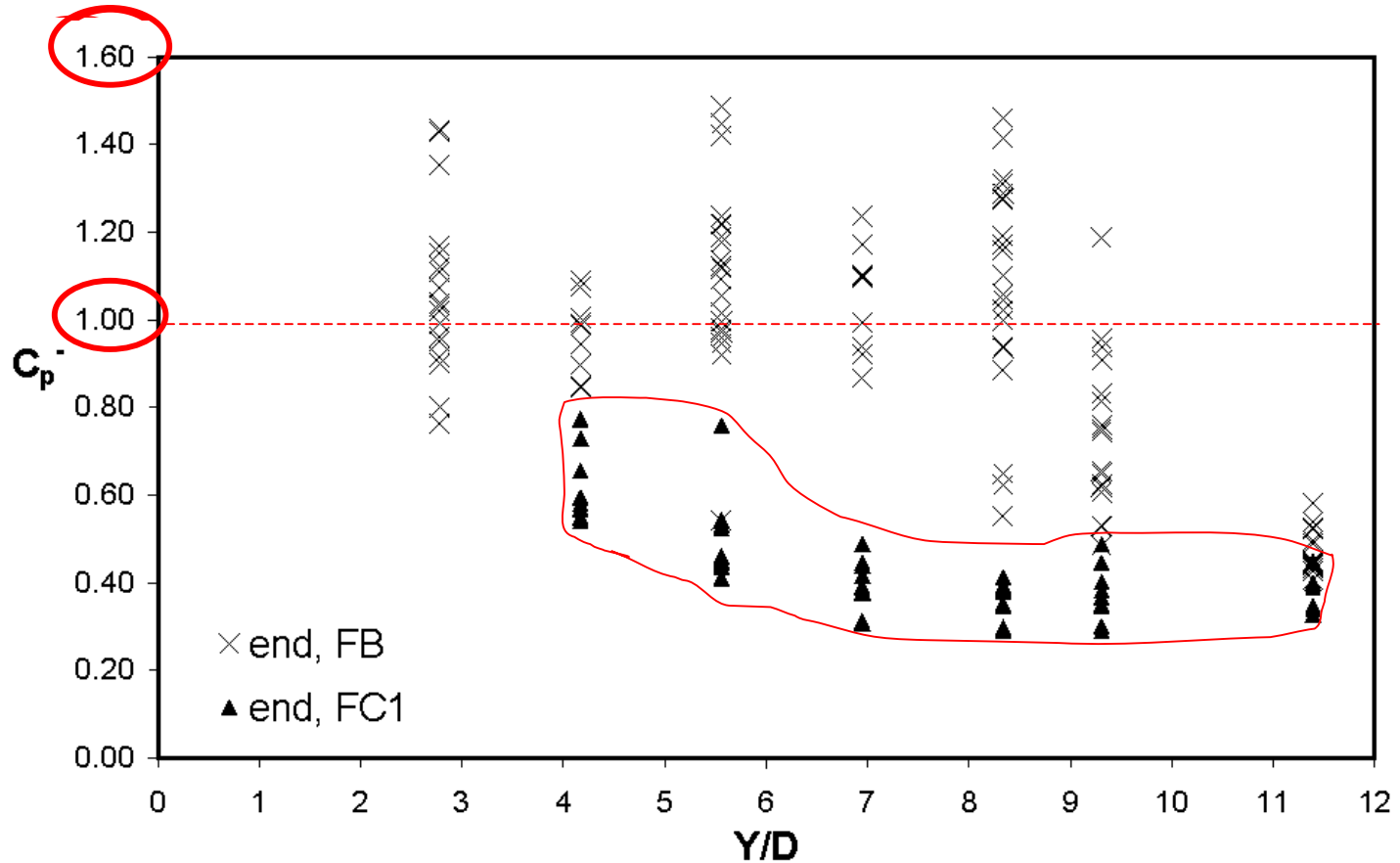
FC, Y/D = 4.2, V = 29.5 m/s, 1 kHz



FC, Y/D = 4.2, V = 29.5 m/s, 1 kHz



# Fluctuating and extreme pressures inside the fissure



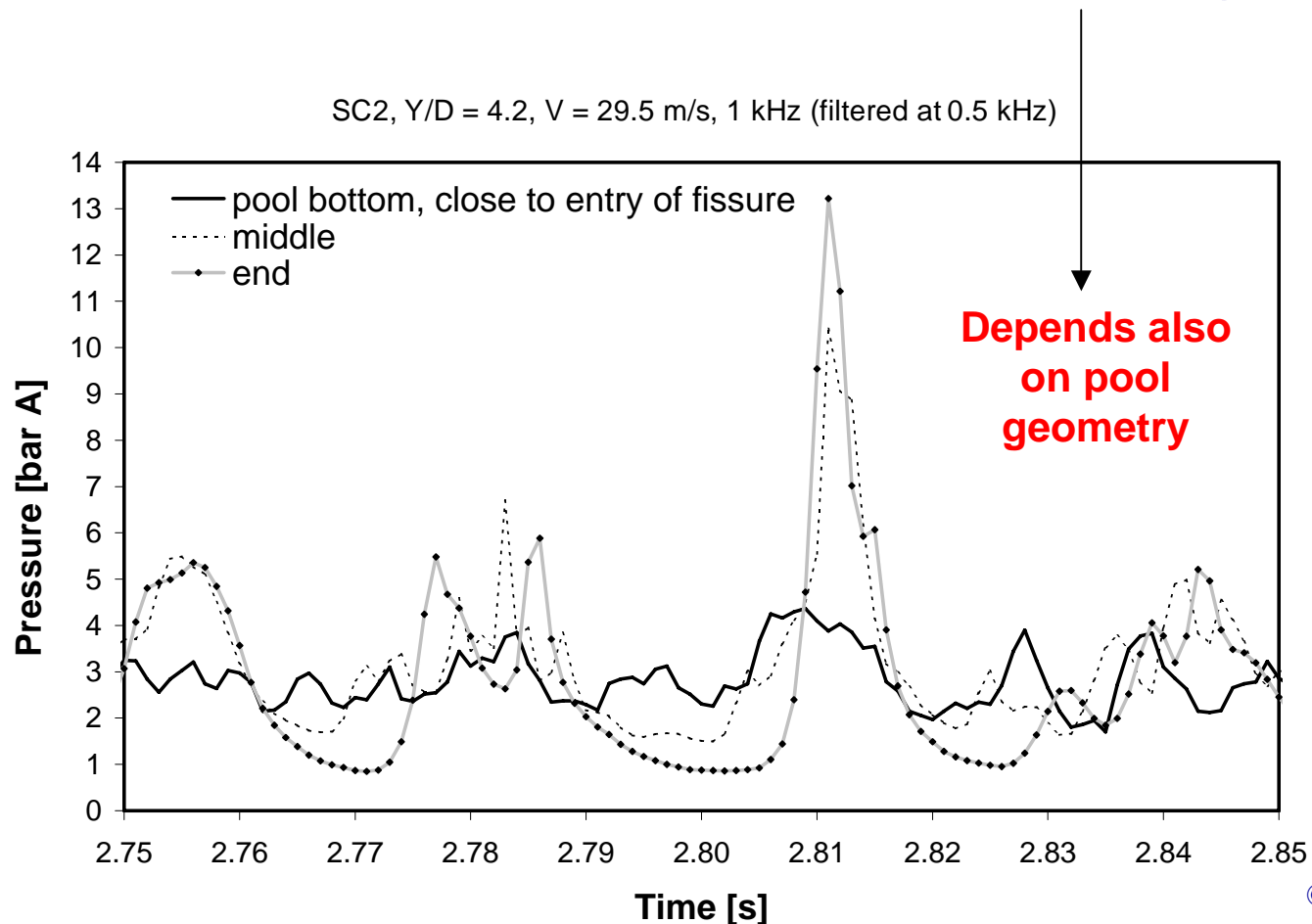
$$C'_{pd} = \frac{\frac{\text{RMS}}{\gamma}}{\frac{\alpha V^2}{2g}}$$

