

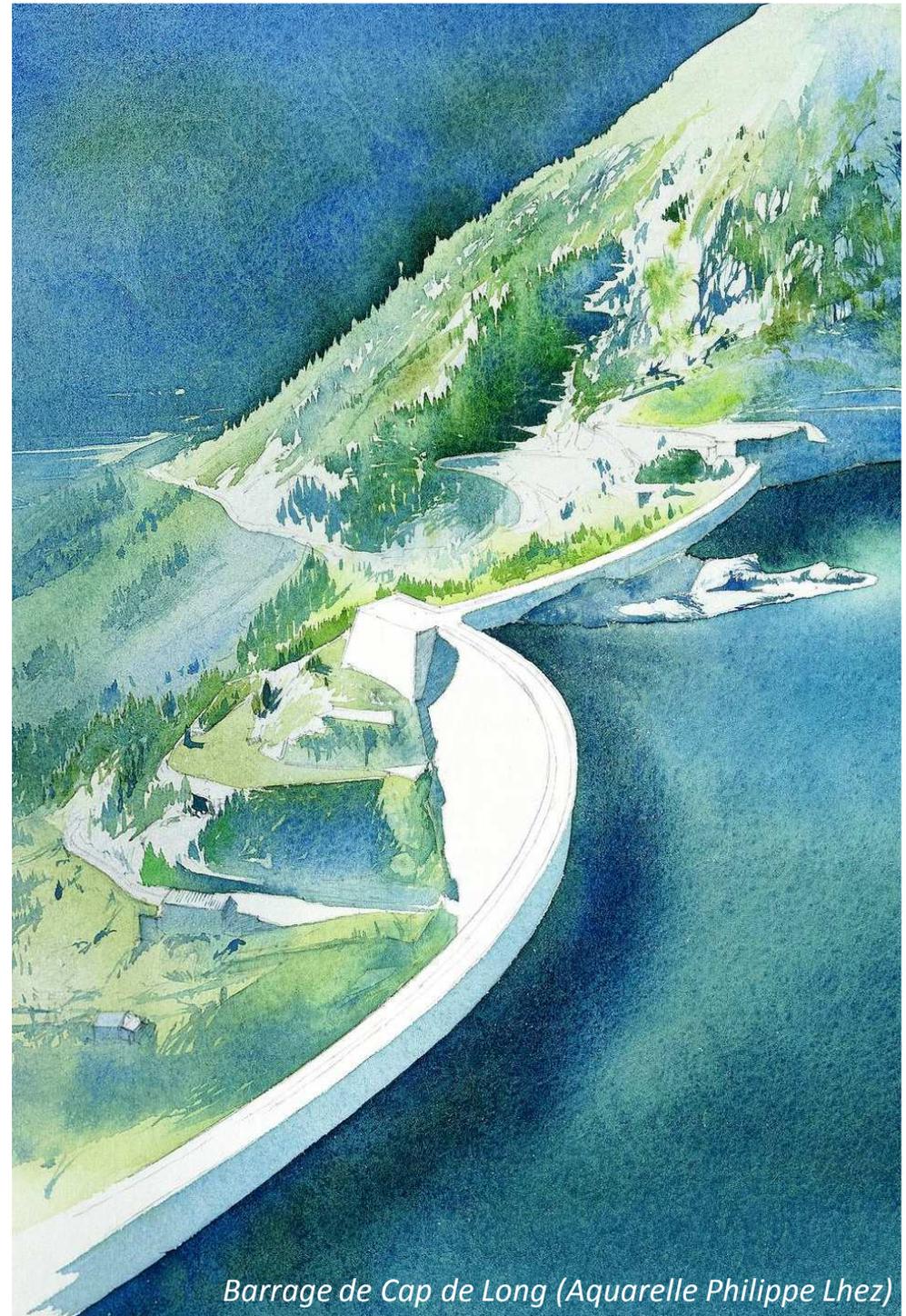


Thème B : Critères de conception et de justification des fondations : modélisation et calculs

Méthodes d'évaluation du risque d'érodabilité des fondations soumises à déversement

B. BLANCHER, F. LAUGIER, T. LETURCQ

Colloque CFBR – Fondations des Barrages
8 et 9 avril 2015 – Chambéry



Barrage de Cap de Long (Aquarelle Philippe Lhez)

