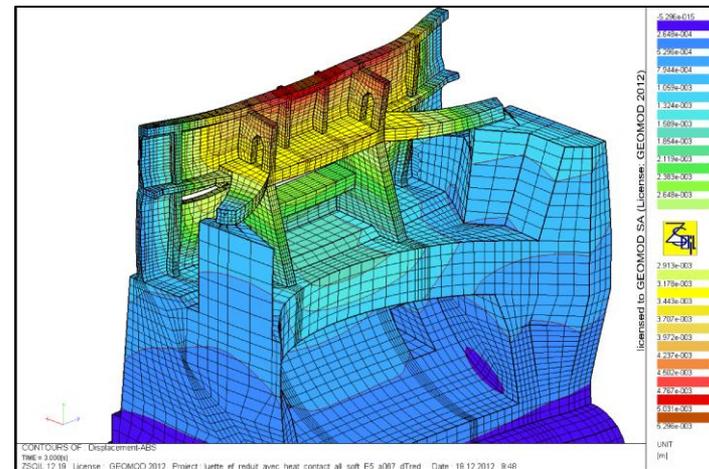
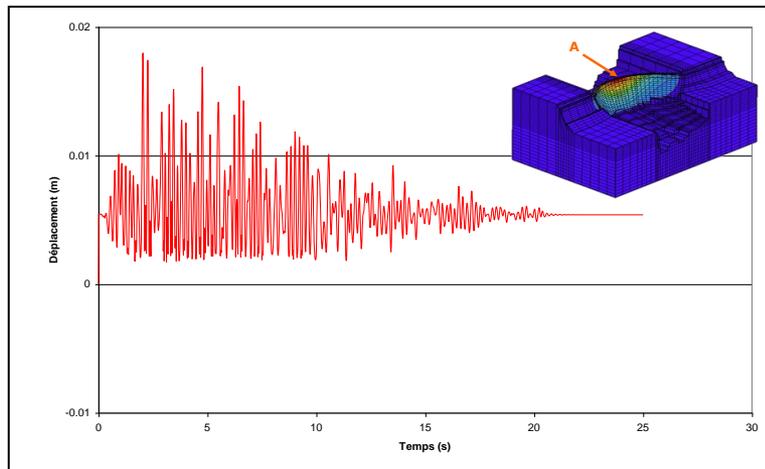


Vérification au séisme de barrages en Suisse au moyen de modélisations par éléments finis



Dr Stéphane Commend
GeoMod SA

Sommaire

- Contexte: normes et directives suisses
- Vérification au séisme du barrage de Vieux-Emosson
- Modélisation « fine » de la roche
- Vérification au séisme du barrage de la Luette
- Conclusions

Sommaire

- **Contexte: normes et directives suisses**
- Vérification au séisme du barrage de Vieux-Emosson
- Modélisation « fine » de la roche
- Vérification au séisme du barrage de la Luette
- Conclusions

Normes et directives suisses

- Séisme: SIA 261 (actions), 267 (géotechnique), ...
- Relativement proche de EC8
- Cas particulier des ouvrages de retenue et barrages:
 - Directive OFEN 2003, anciennement OFEG, va être revue prochainement (2015?)

Directive OFEN



- **Partie A:** objectifs, domaine d'application, classes de barrages, étendue de la vérification
- **Partie B:** définition du séisme de vérification, conditions de fondation
- Partie C: digues
- **Partie D:** barrages en béton
- ...

Directive OFEN: classes de barrages

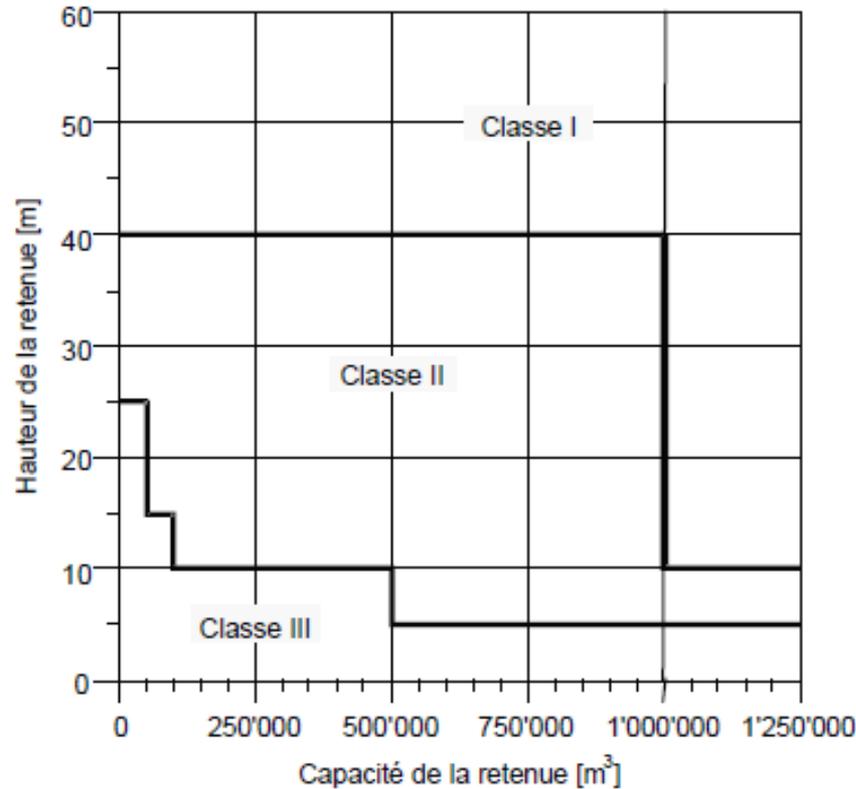


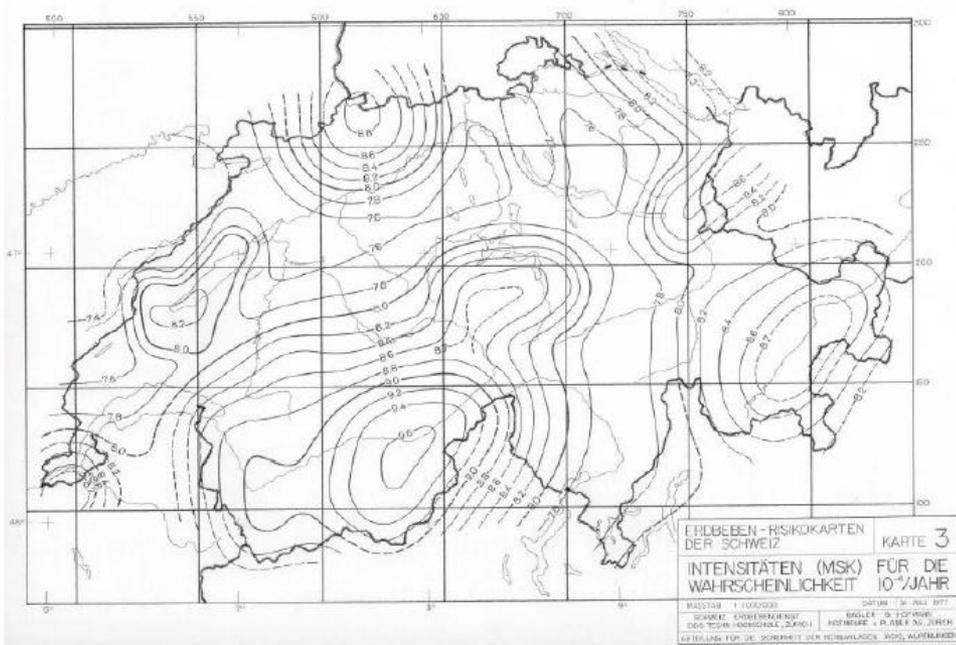
Figure 1 - Représentation graphique des classes de barrages

Directive OFEN: action sismique

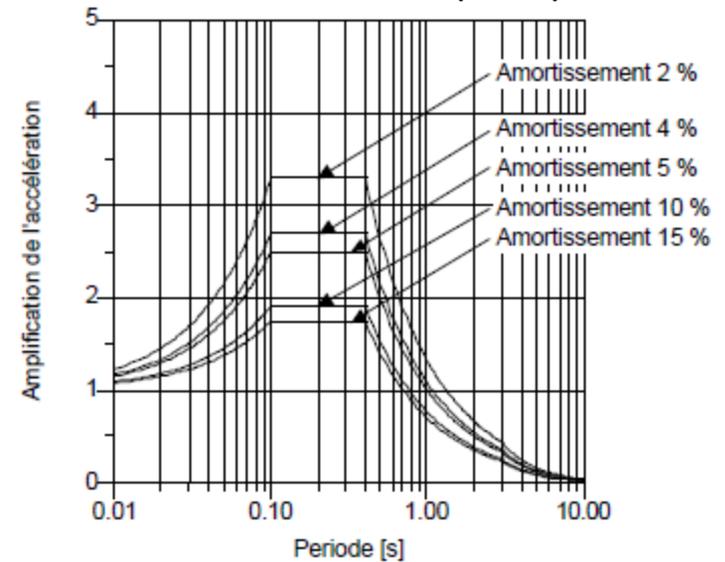
Classe de barrages	Intervalle de temps considéré	Probabilité moyenne de dépassement	Temps de retour moyen
I	100 ans	1 %	10'000 ans
II	100 ans	2 %	5'000 ans
III	100 ans	10 %	1'000 ans

Tableau 1 - Temps de retour du séisme de vérification pour les différentes classes de barrages

Figure 5 - Valeurs des intensités pour une probabilité de dépassement de 10^{-4} p. a. selon la carte suisse d'aléa sismique - Détermination du danger du aux séismes, 1977



Classe de fondation A (rocher)



Vérification au séisme de barrages en Suisse au moyen de modélisations par éléments finis

Comportement des massifs rocheux sous sollicitations sismiques

Séance technique CFMR – AFPS du 5 juin 2014, Paris

Directive OFEN: méthodologie(s)

Classe selon Partie A	III	II	I
Sollicitation due au séisme	Selon Partie B.	Selon Partie B.	Selon Partie B.
Propriétés dynamiques	Empirique.	Modélisation spécifique.	Modélisation spécifique.
Modélisation	Barrage, bi-dimensionnel : -Modèle de barre ou analytique. Barrage, tri-dimensionnel : -Poutres croisées ou éléments finis. Sol de fondation : - Rigide. Retenue : -Masse entraînée (eau incompressible).	Barrage : -Poutres croisées ou éléments finis. Sol de fondation : -Ressorts ou éléments finis (sans masse). Retenue : -Masse entraînée (eau incompressible).	Barrage : - Éléments finis. Sol de fondation : -Éléments finis (sans masse). Retenue : -Masse entraînée (eau incompressible).