$$C^+_{pd} = \frac{\frac{(p_{\max} - p_{\text{mean}})}{\gamma}}{\frac{\alpha V^2}{2g}}$$

$$C^-_{pd} = \frac{\frac{(p_{\text{mean}} - p_{\min})}{\gamma}}{\frac{\alpha V^2}{2g}}$$

# Summary (inside fissures)

- Transient regimes develop inside closed-end fissures.
- Pressure wave superposition generates **amplification**.
- High pressure peaks occur **with/without column separation**.
- High peaks in shallow confined pools and deep flat pools.
- **Dynamic response** of the fissure = f (impact loading, etc..)



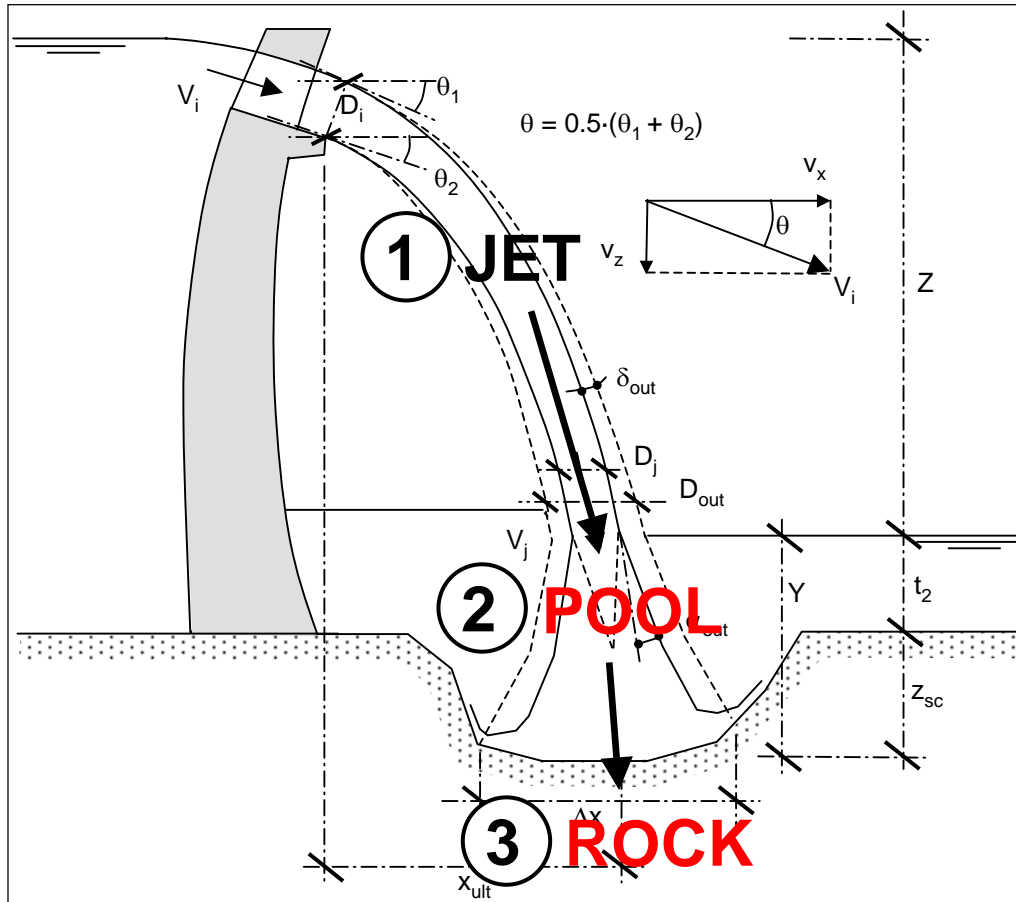


# Principais resultados de pesquisa recente

- **As ações hidrodinâmicas médias e turbulentas** são  $f(V_0, T_u, D, \text{profundidade do colchão de água} \dots \dots \dots \text{e geometria da fossa de erosão})$
- **O padrão de escoamento induzido pela geometria da fossa** (para cada  $Y/D$  e  $V$ ) tem influência direta na **difusão dos jatos** e na **entrada e propagação de bolhas de ar**.
- A propagação de pressões dentro de fissuras fechadas gera **regimes transientes com picos de pressão elevados**.
- Fossas confinadas lateralmente reduzem **pressões médias no impacto e aumentam a dissipação na coluna de água** (excepto para bacias pouco profundas).
- Valores de pressão obtidos para fossas de fundo plano permitem estimativas conservativas das ações hidrodinâmicas na interface.
- Fracturação da rocha pode ocorrer por ruptura frágil também devida a fenómenos transientes (e não apenas médias), e por fadiga

# EPFL comprehensive scour model – CSM

(Bollaert & Schleiss 2005, version 2.0 ongoing dev. acc. Manso 2006)



- Physically based
- Transient pressures
- Time-evolution

**Flat bottom**  
**Confined pools**

**CFM model for crack propagation**

**Instantaneous pressure values for confined pools**

**Block displacement**

**1D....2D....and 3D models**

# Jatos mergulhantes: condições de saída

## Expansão lateral e contracção do núcleo no ar

- I. Em pressão (vazão controlada por comportas ou válvulas)
- II. Livre

### Análise preliminar

- Tipo de órgão de descarga
- Velocidade média =  $f(H)$
  
- Análise detalhada
- Expansão lateral =  $f(Tu, V_0)$
- Contracção do núcleo e eventual fragmentação do jacto =  $f(Tu)$
- Perfil de Velocidade no núcleo =  $V(n)$  à saída
- $Ar = f(V, Tu, \text{etc.})$