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION

2. ETAT DE L'ART ET PRATIQUES DE CONCEPTION

3. ZOOM APPROCHE E.BOLLAERT (2002)

4. ZOOM APPROCHE ANNANDALE (1995)

5. METHODE ANNANDALE APPLIQUEE A QUELQUES BARRAGES DU PARC EDF

6. CAS LIMITES RENCONTRES

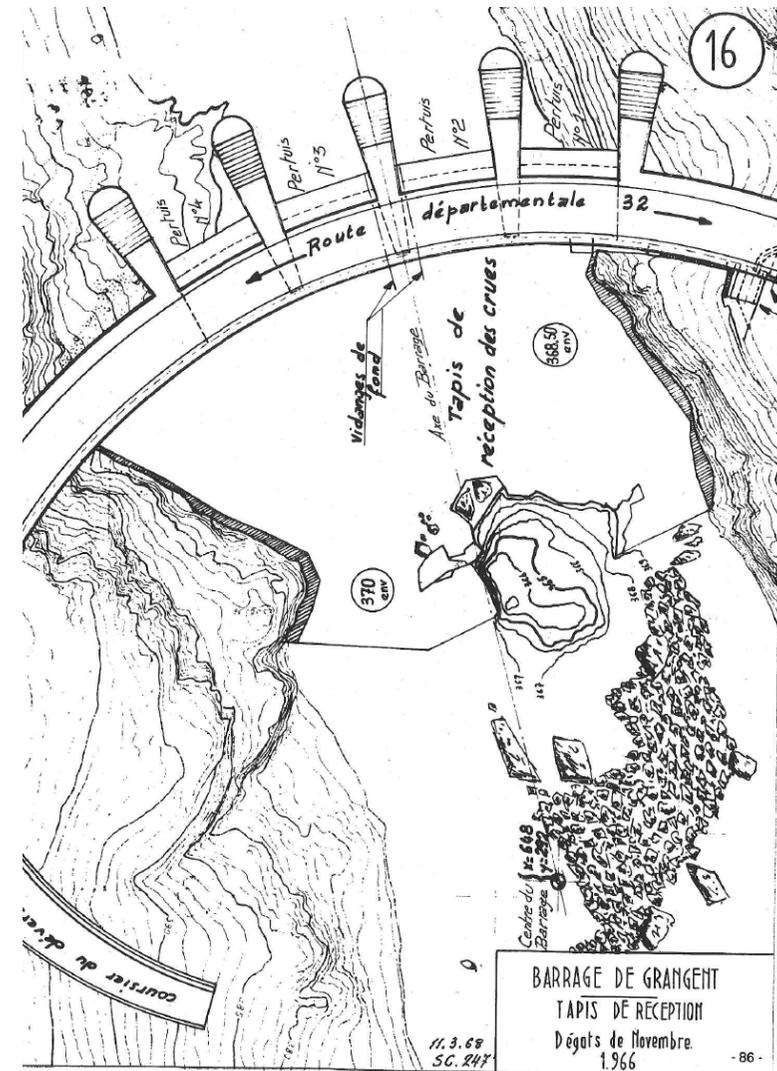
7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

INTRODUCTION

- La dissipation d'énergie à l'aval d'un barrage est généralement prise en compte dès la conception et fait partie intégrante du dimensionnement hydraulique de l'ouvrage.
- La réévaluation hydrologique des débits des crues extrêmes et l'évolution réglementaire amène à vérifier la résistance des fondations de nombreux barrages soumises à des déversements pouvant être plus fréquents ou importants voire à de nouveaux déversements (cas de la surverse sur le corps du barrage).
- Une réflexion a été menée à EDF sur les méthodes d'évaluation de l'érodabilité des fondations soumises à ces sollicitations, sur leur résultats et sur leur commodité d'application (grand nombre de barrages).

ETAT DE L'ART

- **Pratiques de conception issues du REX d'EDF de 1968 (puis GT CFGB de 1979 Q.50.R38) de près de 40 barrages conçus pour évacuer une lame déversante à proximité du pied aval en fonction de la puissance à dissiper par m^2**
 - $P_u > 5\,000\text{ KW}/m^2 \rightarrow$ tapis de réception
 - $P_u > 10\,000\text{ KW}/m^2 \rightarrow$ fosse d'amortissement
 - $P_u > 16\,000\text{ KW}/m^2 \rightarrow$ dégâts importants (Grangent 1963 et 1966, Maury 1949, ...)
- **Méthodes d'évaluation empiriques et semi-empiriques traditionnelles pour définir la profondeur d'affouillement ultime**
 - Complexité des phénomènes en jeu
 - Plus de 30 formules (Véronèse 1937, Martins 1973, Mason 1993, ...)



ETAT DE L'ART

Profondeur d'affouillement ultime

fonction :

- du débit spécifique déversé q ,
- de la hauteur de chute H ,
- de la hauteur d'eau dans la fosse h ,
- du diamètre caractéristique des grains d .