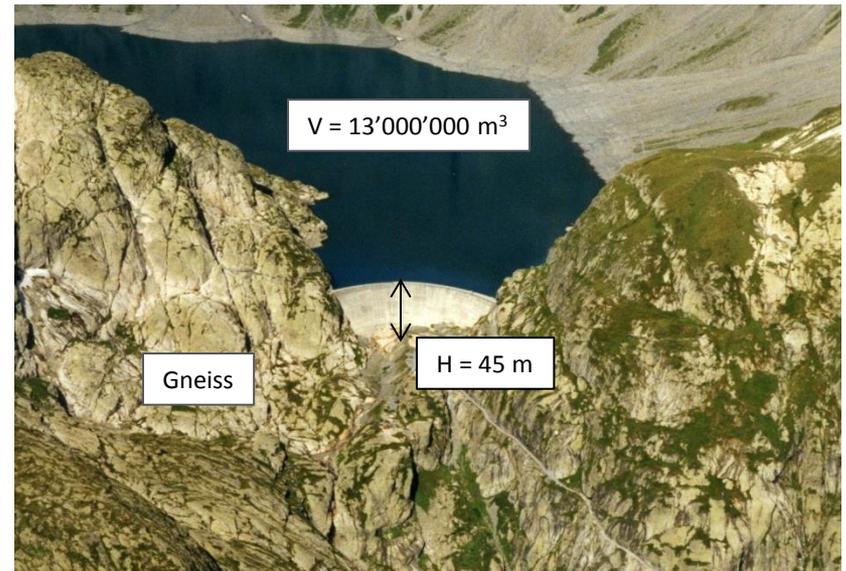
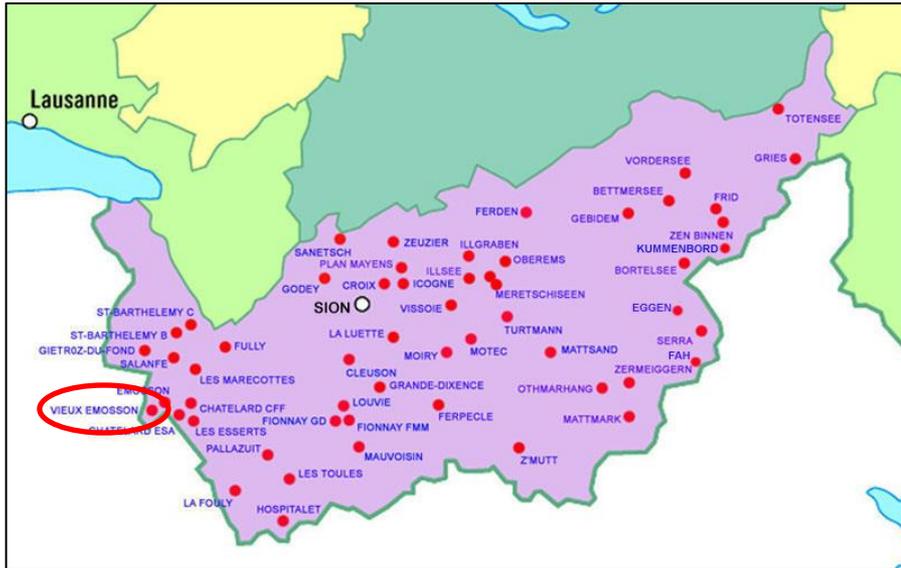
Classe selon Partie A	III	II	I
Matériaux	Barrage : -Linéaire-élastique avec amortissement visqueux. -Valeurs caractéristiques déterminées à l'aide de la littérature ou d'ouvrages comparables. Surface de contact barrage-fondations : -Valeurs caractéristiques déterminées sur la base de rapports ou de la littérature. Sol de fondation : - Rigide.	Barrage : -Linéaire-élastique avec amortissement visqueux. -Valeurs caractéristiques déterminées à l'aide d'essais statiques spécifiques au barrage étudié. Surface de contact barrage-fondations : -Valeurs caractéristiques déterminées sur la base de rapports ou de la littérature. Sol de fondation : - Élastique. -Valeurs caractéristiques déterminées sur la base de rapports, de la littérature ou de sites comparables.	Barrage : -Linéaire-élastique avec amortissement visqueux. -Valeurs caractéristiques déterminées à l'aide d'essais statiques spécifiques au barrage étudié. Surface de contact barrage-fondations : -Valeurs caractéristiques déterminées sur la base de rapports ou de la littérature. Sol de fondation : - Élastique. -Valeurs caractéristiques spécifiques au site déterminées sur la base de rapports, de la littérature ou de sites comparables.
Méthode de résolution numérique	-Spectre de réponse (premier mode de déformation) ou pseudo-statique.	-Spectre de réponse (plusieurs modes de déformation).	- Évolution temporelle.
Vérifications nécessaires	- Contraintes. - Stabilité du barrage. - Intégrité des fondations. -Ouvrages annexes importants du point de vue de la sécurité. - Éventuellement rives.	- Contraintes. - Stabilité du barrage. - Intégrité des fondations. -Ouvrages annexes importants du point de vue de la sécurité. - Éventuellement rives.	- Contraintes. - Stabilité du barrage. -Intégrité des fondations. -Ouvrages annexes importants du point de vue de la sécurité. - Éventuellement rives.

Tableau 1 - Exigences minimales aux méthodes de calcul pour les différentes classes de barrages

Sommaire

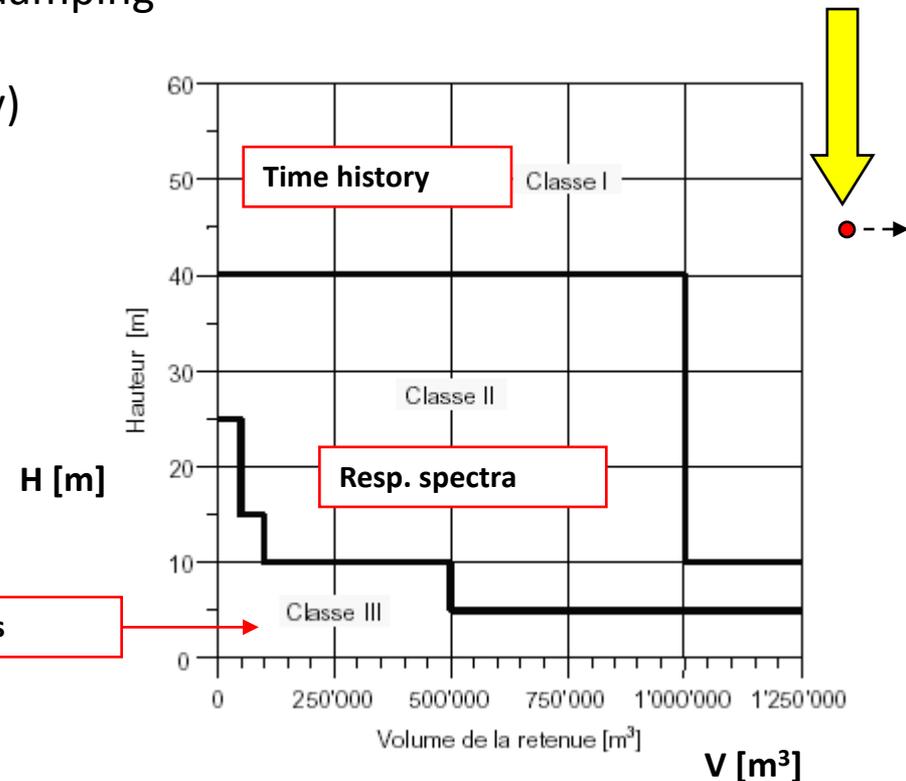
- Contexte: normes et directives suisses
- **Vérification au séisme du barrage de Vieux-Emosson**
- Modélisation « fine » de la roche
- Vérification au séisme du barrage de la Luette
- Conclusions

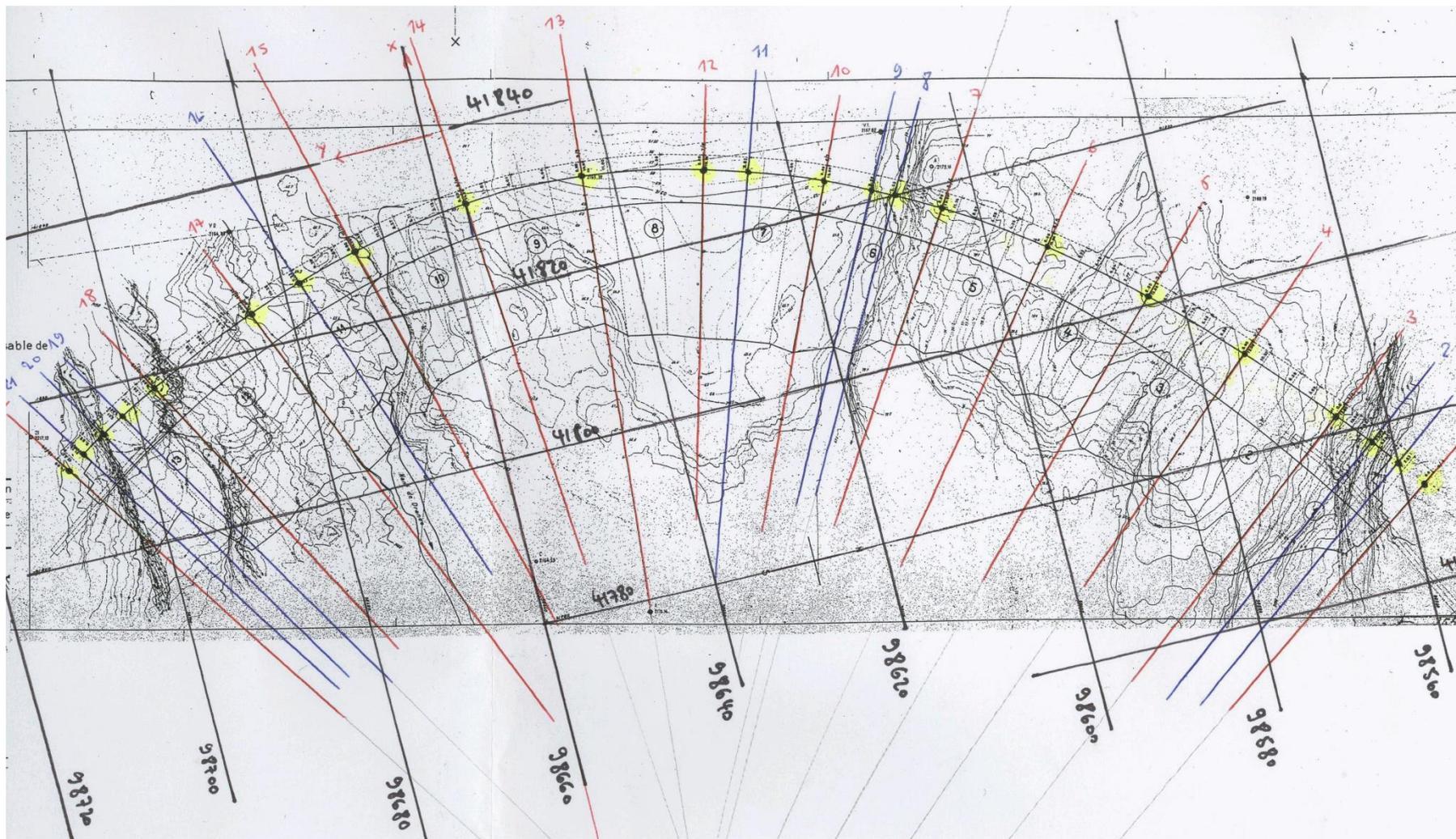
Vieux-Emosson



According to SFOE guidelines, for Class I concrete dams

- Model
 - Dam: finite elements
 - Foundation soil: finite elements
 - Water: oscillating mass (incompressible)
- Materials
 - linear elastic with viscous damping
- Method
 - Accelerogram (time history)
- Verification
 - Stresses
 - Stability (sliding, rocking)