# Difusão de jatos livres

## Intensidade de turbulência

$$Tu = u'/U$$

$U$  – velocidade média do escoamento numa seção

$u'$  – parâmetro representativo das flutuações de velocidade axiais (RMS)

Turbulento liso:  $Tu < \sim 2\%$  (e.g. turbina pelton)

Turbulento rugoso:  $Tu > \sim 2\%$

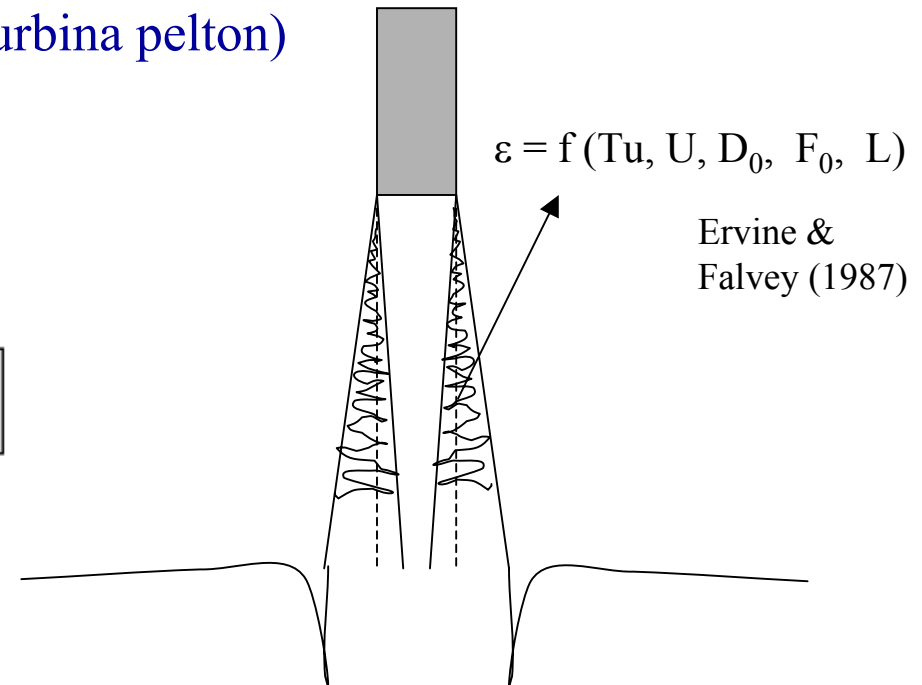
$$\varepsilon = \frac{1.14 \cdot Tu \cdot U^2}{g} \left[ \sqrt{\frac{2 \cdot L}{D_0 \cdot F_0^2} + 1} - 1 \right]$$

Ervine et al. (1997)

Dilema do bombeiro

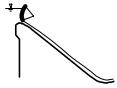
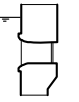


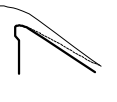
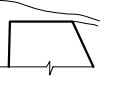

(Rouse et al. 1950):