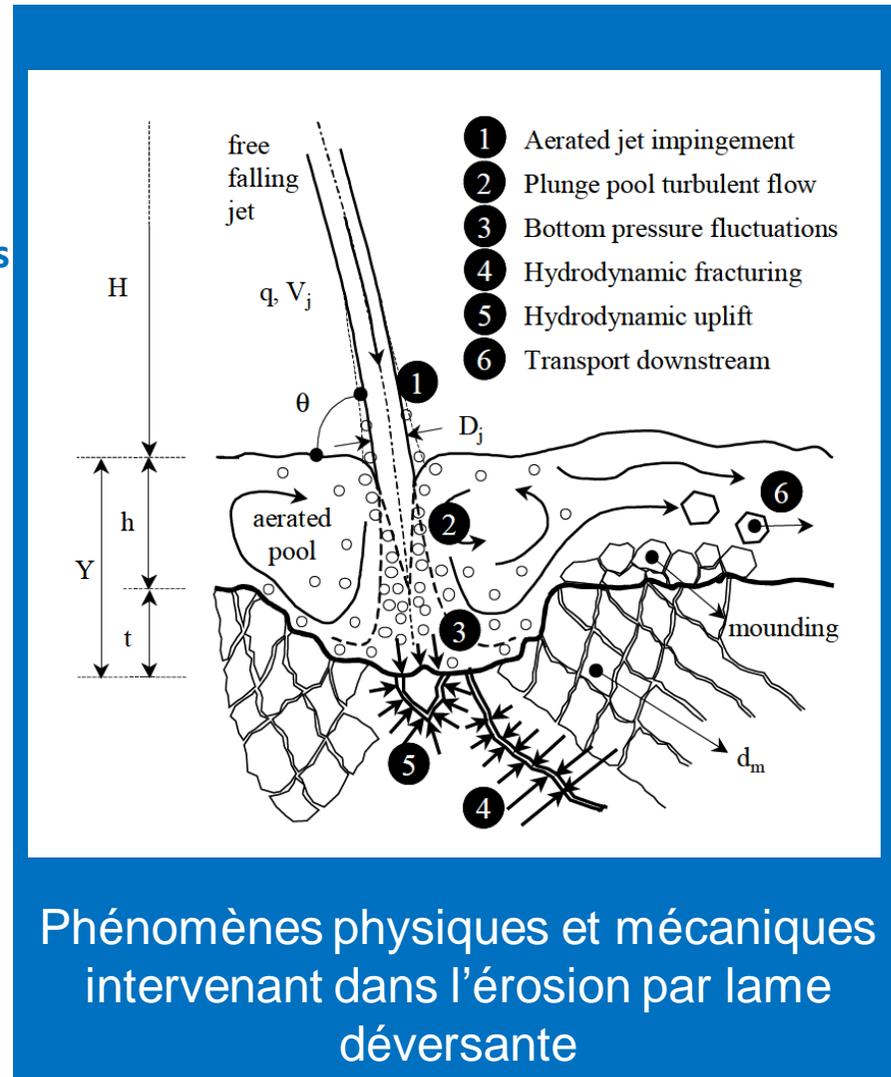
Elles ne considèrent généralement pas le temps de déversement (mais un déversement infini) et ne s'appliquent pas à une fondation rocheuse.

Type	Year	Author(s)	Applicability	Time	Hydraulic characteristics							Geomechanical characteristics							Aeration characteristics							
					hydrostatic				hydrodynamic			gran. soil		jointed rock mass					Aeration characteristics							
					T	q	h	H	g	V_j	θ	RMS	Sxx(f)	trans	d_m	W_s	ρ_s	σ_c, σ_t	RQD	N_j	z	α	ϕ_j	C	β	Tu
[-]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m/s ²]	[m/s]	[°]	[-]	[m ²]	[-]	[mm]	[m/s]	[kg/m ³]	[N/m ²]	[%]	[-]	[-]	[°]	[°]	[-]	[-]	[%]	[m]				
empirical	1932	Schoklitsch	plunging jet	-	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1937	Veronese A	horiz. & plunging jet	-	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1937	Veronese B	as A, but $d_m < 0.005m$	-	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1939	Jaeger	plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
				plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				ski-jump, rock cubes	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				ski-jump	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				flip bucket	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				plunging jet, rock cubes	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				ski-jump	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				ski-jump	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
			plunging jet, rocky bed	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
			plunging jet, rocky bed	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
			plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
			plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
semi-empirical	1960	Mikhalev	plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1967	Mirtskhulava et al.*	plunging jet, rocky bed	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1967	Poreh & Hefez	circ. submerged imp. jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1975	Zvorykin	ski-jump	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1983	Mih & Kabir	circ. submerged imp. jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1985	Chee & Yuen	plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1985	Spurr*	plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1991	Bormann & Julien*	grade-control, plung. jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1993	Stein et al.	plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	1994	Fahlbusch	general	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
1998	Annandale & al.*	general	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
1998	Hoffmans	general	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
plunge pool pressure fluctuations	1983	Xu Duo Ming	rectang. impinging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1985	Cui Guang Tao	rectang. impinging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1987	Franzetti & Tanda	circular impinging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1991	Armengou	rectang. falling nappe	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1991	May & Willoughby	rectangular slot jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1994	Puertas & Dolz	rectang. falling nappe	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
1997	Ervine & al.	circular impinging jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
pressure difference techniques	1963	Yuditskii	oblique imp. rect. jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1986	Reinius	parallel flow impact	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1989	Otto	oblique imp. rect. jet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1992	Fiorotto & Rinaldo	concrete slab uplift	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1998	Liu & al.	rock block uplift	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	1999	Liu & al.	vibration. slab uplift	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
2000	Fiorotto & Salandin	anchored slab uplift	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
EPFL Project	2002	2-phase transient jacking/uplift	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