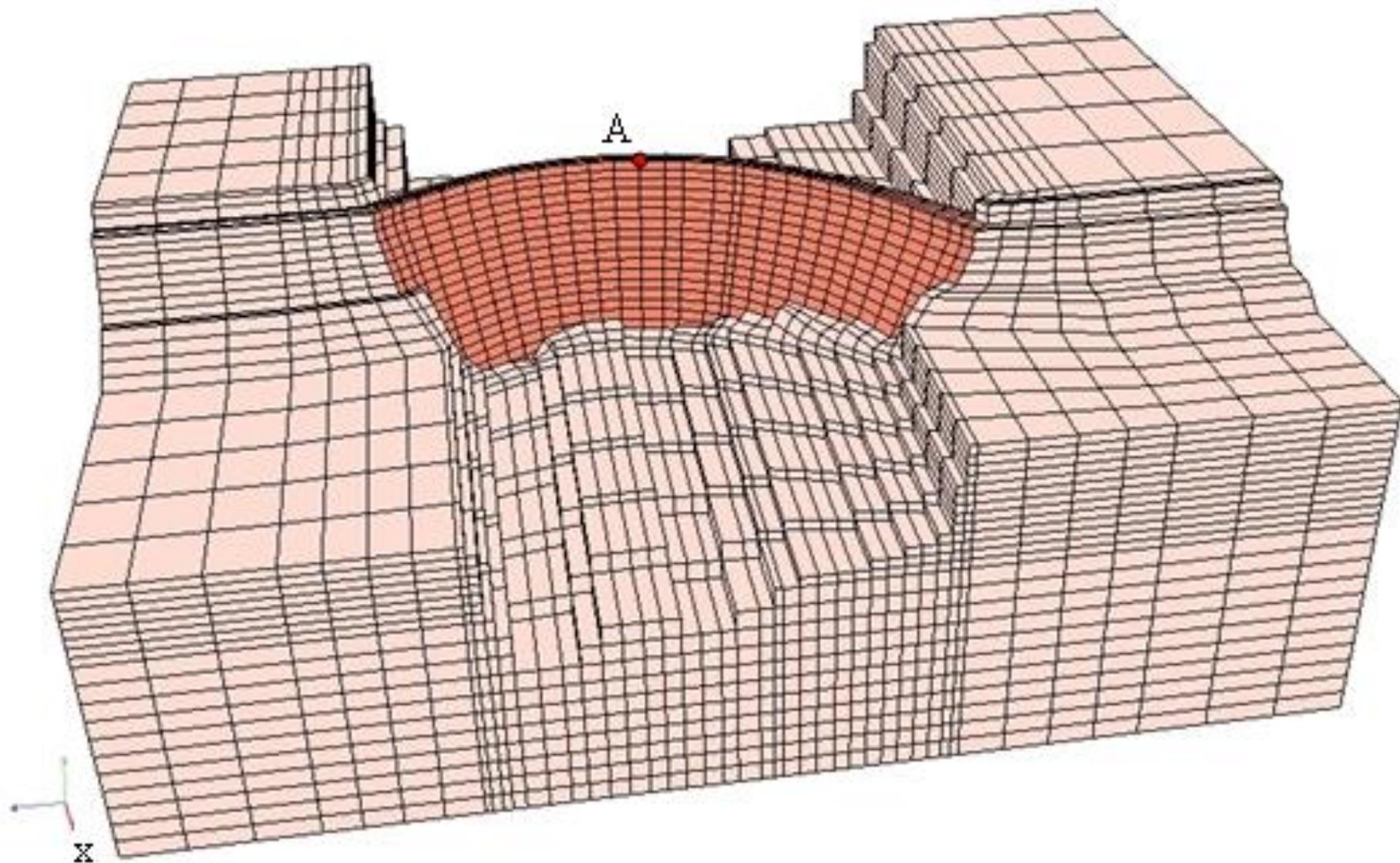




Vérification au séisme de barrages en Suisse au moyen de modélisations par éléments finis

Comportement des massifs rocheux sous sollicitations sismiques

Séance technique CFMR – AFPS du 5 juin 2014, Paris



Vérification au séisme de barrages en Suisse au moyen de modélisations par éléments finis

Comportement des massifs rocheux sous sollicitations sismiques

Séance technique CFMR – AFPS du 5 juin 2014, Paris



	Poids volumique γ [kN/m ³]	Module statique E_s [MPa]	Module dynamique $E_d = 1.25 \times E_s$ [MPa]	Coefficient de Poisson ν [-]	Coefficient de dilatation thermique α [1/°C]	Conductivité thermique K [kN/h°C]	Capacité calorifique C [kJ/m ² °C]
Rocher	24*	18'400	23'000	0.2	-	-	-
Béton de masse	25	37'834	47'292	0.2	0.63×10^{-5}	7.2	2'600
Béton de parement	25	45'789	57'236	0.2	0.75×10^{-5}	7.2	2'600

* Pour l'analyse dynamique la masse du rocher est considérée nulle (cf. §2.7).

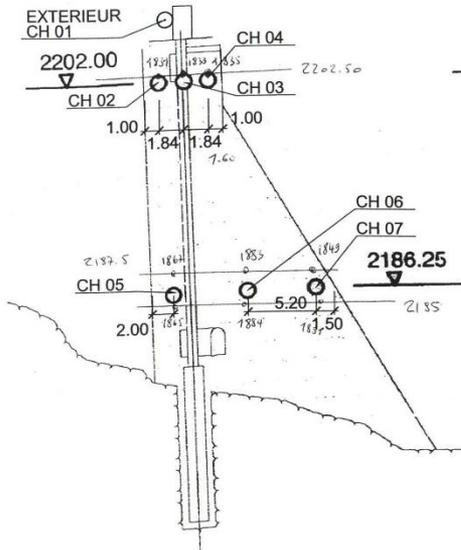
Tableau 1. Paramètres élastiques thermomécaniques des matériaux

4.2.3 Conditions initiales statiques

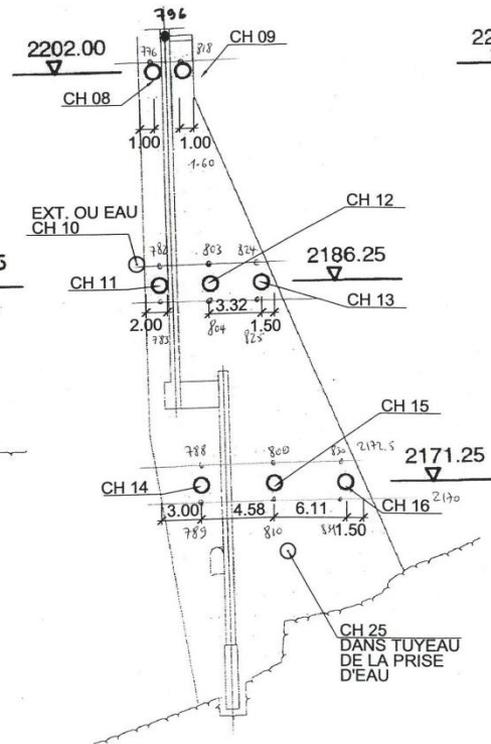
Le séisme de vérification est à considérer comme sollicitation extraordinaire. Les sollicitations correspondantes sont par conséquent à superposer avec celles dues aux charges statiques d'exploitation usuelles qui sont les suivantes :

- Poids propre.
- Poussée de l'eau.
- Température (correspondant au niveau maximal).
- Poussée des terres due aux remblais à l'aval ou aux sédiments dans la retenue.
- Eventuellement poussée des glaces (correspondant au niveau maximal).