**distância vs. área**

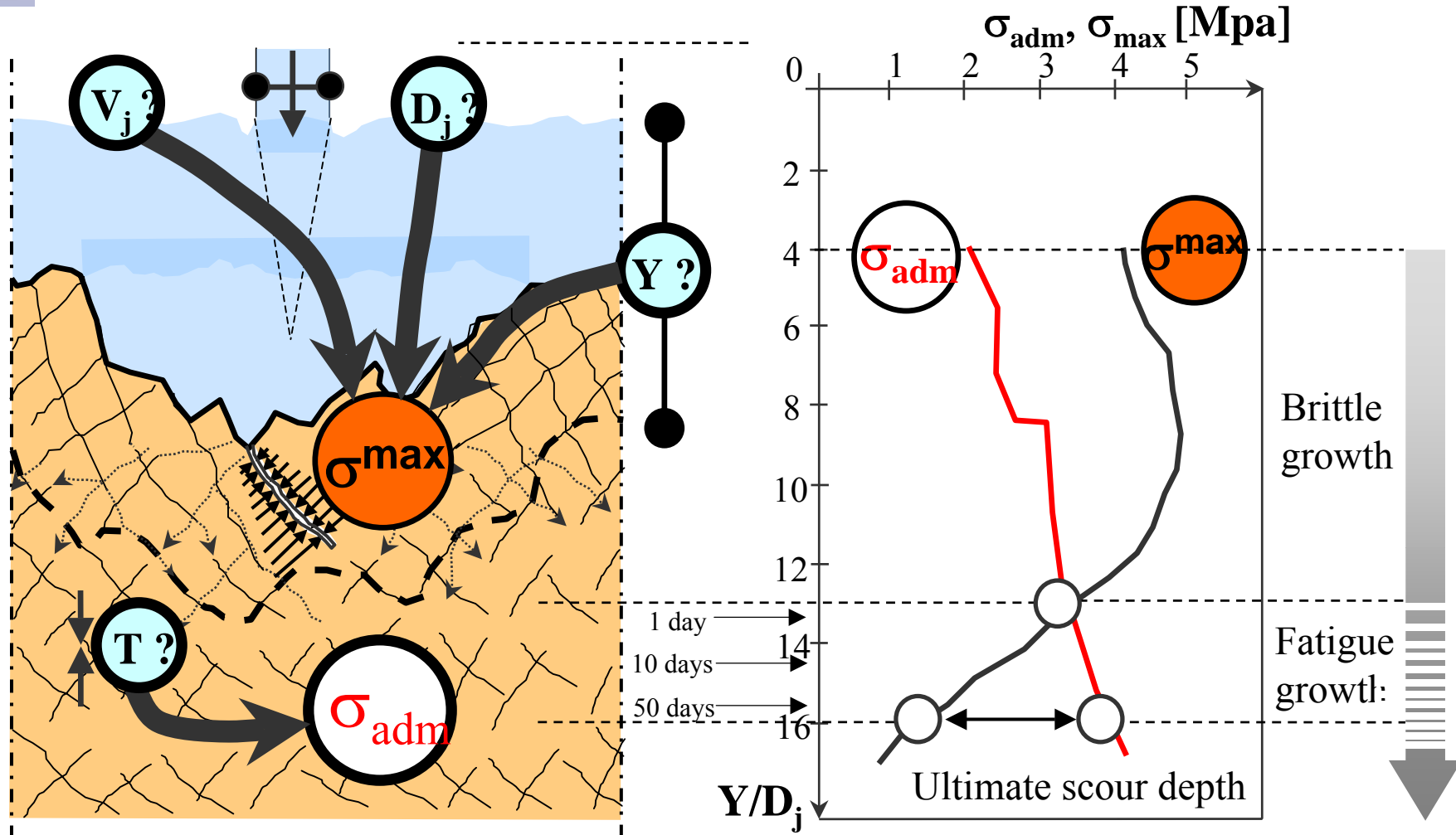


Com base em análise de fotografias com intervalos de exposição curtos

# Casos típicos (Manso 2006)

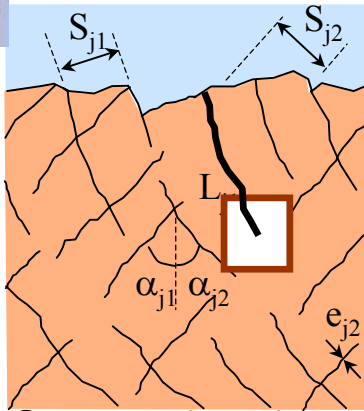
Case	Schematic	Type of jet	Type of Intake	Boundary layer development	Outlet structure	Hydrodynamics	Aeration	Angle of lower nappe	Angle of upper nappe	Turbulence intensity $Tu$ [%]	Kinetic energy correction factor [-]
1		Trajectory	WES weir (gated or non-gated)	Fully or partially developed	Ski jump (plane bucket)	$P(n)$ concave, $V(n)$ deformed logarithmic tending to uniform	Partially or fully aerated core	tang(lip)	approx. tang(lip), eventual correction	4 - 8 %, take 4% for high velocities	tending towards 1.0 for high velocities
2			Orifice, low head	Non-developed	Curved lip	$P(n)$ hydrostatic, $V(n)$ turbulent ev. swirling tending to uniform for high $V$	Depending on submergence	tang(lip)	approx. tang(lip), eventual correction	3 - 8 %	tending towards 1.0 for high velocities
3			Orifice, high head	Non-developed	Curved lip	$P(n)$ hydrostatic, $V(n)$ quasi uniform	None	tang(lip)	approx. tang(lip), eventual correction	2 - 4 %	approx. 1.0
4		Overfall	WES weir, short chute	Partially developed	Straight lip	$P(n)$ approx. parabolic, $V(n)$ almost uniform	None	tang(lip)	approx. tang(lip)	Low, < 3 %	approx. 1.0
5			WES weir, long chute	Partially or fully developed	Straight or curved lip	$P(n)$ hydrostatic, $V(n)$ turbulent uniform	Partially aerated	tang(lip)	approx. tang(lip)	4 - 5 %	approx. 1.1
6			Broad-crested weir	Non-developed	Straight lip	$P(n)$ approx. parabolic, $V(n)$ freefall quadratic	None	horizontal	approx. 4 to 5°	Low, < 3% but may depend on crest details	approx. 1.0
7		Complex overfall	WES weir	Partially or fully developed	blocks or deflectors	Mixed	Partially or fully aerated	tang(lip)	approx. tang(lip)	8 % overall or more	-

# FM stress intensity model applied to rock scour (Bollaert 2002)

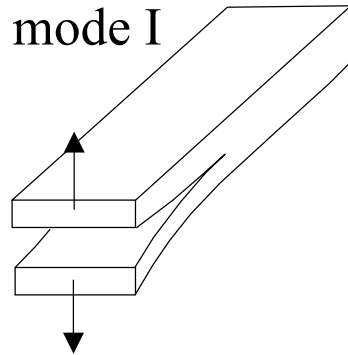


# Theory: Linear Elastic Fracture Mechanics

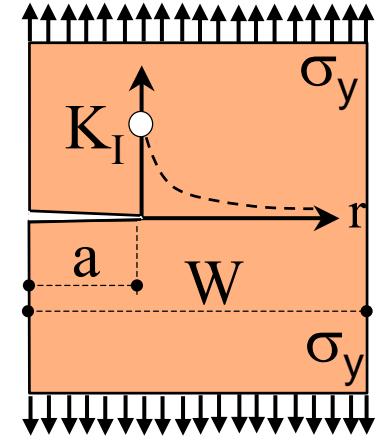
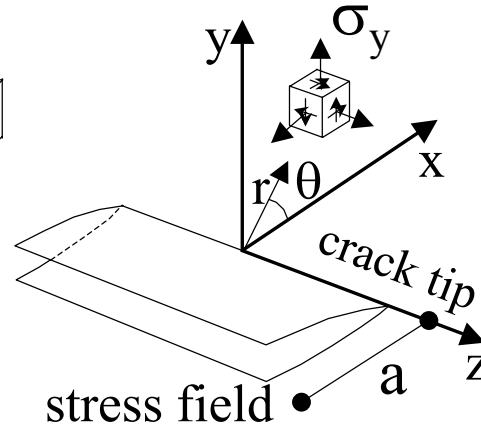
## Stress Intensity Factors (Irwin 1957)



@Bollaert (2002)



Griffith (1920)  
Irwin (1957)  
Paris et al. (1961)



stress singularity

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{ij}(\theta) + \text{higher order terms}$$

$$K_I = \sigma_y \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

(Costin & Holcomb 1981)

- $K_I$  = f (pressure distribution)
- $K_I$  = f (in-situ stress field)
- $K_{I\text{dyn}}$  = f (pressurization rate)
- $f(a/W)$  = f (geometry fissure) planar, ...
- $K_{Ic}$  = fracture toughness value

- literature

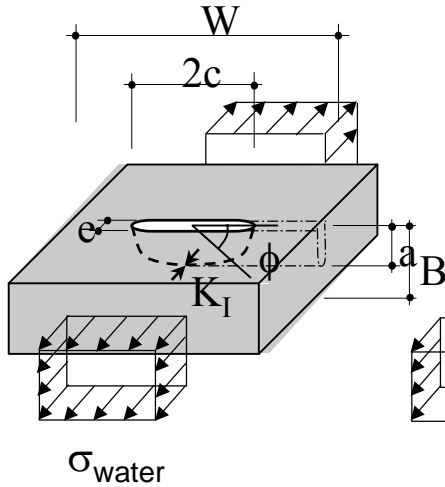
- tests

- Grady & Kipp (1980)
- Ewalds & Wanhill (1986)
- Haimson & Zhao (1991)
- Zhao & Li (2000)
- Zhao (2000)
- Zhang et al. (2000)

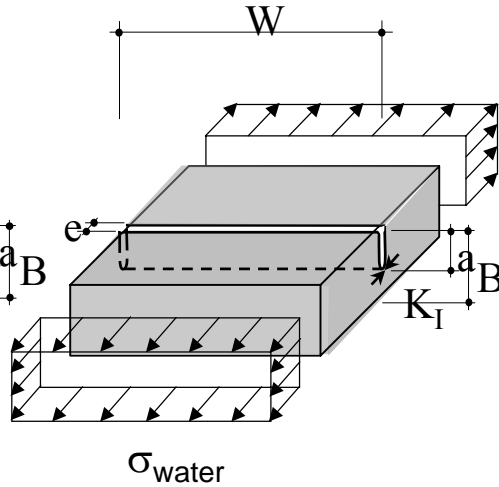
# Theory: Linear Elastic Fracture Mechanics