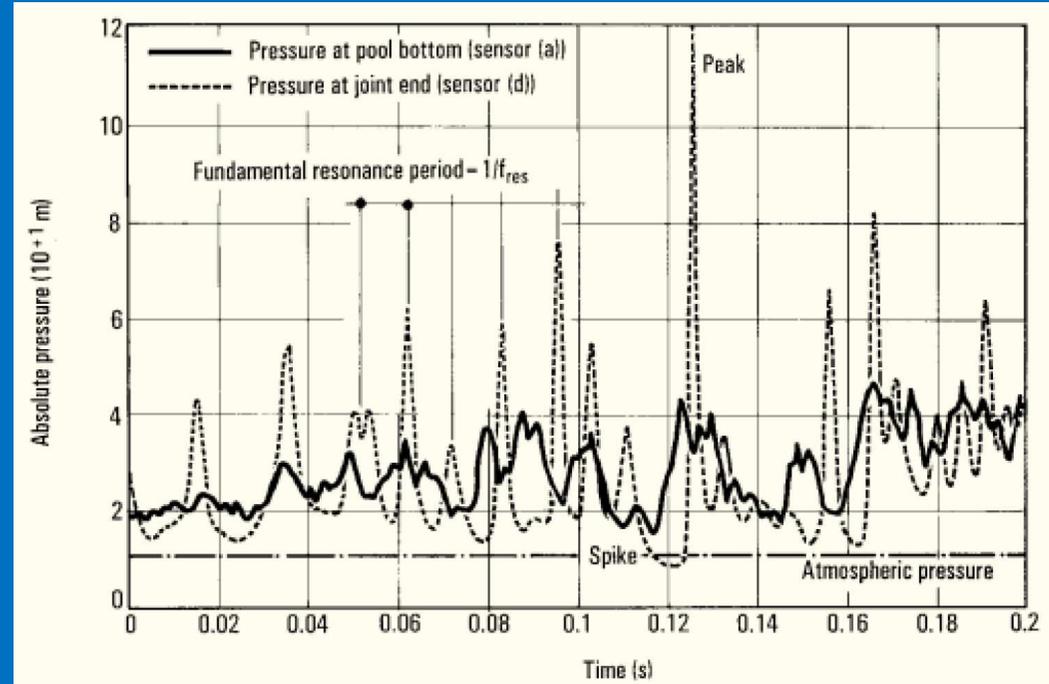
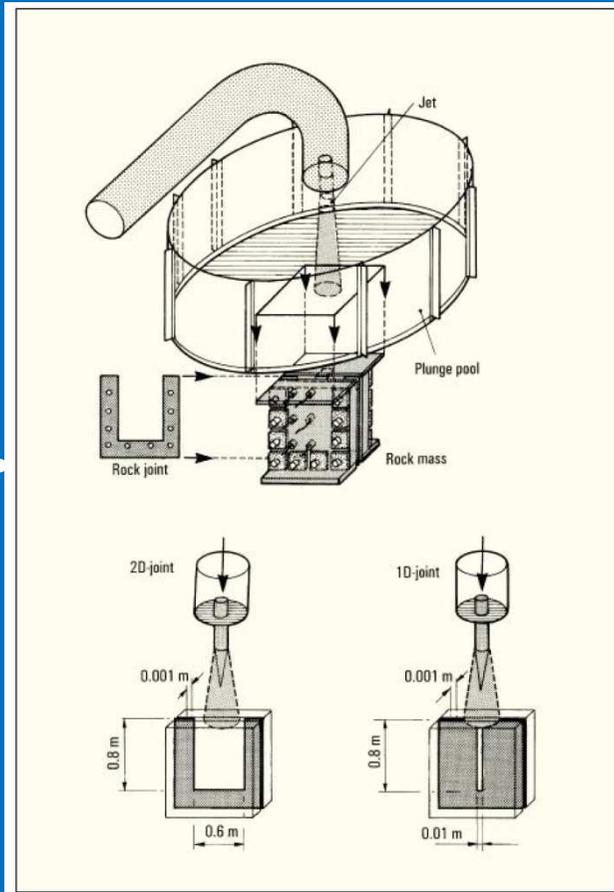
Etat de l'art et inventaire des principales formules empiriques (Bollaert & Schleiss 2001)

APPROCHE BOLLAERT

- L'approche évalue les pressions dynamiques à l'interface eau-rocher (à la base de la fosse), puis leur propagation dans les discontinuités du massif rocheux.
- Elle fait intervenir la mécanique de la rupture (propagation de fissures) et l'éjection des blocs déchaussés.



APPROCHE BOLLAERT



L'approche se fonde sur une expérimentation qui reconstitue le déversement et évalue la propagation des pressions du fond de la fosse à l'intérieur des « fractures » de la fondation et leur impact ...