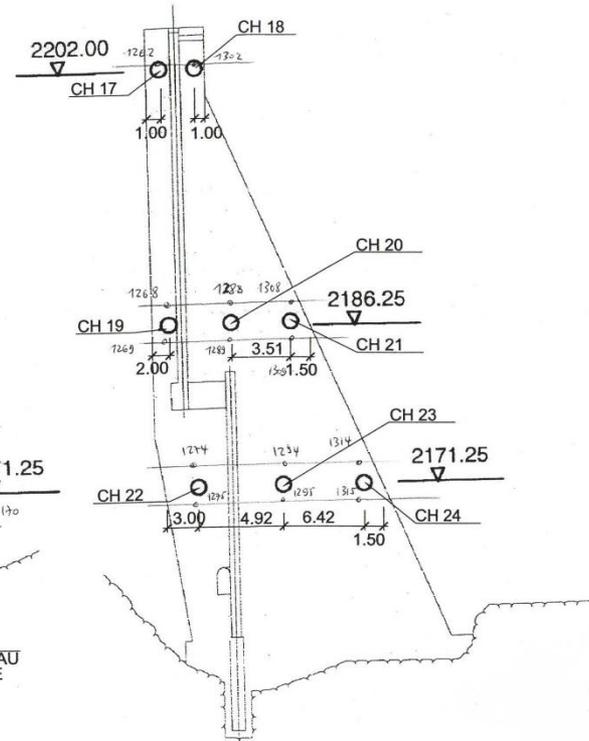
BLOC 3



BLOC 7



BLOC 11



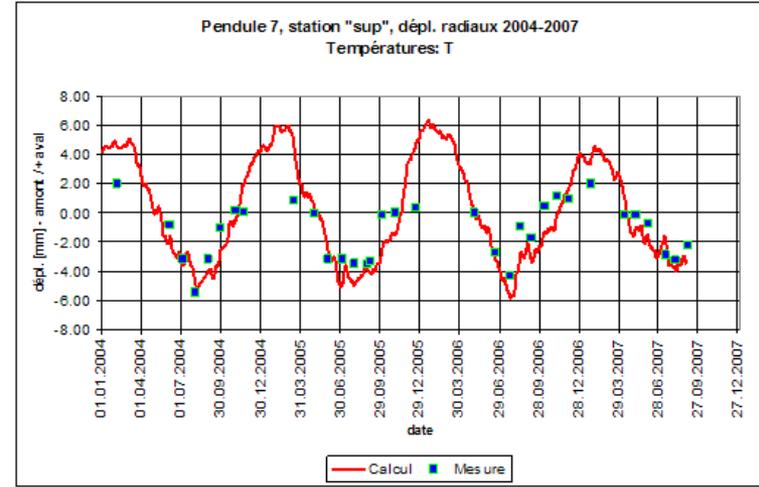
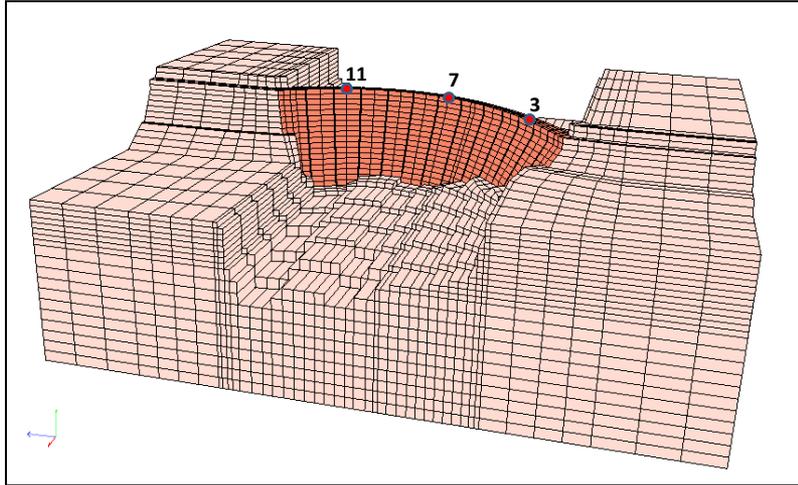


Figure 6. Déplacement radial du pendule 7 (station sup.)

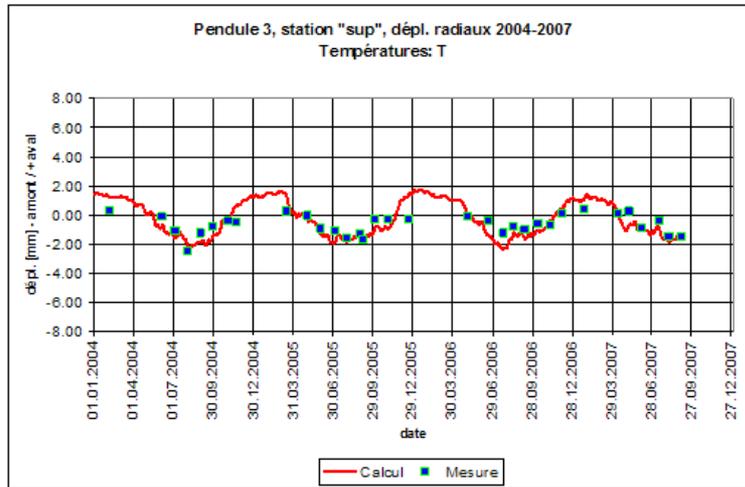


Figure 5. Déplacement radial du pendule 3 (station sup.)

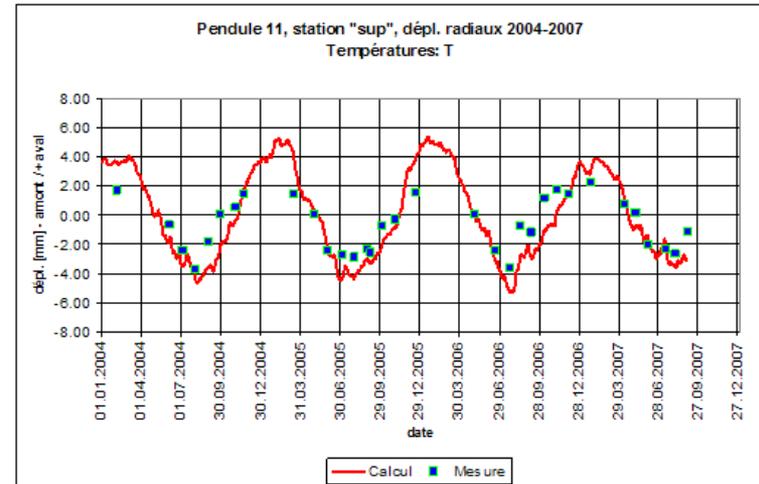


Figure 7. Déplacement radial du pendule 11 (station sup.)

2.4.1 Accélération de pointe

L'accélération horizontale à prendre en compte pour une période de retour de 10'000 ans est définie par :

$$\log a_h = 0.26 I_{MSK} + 0.19$$

où I_{MSK} est l'intensité MSK dont la valeur est obtenue à partir de la carte suisse d'aléa sismique (détermination du danger dû aux séismes, 1977). Pour le site considéré (coordonnées 558'169/101'357), $I_{MSK10'000} = 8.8$, d'où une accélération de pointe :

$$a_h = 3 \text{ m/s}^2$$

L'accélération verticale correspondante est obtenue en multipliant a_h par un facteur 2/3, soit :

$$a_v = 2 \text{ m/s}^2$$

2.4.2 Spectre cible

Le spectre de réponse du site est donné par :

$$S_e(T) = a_h S \left(1 + \frac{T}{T_B} (2.5\eta - 1) \right) \quad \text{pour } 0 \leq T \leq T_B$$

$$S_e(T) = a_h S 2.5\eta \quad \text{pour } T_B \leq T \leq T_C$$

$$S_e(T) = a_h S 2.5\eta \left(\frac{T_C}{T} \right) \quad \text{pour } T_C \leq T \leq T_D$$

$$S_e(T) = a_h S 2.5\eta \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right) \quad \text{pour } T_D \leq T$$

avec, pour la classe du sol de fondation A :

$$S = 1, \eta = 1 (\xi = 5\%)$$

$$T_B = 0.15 \text{ s}, T_C = 0.4 \text{ s}, T_D = 2 \text{ s}$$

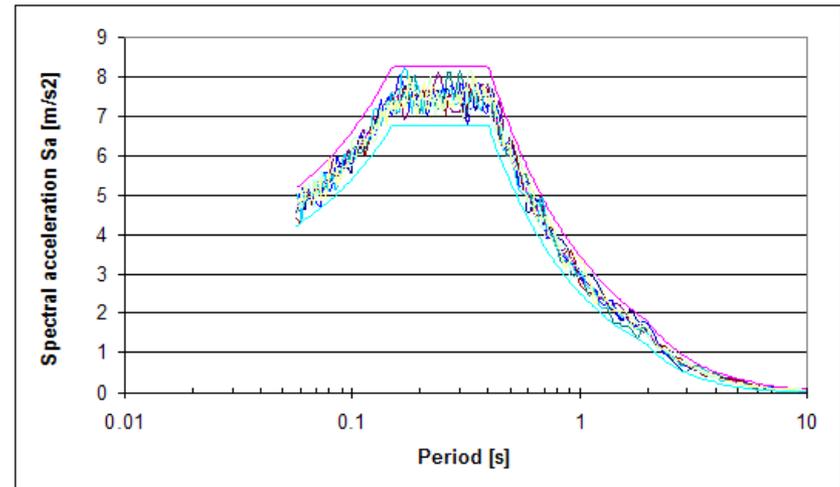
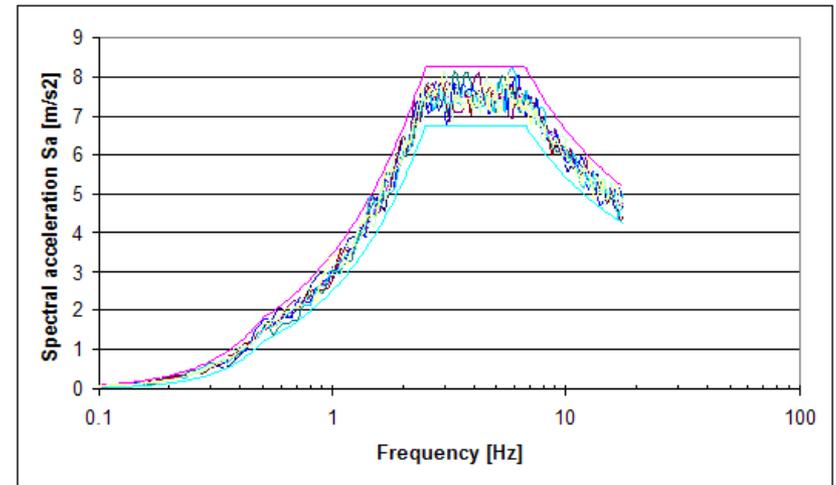
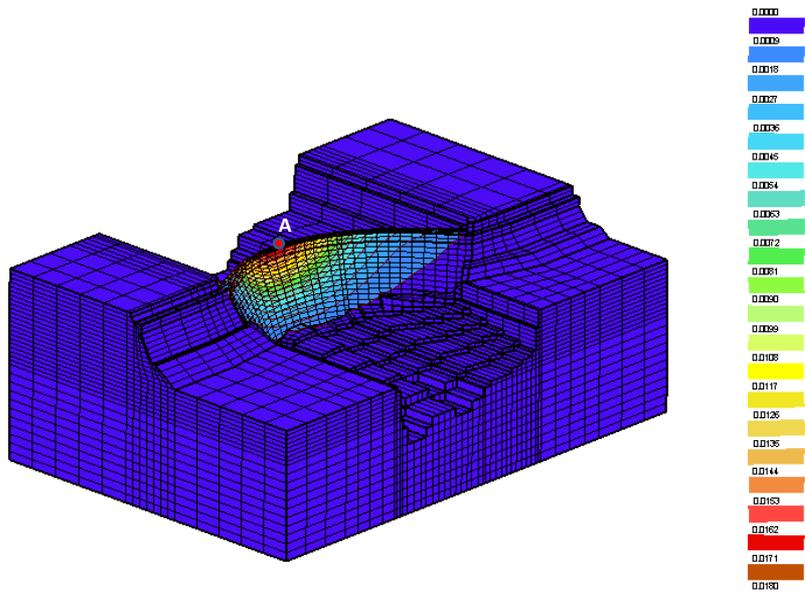
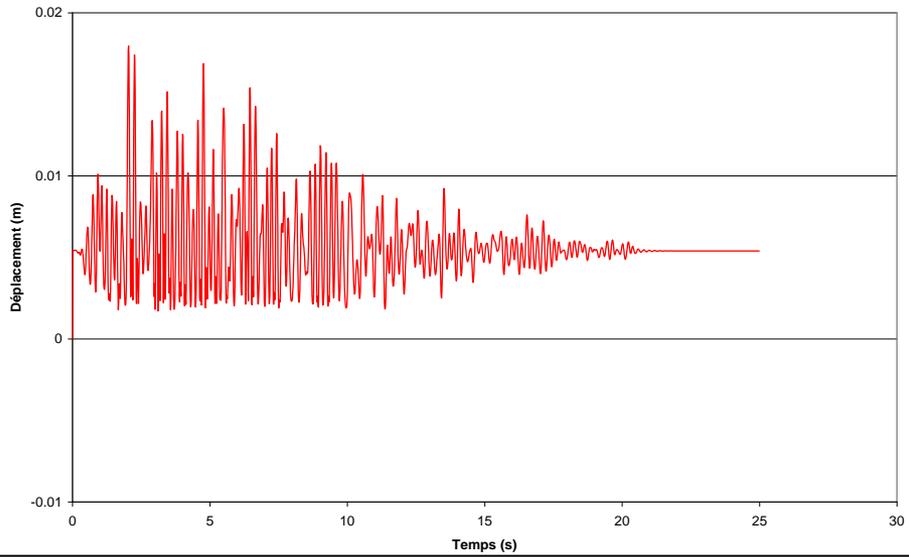