## Fissure discretization

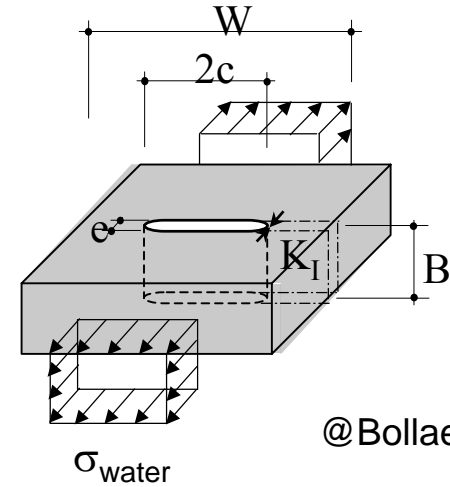
Semi-elliptical joint (EL)



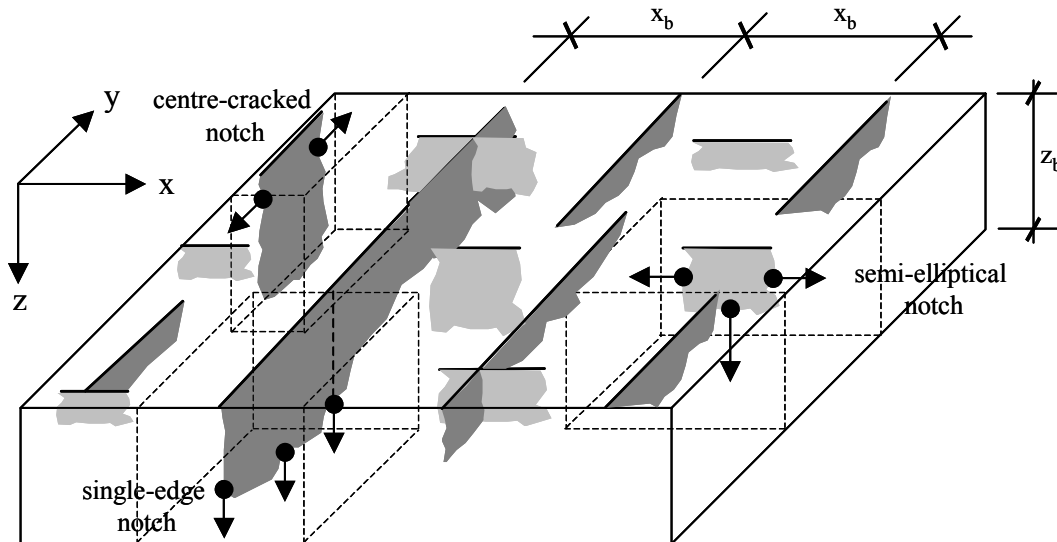
Single-edge joint (SE)



Center-cracked joint (CC)



@Bollaert (2002)



# The module of the rock mass

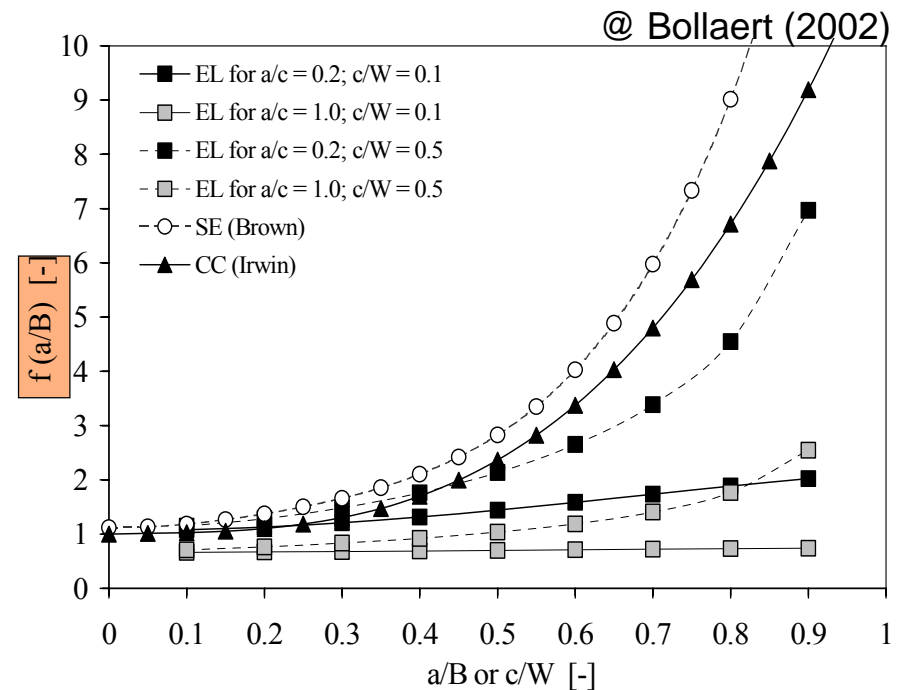
## Hydrodynamic loading

1.) The maximum dynamic pressure  $C_{pd}^{\max}$  in a closed-end rock joint

$$P_{\max} [\text{Pa}] = \gamma \cdot C_{pd}^{\max} \cdot \frac{\phi \cdot V_j^2}{2g} = \gamma \cdot \underbrace{(C_{pa} + \Gamma^+ \cdot C'_{pa})}_{C_{pd}^+} \cdot \frac{\phi \cdot V_j^2}{2g}$$

$$K_I = C_{pd}^{\max} \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

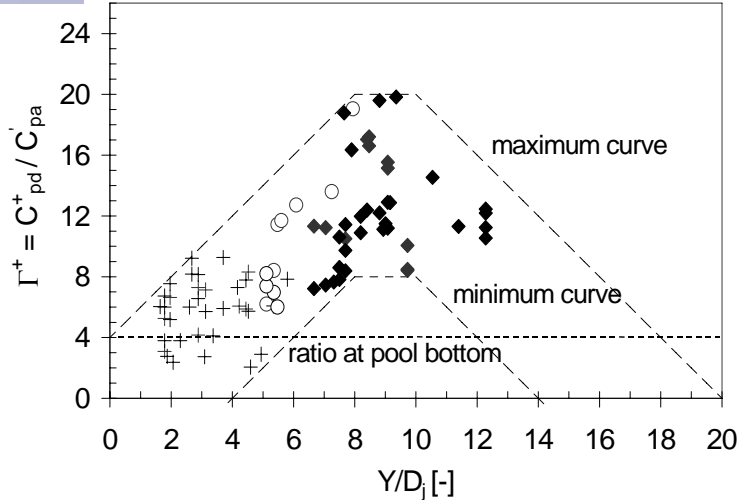
- Jet velocities 7 -30 m/s
- $Tu = 4$  to 8%
- Variable pool depth  $Y/D$
- Variable  $L/L_b$
- Variable aeration
- Flat pools
- 9 confined geometries
- 7 fissure types