APPROCHE BOLLAERT

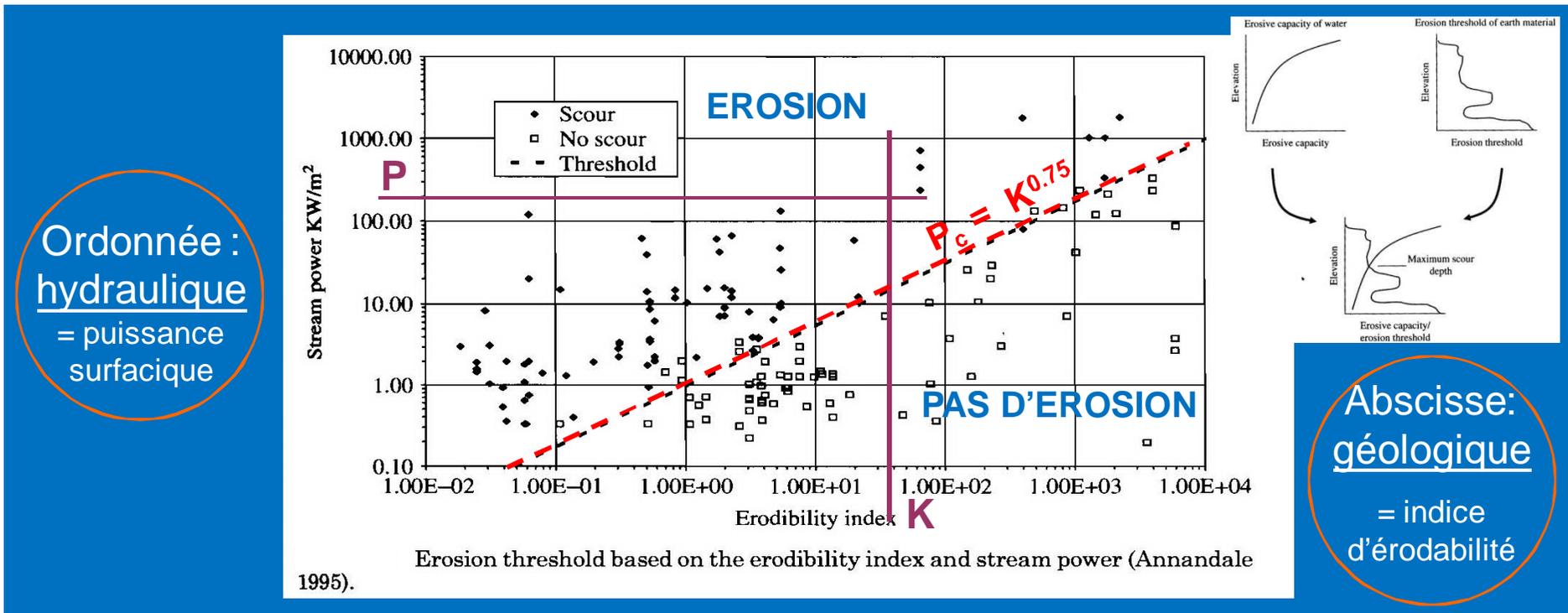
- **Données d'entrée :**
 - **Caractéristiques du jet (vitesse, diamètre, angle d'incidence)**
 - **Caractéristiques de la fosse (géométrie, hauteur d'eau)**
 - **« Qualité » du massif rocheux à travers 4 paramètres (non intrinsèques) définissant son « comportement hydrodynamique »**
 - 1. caractérise la propagation des fissures (CFM) : fonction de la pression dynamique à l'interface eau/rocher et d'un facteur d'amplification (fonction de la géométrie et du remplissage des joints rocheux). Permet de calculer P_{max} dans le joint rocheux
 - 2 et 3. déterminent les effets différés de la propagation des fissures; fonction de la concentration d'air dans le joint (vitesse et profondeur) et de la longueur des joints
 - 4. détermine la résistance à l'éjection de blocs (DI) ; fonction de la taille et de la densité des blocs
- **L'affouillement survient si la résistance du massif (fonction de R_t et R_c pondérées) est inférieure à l'action du jet (au fond des fractures)... action instantanée ou différée ...**

APPROCHE BOLLAERT

- **Théorique, calée sur l'expérimentation et sur des phénomènes physiques reconstitués**
- **A priori complète mais complexe ...**
- **... donc d'application peu aisée et plutôt réservée à son concepteur**
- **méthode « jeune » dont on ne mesure pas encore les incertitudes**
- **Barrages ayant fait l'objet d'études numériques du potentiel d'affouillement : Folsom 2003, Karahnjukar 2005, Gebidem 2007, Bluestone 2009, Choranche 2011, Koman 2011, Kariba 2012, Chancy-Pougny 2015**

APPROCHE ANNANDALE

- Méthode semi-empirique dite « index d'érodabilité »
- Près de 150 observations (sols et roches)
- Abaque définissant un seuil d'érosion (l'érosion se produit tant que la puissance disponible est supérieure à la puissance requise)



APPROCHE ANNANDALE

Indice d'érodabilité de Kirsten 1982 (géologique et naturaliste)

$$K = M_s \cdot K_b \cdot K_d \cdot J_s$$

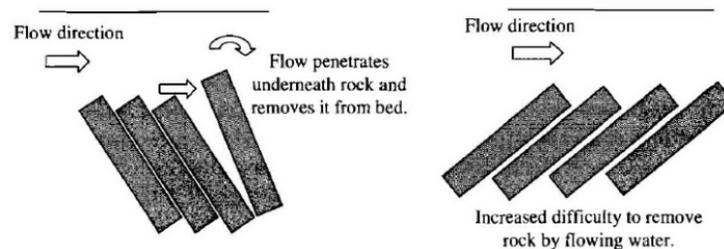
Résistance matricielle

$$M_s = \frac{\gamma_r}{\gamma_{ref}} R_{cs}$$

TABLE 4.6 Joint Set Number (J_n)

Number of joint sets	Join set number (J_n)
Intact, no, or few joints/fissures	1.00
One joint/fissure set	1.22
One joint/fissure set plus random	1.50
Two joint/fissure sets	1.83
Two joint/fissure sets plus random	2.24
Three joint/fissure sets	2.73
Three joint/fissure sets plus random	3.34
Four joint/fissure sets	4.09
Multiple joint/fissure sets	5.00

SOURCE: From Kirsten 1982.