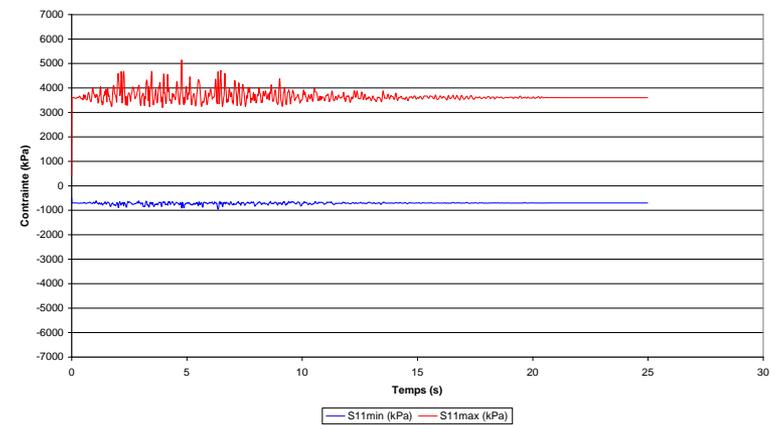
Figure 1.1. Spectres de réponse des accélérogrammes synthétiques utilisés



Déplacement absolu du point A, "+ $\Delta T/2$ ", Acc1



Enveloppe des contraintes principales - "+ $\Delta T/2$ " (Hiver-Printemps), Acc1

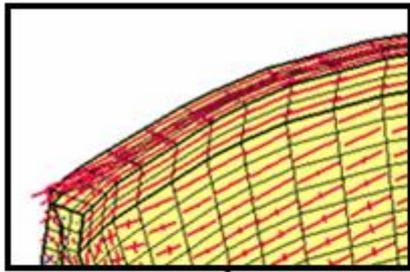


Vérification au séisme de barrages en Suisse au moyen de modélisations par éléments finis

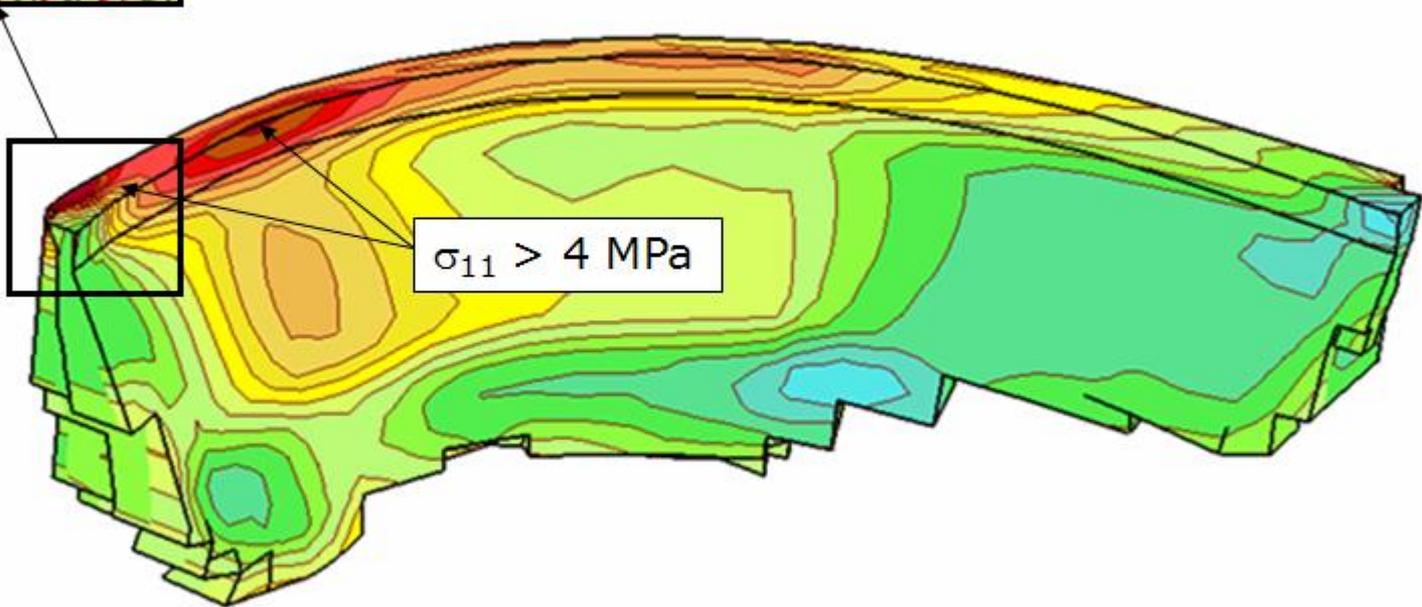
Comportement des massifs rocheux sous sollicitations sismiques

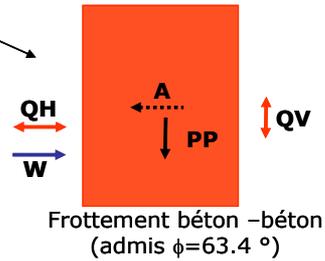
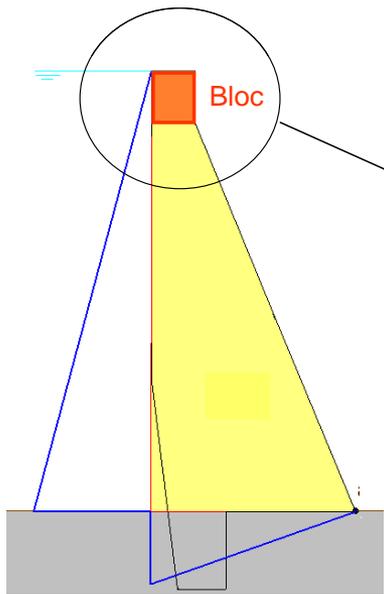
Séance technique CFMR – AFPS du 5 juin 2014, Paris





Horizontal stresses
In reality: probably dissipated in joints
(else cracks would already be seen due to ΔT)





On obtient les facteurs de sécurités suivants en **hiver**:

Au glissement:

FS=	8.10	sans séisme
FS=	1.22	avec séisme horizontal
FS=	0.97	avec séisme horizontal et vertical

Au basculement:

FS=	4.92	sans séisme
FS=	0.51	avec séisme horizontal et vertical

Sion fait la même approche en **été** on obtient des sécurités largement supérieures, avec un effet d'arc A de 4280 kN/m' :

Au glissement:

FS=	42.33	sans séisme
FS=	6.35	avec séisme horizontal
FS=	6.11	avec séisme horizontal et vertical

Au basculement:

FS=	56.28	sans séisme
FS=	5.90	avec séisme horizontal et vertical

On observe ainsi que la stabilité d'un tel bloc n'est pas garantie en cas de séisme.

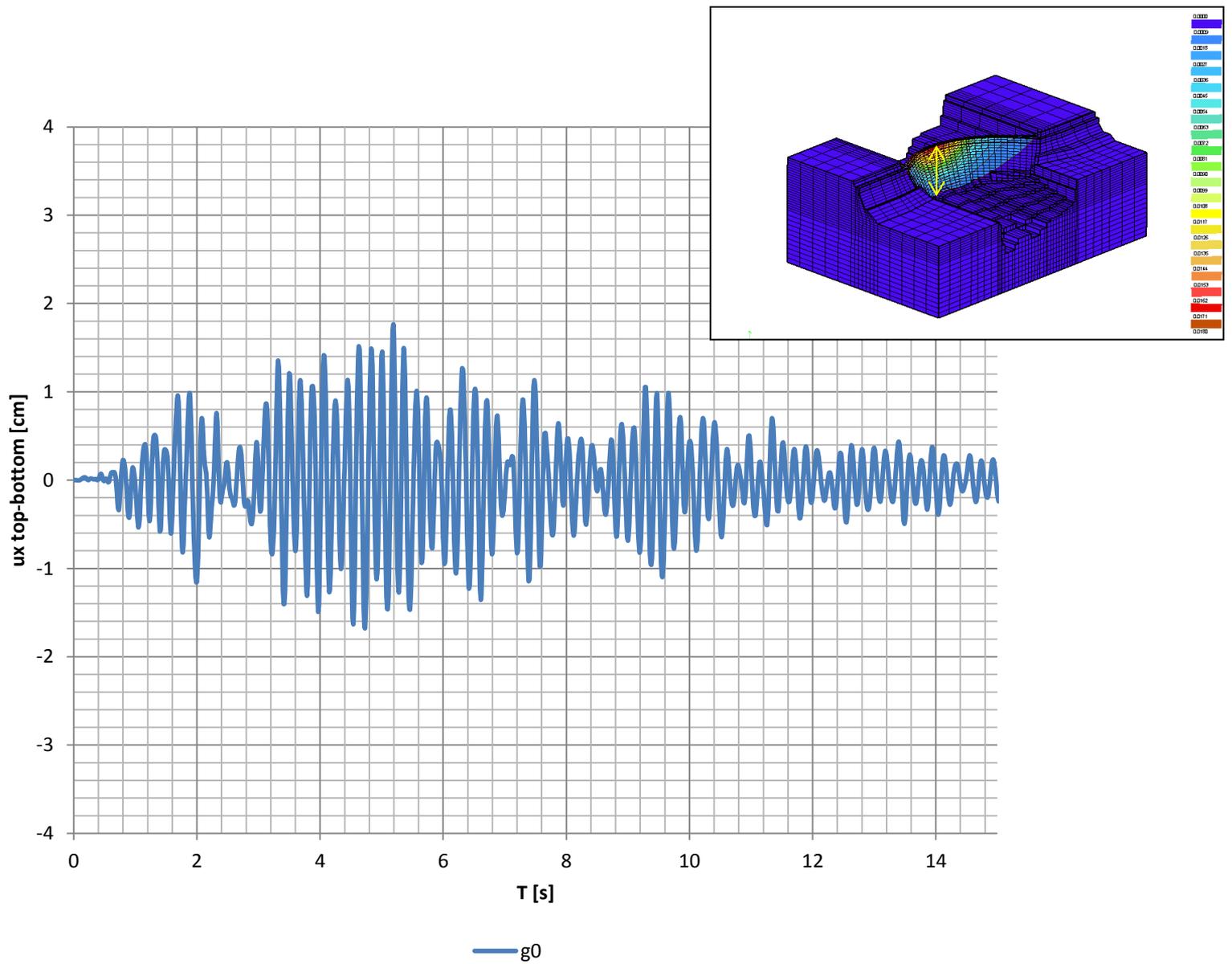
Sommaire

- Contexte: normes et directives suisses
- Vérification au séisme du barrage de Vieux-Emosson
- **Modélisation « fine » de la roche**
- Vérification au séisme du barrage de la Luette
- Conclusions