# The module of the rock mass

## Hydrodynamic loading

@Bollaert (2002)



$$\Gamma^+ = 4 + 2 \cdot Y/D_j$$

$$\Gamma^+ = 20$$

$$\Gamma^+ = 40 - 2 \cdot Y/D_j$$

$$\Gamma^+ = -8 + 2 \cdot Y/D_j$$

$$\Gamma^+ = 8$$

$$\Gamma^+ = 28 - 2 \cdot Y/D_j$$

for  $Y/D_j < 8$

for  $8 \leq Y/D_j \leq 10$

for  $10 < Y/D_j$

curve of maximum values

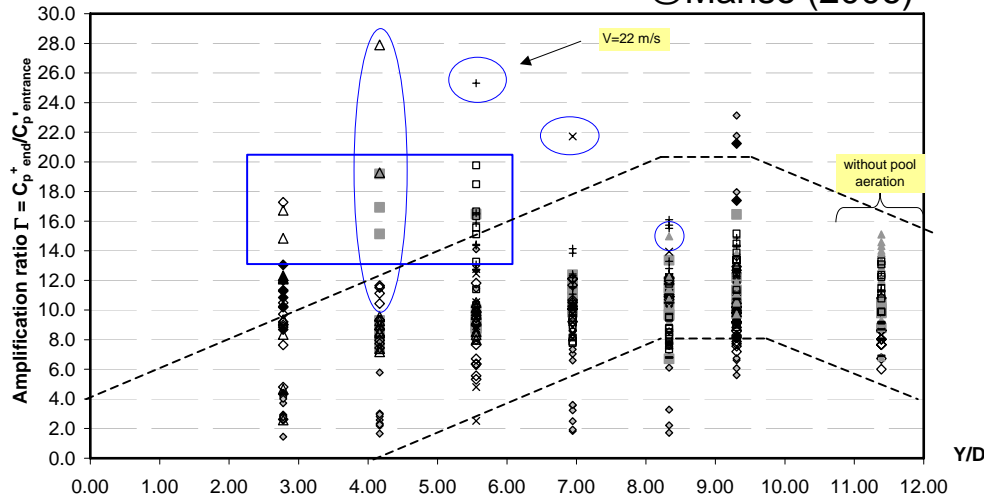
for  $Y/D_j < 8$

for  $8 \leq Y/D_j \leq 10$

for  $10 < Y/D_j$

curve of minimum values

@Manso (2006)



- ◆ Dc/D=infinity, t/D =0, flat bottom, FB3
- Dc/D=5.5, t/D =2.7, first cylinder h=20 cm, FC1
- ◇ Dc/D=16.5, t/D =2.7, third cylinder h=20 cm, TC1
- + Dc/D=5.5-11, t/D =5.4, stepped conical hmax=40 cm, FS
- Dc/D=16.5, t/D =8.1, third cylinder h=60 cm, TC3
- ◇ Dc/D=infinity, t/D =0, flat bottom, FB0&1
- △ Dc/D=11, t/D =2.7, second cylinder h=20 cm, SC2
- × Dc/D=11, t/D =5.4, second cylinder h=40 cm, SC3
- ▲ Dc/D=5.5-16.5, t/D =8.1, stepped conical hmax=60 cm, FST
- Dc/D=16.5, t/D =5.4, third cylinder h=40 cm, TC2

### Laterally confined pools:

- amplification for shallow confined pools
- damping for transitional confined pools
- broad span for deep confined pools
- « flat »  $\Gamma$  are conservative for  $Y/D > 6$

# Theory: Linear Elastic Fracture Mechanics

## Rock resistance to crack propagation

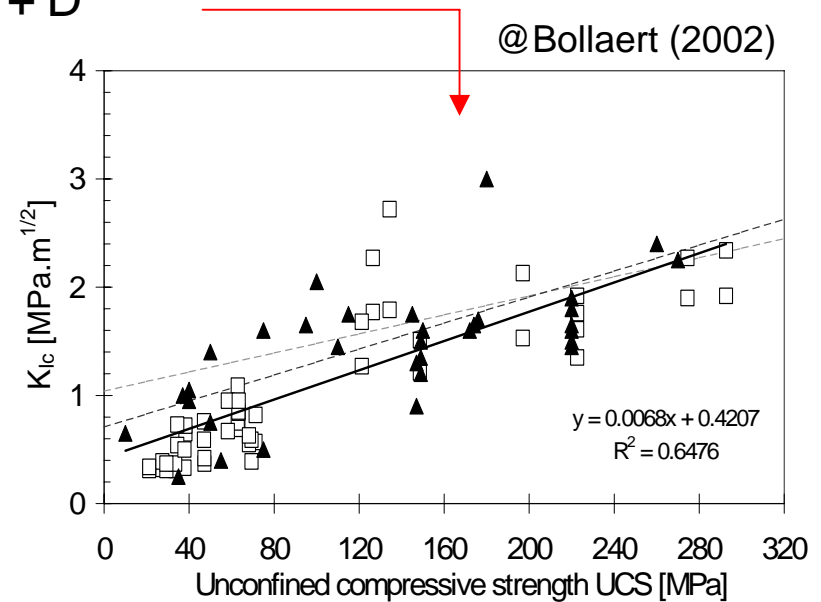
Instantaneous crack propagation ( $C^{\max}_p$ ):  $K_{I\text{hyd}} > K_{I\text{ins}} \text{ or } K_{Ic}$

$$K_{I\text{ins},T} = A \cdot (1.2 \text{ to } 1.5) \cdot T + (0.054 \cdot \sigma_c) + B$$

$$K_{I\text{ins},UCS} = C \cdot (1.2 \text{ to } 1.5) \cdot UCS + (0.054 \cdot \sigma_c) + D$$

- T – tensile strength
- $\sigma_c$  – uniaxial compression strength
- UCS – unconfined compres. strength
- $K_{Ic}$  – fracture toughness value  
(literature, in situ tests)
- A,B,C,D – regression coefficients

Linear – elastic behaviour assumed  
Sub-critical brittle crack growth is neglected