Maille de fracturation

$$K_b = \frac{RQD}{J_n}$$

Aspect/nature des discontinuités

$$K_d = \frac{J_r}{J_a}$$

Géométrie et orientation des

« blocs » par rapport à écoulement

J_s

APPROCHE ANNANDALE

- **Puissance surfacique**

- **calculs simples (chute libre sans perte d'énergie) et hypothèses simplificatrices ...**

→ Approche simple qui permet d'envisager une optimisation au cas par cas

Si $K = [500;5000] \rightarrow P_c = [100;600] \text{ kW/m}^2 \rightarrow H_c = [1.7;5.8] \text{ m}$ avec $P_c = \rho g q H/e$ et $e = q/\sqrt{2gH}$

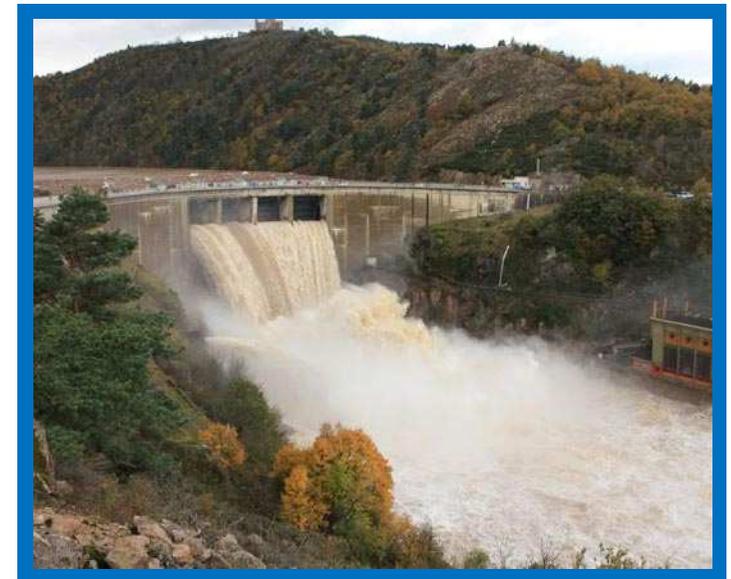
- **... complétés par considérations plus complexes sur :**

→ l'intensité turbulente initiale

→ la diffusion du jet dans l'air

→ la longueur de désintégration du jet

→ la diffusion dans le bassin de tranquillisation



APPLICATION A QUELQUES BARRAGES EDF

16 barrages au rocher pour lesquels on dispose d'un REX sur les déversements



Barrage de Riète (09)