Modélisation « fine » de la roche

	Vérification 2009 selon directives OFEN 2003	Proposition 2014
modèle constitutif	élastique linéaire	Hoek-Brown (paramètres E_{dyn} , f_c , f_t)
poids propre	$\gamma = 0$	$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$
conditions aux limites	fixes	amortisseurs

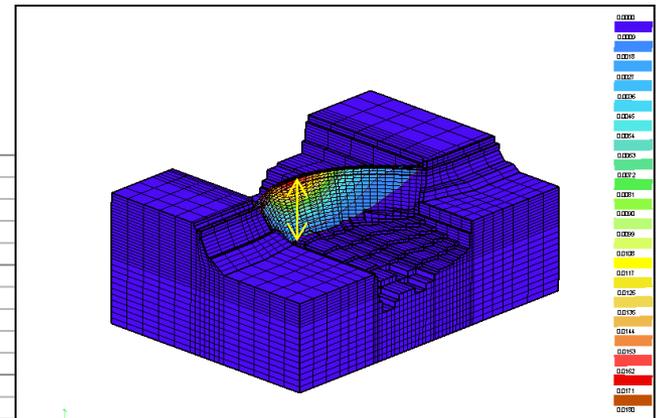
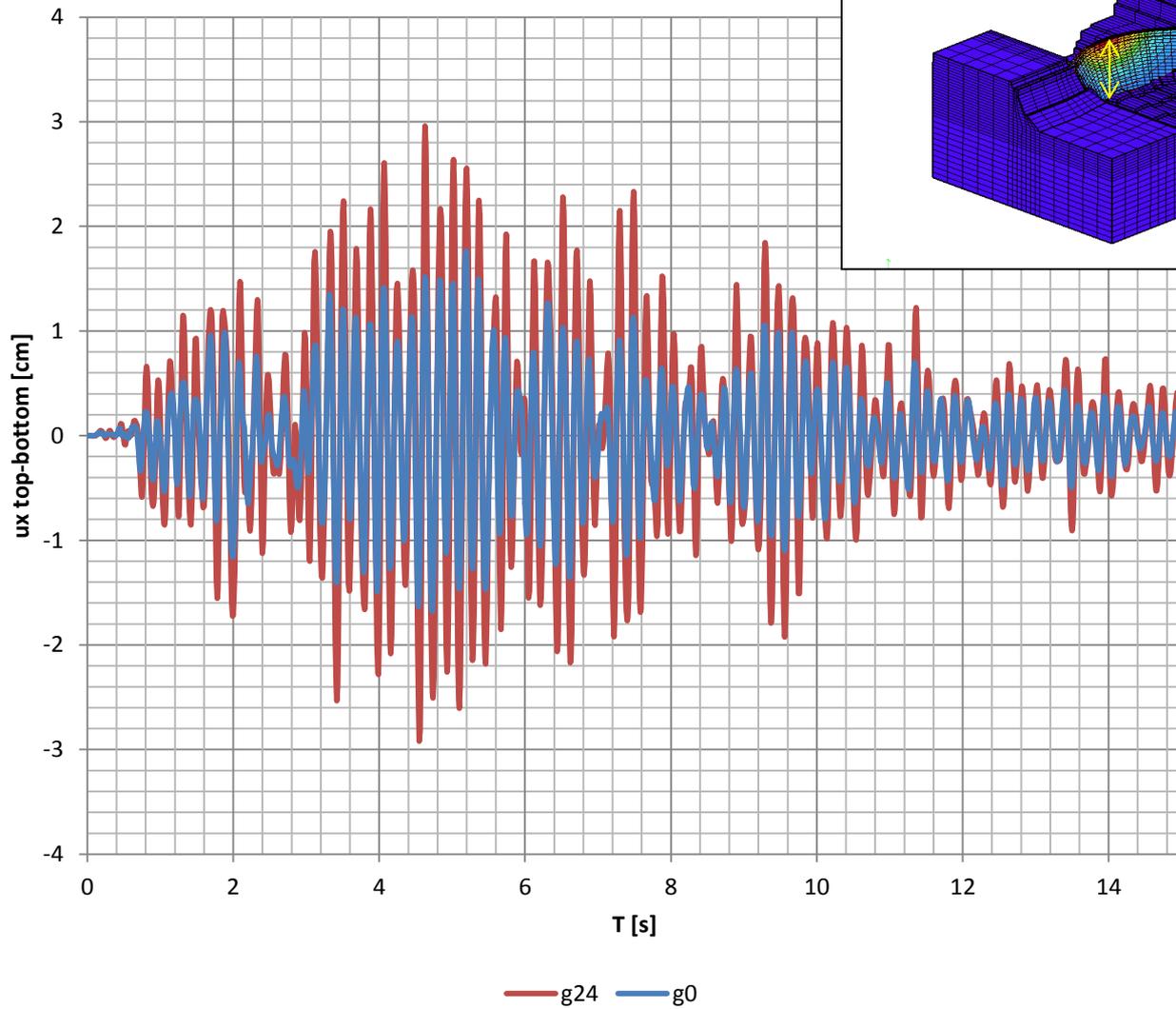
=> Comparaison sur a_x seul...

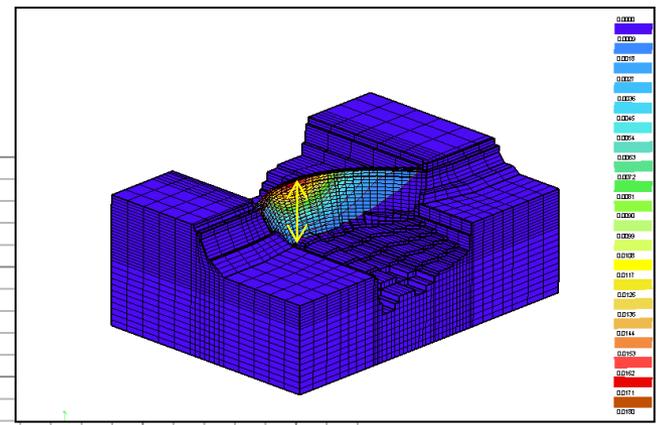
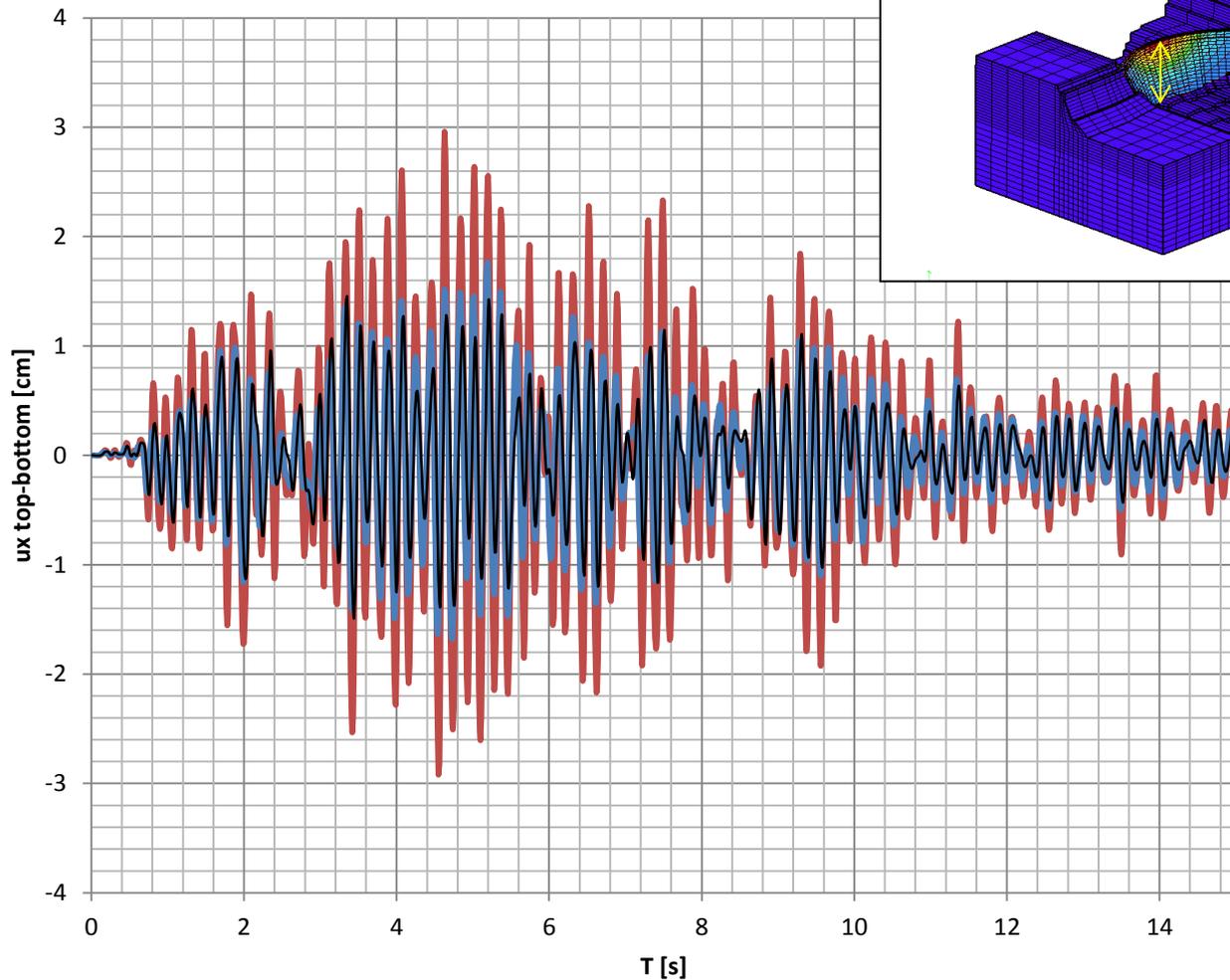