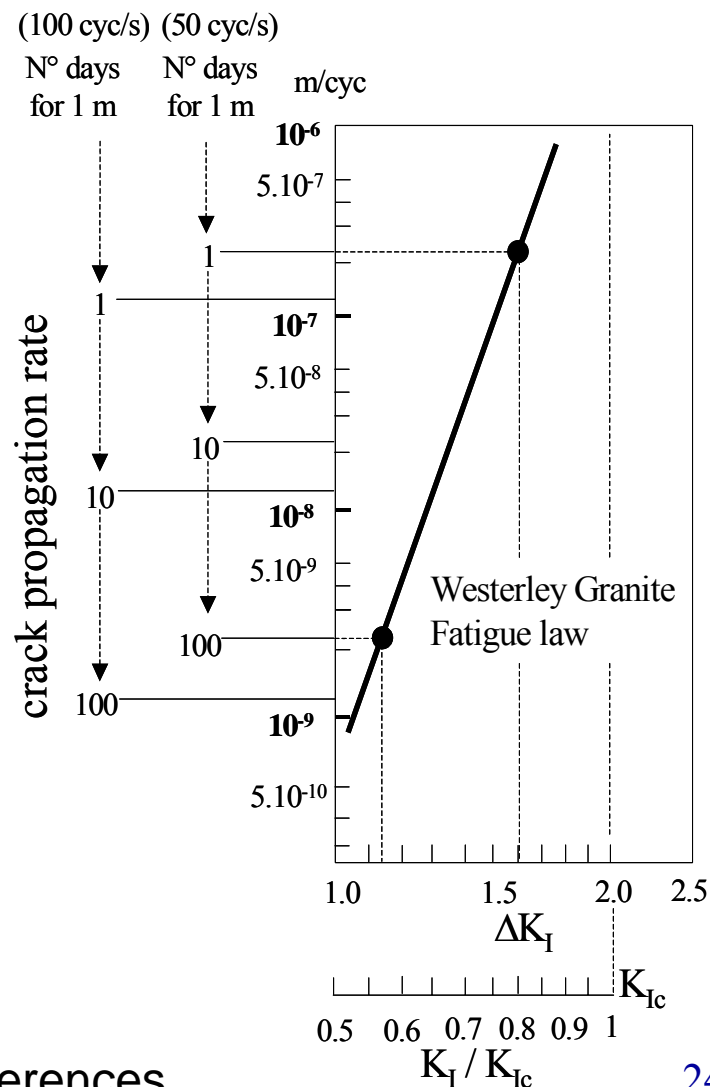
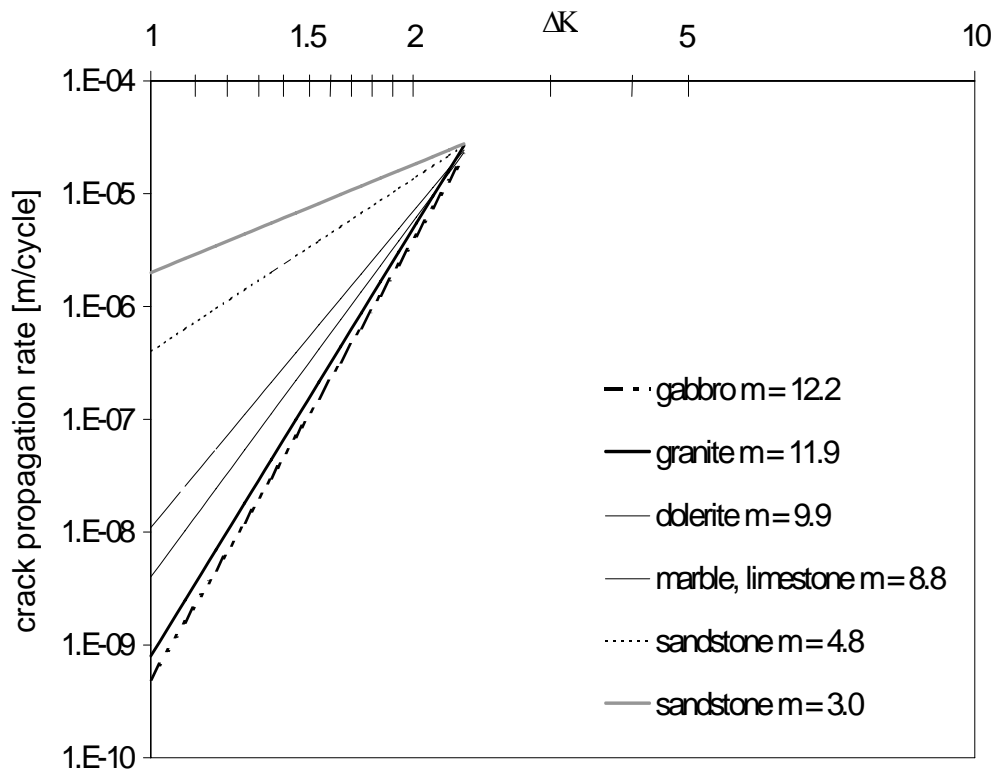


# Taxa de avanço por fadiga = f (rocha)

Time-dependent crack propagation ( $\Delta p_c, f_c$ ):  $K_{I\text{hyd}} < K_{I\text{ins}}$

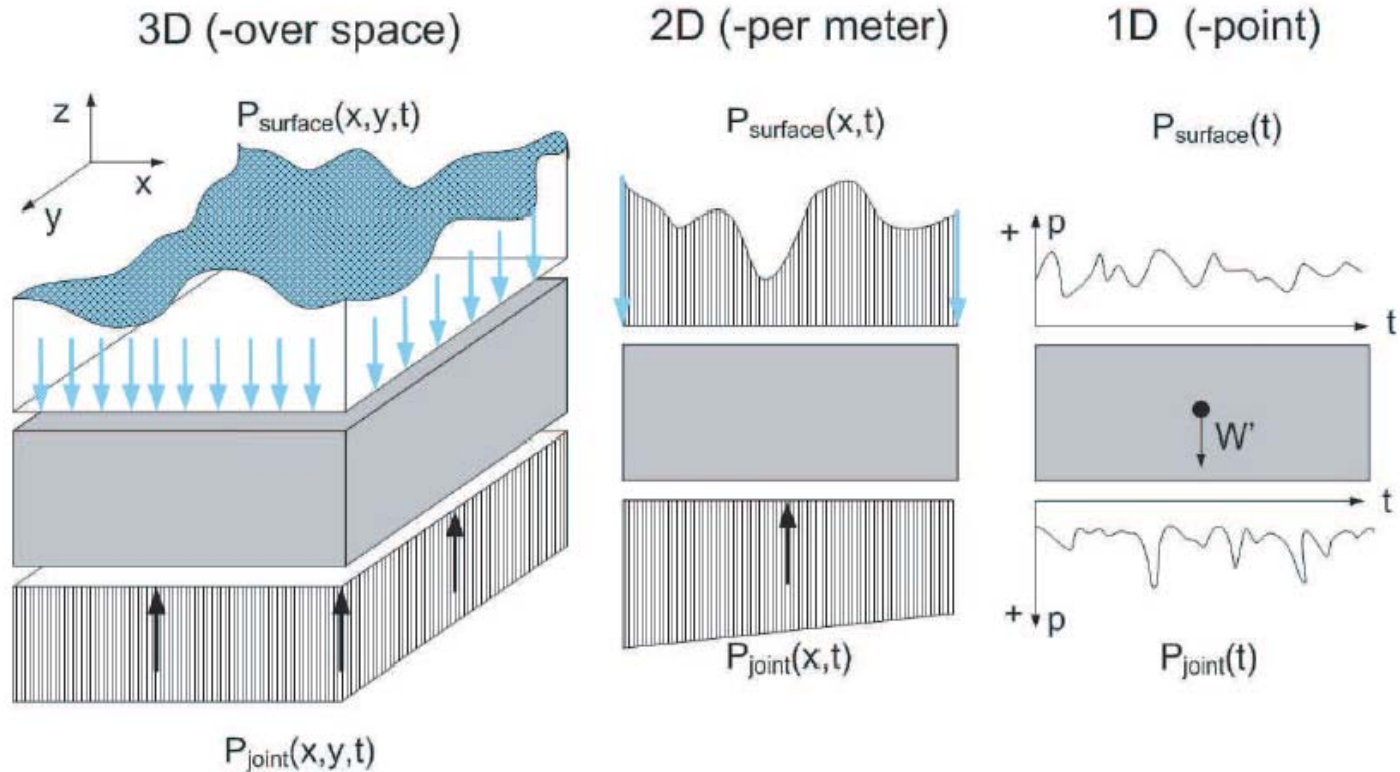
$$K_I = f(\Delta p, f_c) \quad \frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K_I)^m$$