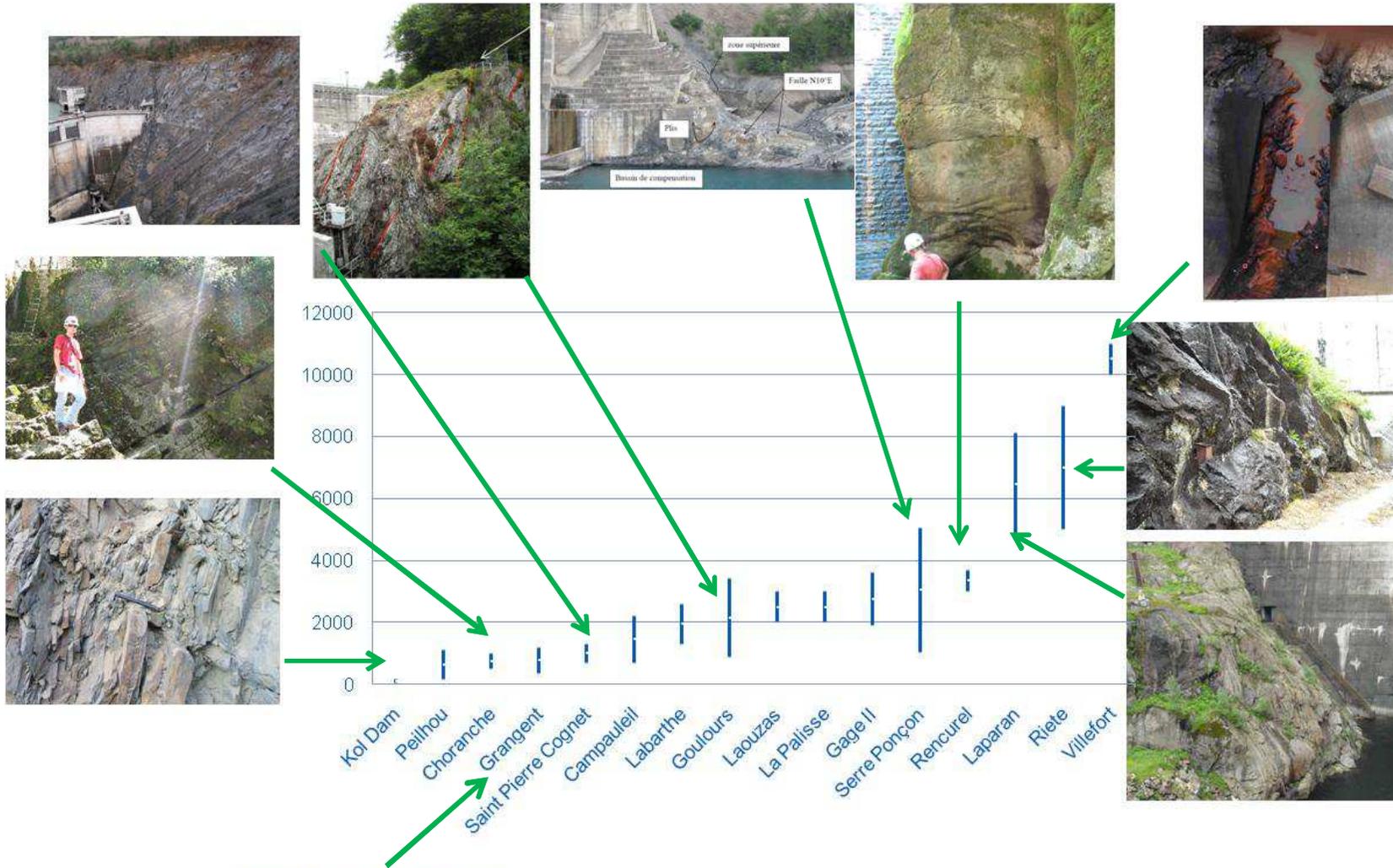


Barrage de Campauleil (09)