Vérification au séisme de barrages en Suisse au moyen de modélisations par éléments finis

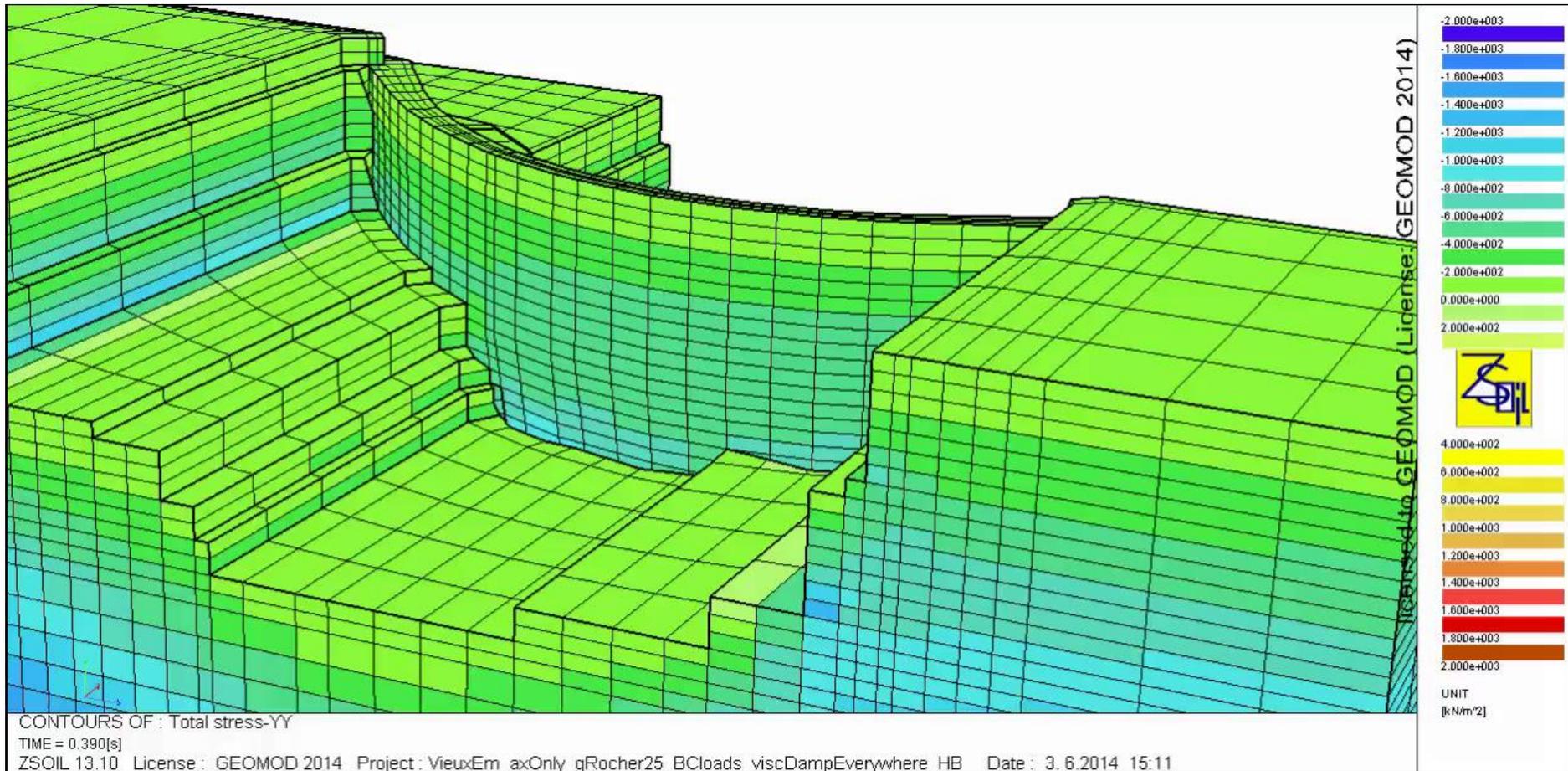
Comportement des massifs rocheux sous sollicitations sismiques

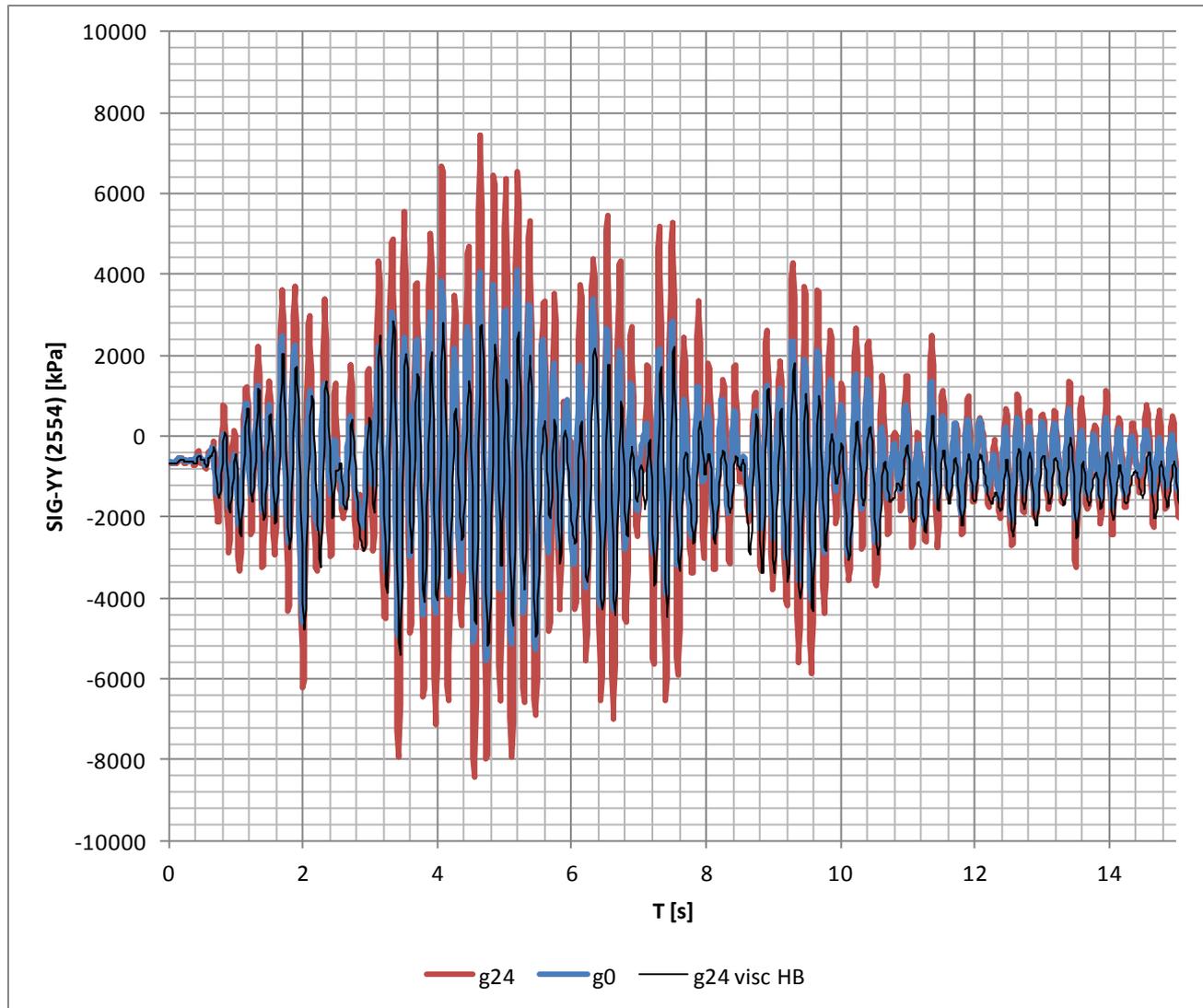
Séance technique CFMR – AFPS du 5 juin 2014, Paris





— g24 — g0 — g24 visc HB





Vérification au séisme de barrages en Suisse au moyen de modélisations par éléments finis

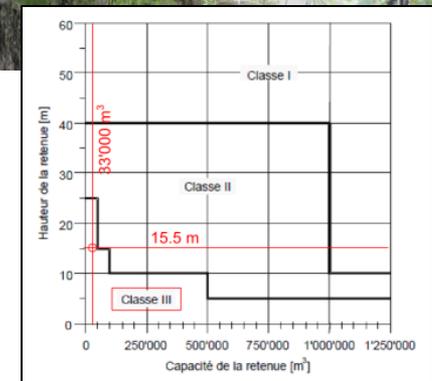
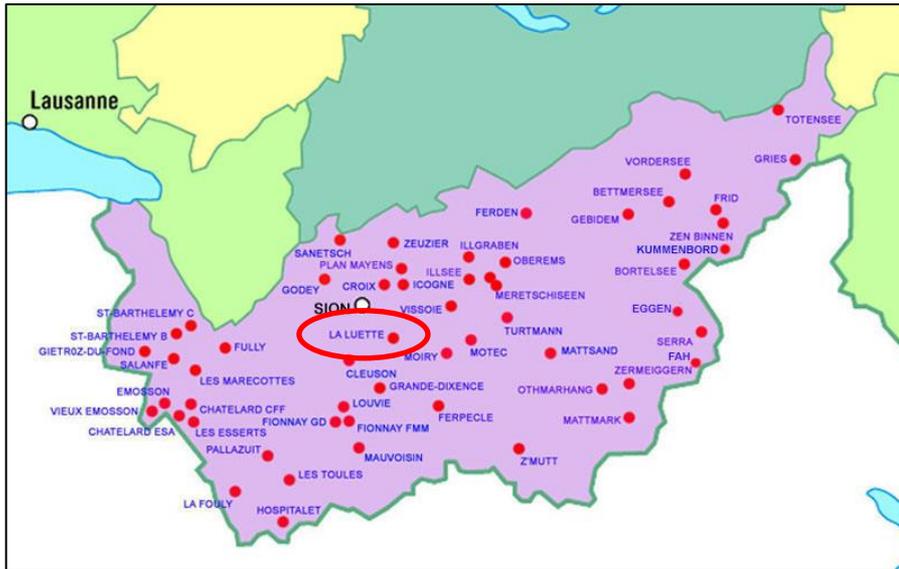
Comportement des massifs rocheux sous sollicitations sismiques

Séance technique CFMR – AFPS du 5 juin 2014, Paris

Sommaire

- Contexte: normes et directives suisses
- Vérification au séisme du barrage de Vieux-Emosson
- Modélisation « fine » de la roche
- **Vérification au séisme du barrage de la Luette**
- Conclusions