$$\Delta K_I = K_I - K_{Ic}$$



Figures from Bollaert (2002) based on FM references

# Persistence-based probabilistic analysis in view of definition of block displacement conditions (Manso 2006)



Pressions dynamiques

fluctuations « importantes »

Prob. Based displacement

$$P_i = \bar{p} + \sum_k p'_{\text{relevant}} e^{ikt} + \sum_k p'_{\text{irrelevant}} e^{ikt}$$

$$p'_{\text{relevant}} = z'_{\text{relevant}} \sigma$$

$$z = \frac{1}{m^2 2g} \left[ \int_{t_{\text{up}}}^{t_{\text{down}}} (p(t) - p_{\text{cut}}) dt \right]^2$$

# Conclusões

- ⇒ Avanço significativo na compreensão dos processos físicos da erosão
- ⇒ A avaliação da evolução temporal e espacial da erosão é ainda um desafio para os especialistas em barragens e obras hidráulicas anexas
- ⇒ Existem ferramentas sofisticadas para estimativa da erosão mas é necessário prosseguir P&D para melhorar representatividade / fiabilidade
- ⇒ São necessários mais dados detalhados do funcionamento de protótipos com históricos de vazões
- ⇒ É desejável que um número mais alargado de grupos estude o processo erosivo de forma a validar resultados e acelerar a disponibilização de soluções para dimensionamento e análise de risco



# Motivação para pesquisa em fossas de erosão

## Problemas + frequentes

- Erosão pronunciada perto da fundação da barragem, vertedouro ou sopé das encostas;
- Vibrações que perturbam o normal funcionamento da casa de forças
- Redução da queda por formação de barra hidráulica (perda produção hidroeléctrica)

## Exemplos de diagnósticos

- Evolução diferente da prevista em modelo
- Carácter das correntes de retorno;
- Extensão da trajetória do jato inferior / superior
- Geometria da fossa dependente da fracturação

## Obras de reabilitação & custos associados

- Saneamento e estabilização da fossa
- Remoção da barra
- Obras laterais de contenção
- Alteração dos jatos: divisão, ângulo de saída, direccionamento
- Construção de vertedouro auxiliar
- Enchimento e recobrimento da fossa
- Interrupção /limitação operação casa de forças durante obras de reabilitação



# Desafios e parcerias de P&D

## É necessário substituir análises:

- **empíricas por físicas**, aprofundando e desenvolvendo metodologias de estimativa da erosão com base num conhecimento profundo dos processos físicos envolvidos;
- **sectoriais por alargadas**, incluindo aspectos hidráulicos e geotécnicos;
- **pontuais por tridimensionais e contínuas no tempo**, ou seja, a estimativa da profundidade de equilíbrio pela avaliação prévia da **evolução temporal e espacial** da fossa; e,
- **reduzir efeitos de escala e de laboratório**, que limitam a utilização de inúmeros metodologias de cálculo já existentes, em particular devido à dificuldade em simular as características turbulentas intrínsecas de jatos-prótipo, o arrastamento de bolhas de ar e a heterogeneidade do leito rochoso a jusante do vertedouro.

## E efetuar

- Comparação de modelos E / SE / GP e físicos
- Calibração de modelos em casos reais de protótipos
- Aplicação em projeto e análises de risco

# Erosão a jusante de vertedouros

Caso de estudo: barragem LCBC/Estreito - Furnas

## Histórico

- 1967: estudos em modelo reduzido; construção da barragem
- 1969: saneamento do leito, topobatimetria e início da operação
- 1982: topobatimetria
- 1984: topobatimetria
- 1986: topobatimetria
- 1989: estudos em modelo reduzido e modificação do salto de esqui do vertedouro

## Problemas

- Início da década de 80: erosão por correntes de retorno (do aterro paisagístico no pé da barragem,
- risco de infraescavação da laje de protecção do vertedouro (descalçamento para vazões  $> 4'000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Custo da reparação: ~ 2 milhões R\$

# Análise da evolução da fossa da barragem de Estreito – FURNAS Centrais Elétricas, S.A.

1. **Avaliação da evolução da fossa** (volume, profundidade máxima, declividades) com base em registos históricos (vazões, topobatimetrias)
2. **Calibração de modelos** de estimativa de erosão iterativos (EPFL-2006, Yuditskii-1963) e de semi-empíricos (Liu 2006, Annandale 1995) **com base no histórico** de vazões de 1969 a 1984 e nas topobatimetrias de 1969, 1982 e 1984.
3. **Extrapolção dos modelos calibrados** para a duração de vida útil da barragem de Estreito, sem ter em conta a alteração do salto de esqui realizada em 1989.
4. **Comparação** com estimativas de profundidade de equilíbrio obtidas com métodos empíricos (Mason and Arumugan, 1985, Taraimovich 1978) e discussão da evolução temporal segundo Spurr (1985).
5. **Extrapolção** dos modelos para cálculo da profundidade de equilíbrio com alguns dos métodos acima citados, **tendo em conta a alteração do salto de esqui** realizada em 1989.

# Agradecimentos



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO



# FCT

Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA



LCH – Laboratoire de Constructions Hydrauliques (Suisse)

OFEN – Office fédéral de l'énergie (Suisse)

FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Portugal)

Prof. Virgilio Fiorotto, Trieste University, Italia

Prof. Jorge Matos, IST, Portugal



Profs. Marcelo Marques e Luis Endres, IPH- UFRGS, Brasil

LAHE, Geotecnia

## Obrigado pela vossa atenção!