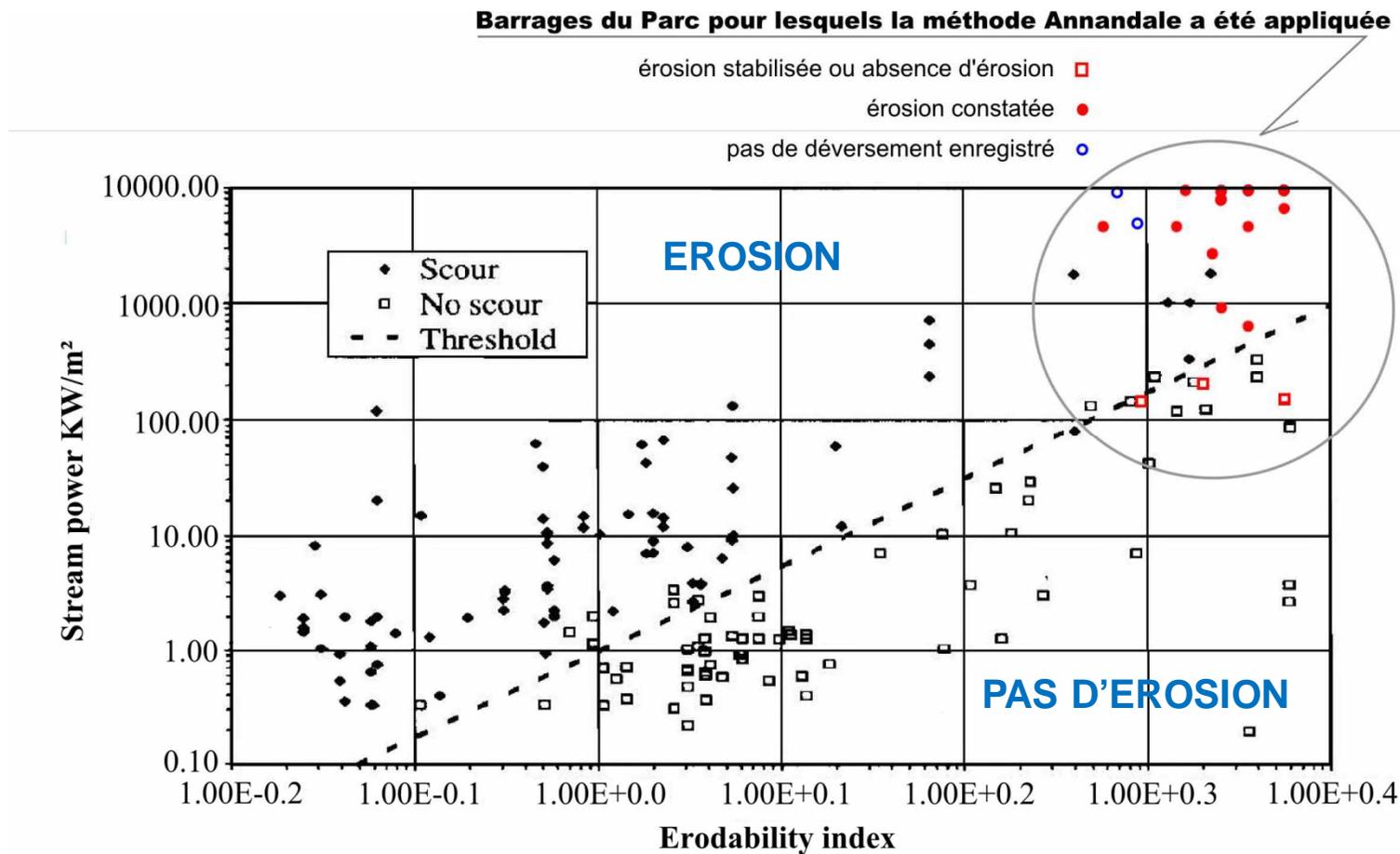


Barrage de Grangent (42)
crue 2008 \approx 3200 m³/s

APPLICATION A QUELQUES BARRAGES EDF



APPLICATION A QUELQUES BARRAGES EDF



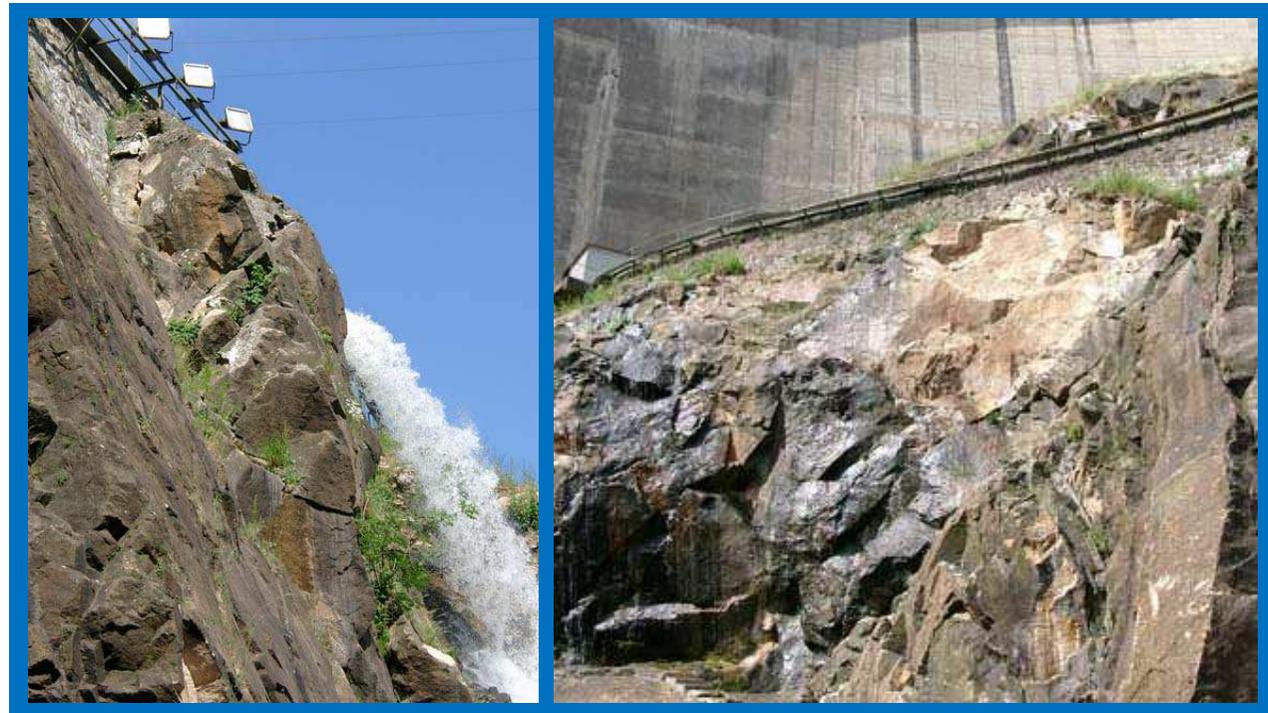
Les observations historiques sont cohérentes avec l'abaque

... la plupart du temps

CAS PARTICULIERS

- **Les cas particuliers pour lesquels les méthodes sont moins pertinentes existent !**
Attention notamment :
 - aux crues extrêmes qui induisent des effets de souffle et vibrations « aériennes » (Grangent, Koldam ...)
 - aux configurations de vallée atypiques qui induisent des courants de retour
 - aux phénomènes d'érosion particuliers : usure par blocs « marmites de géants »,

**Barrage de
Grangent
K ~ 1500**



CAS PARTICULIERS



Barrage de La Balme de Rencurel

CONCLUSIONS

L'évaluation de l'érosion d'une fondation rocheuse soumise à un déversement est un sujet de préoccupation d'avenir.

Les méthodes existantes sont nombreuses. Les plus complètes sont :

- l'approche d'Annandale (semi-empirique), calée sur de nombreux cas réels et éprouvée,
- l'approche de Bollaert (théorique), très complète sur les phénomènes en jeu (notamment sur la prise en compte du temps de déversement), mais assez « opaque » et pas directement utilisable par l'ingénieur.

Ces deux méthodes permettent d'estimer une profondeur d'affouillement, ce qui suffit le plus souvent à répondre à la question de l'impact du déversement (hors dimensionnement). Elles offrent des voies de recherche et d'amélioration.

Les études sur modèle réduit peuvent compléter ces méthodes pour affiner certains paramètres hydrauliques ou pour préciser les formes et dimensions des ouvrages (fosse d'amortissement, ...) et pour s'assurer qu'aucun écoulement à forte vitesse ne risque de mettre en péril les ouvrages, leurs fondations ou encore la stabilité des rives.

MERCI