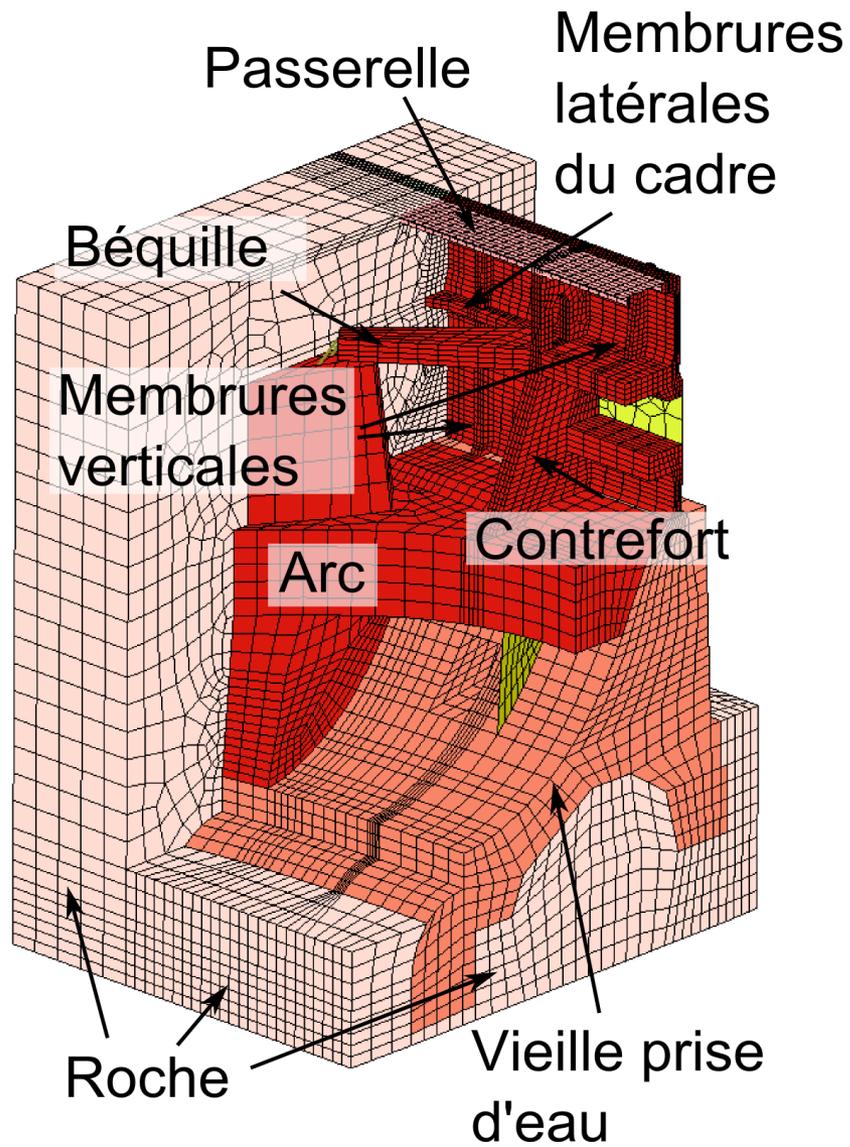
La Lulette

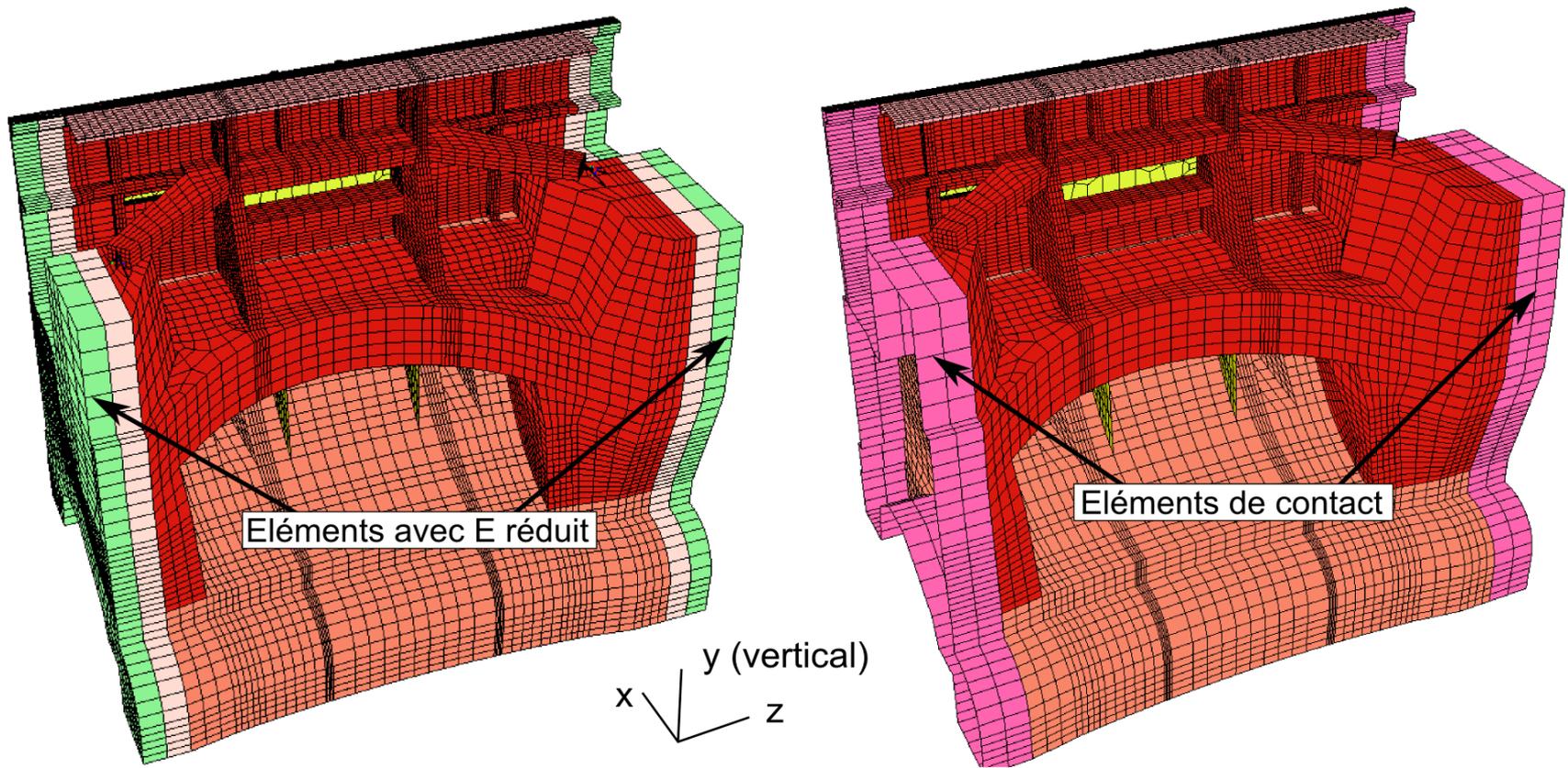


Vérification au séisme de barrages en Suisse au moyen de modélisations par éléments finis

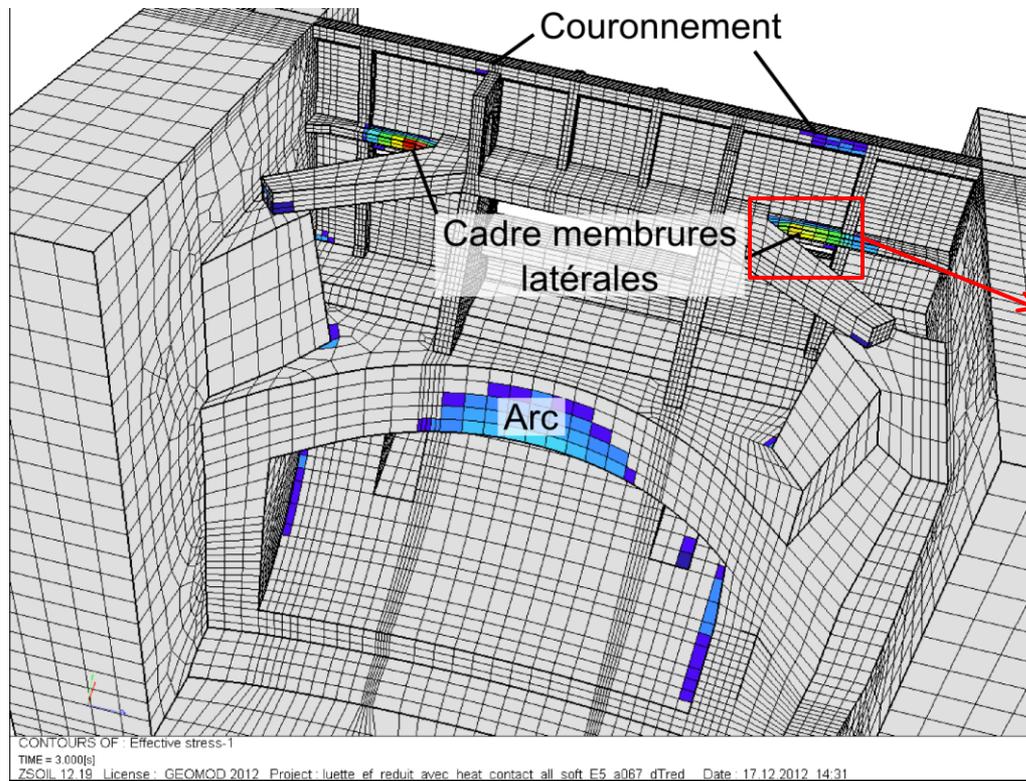
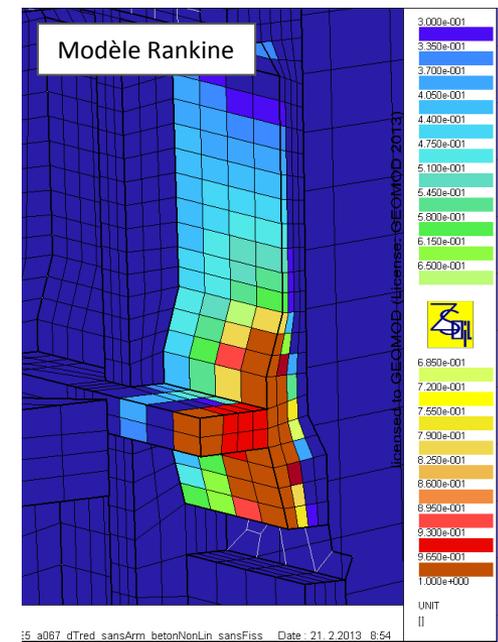
Comportement des massifs rocheux sous sollicitations sismiques

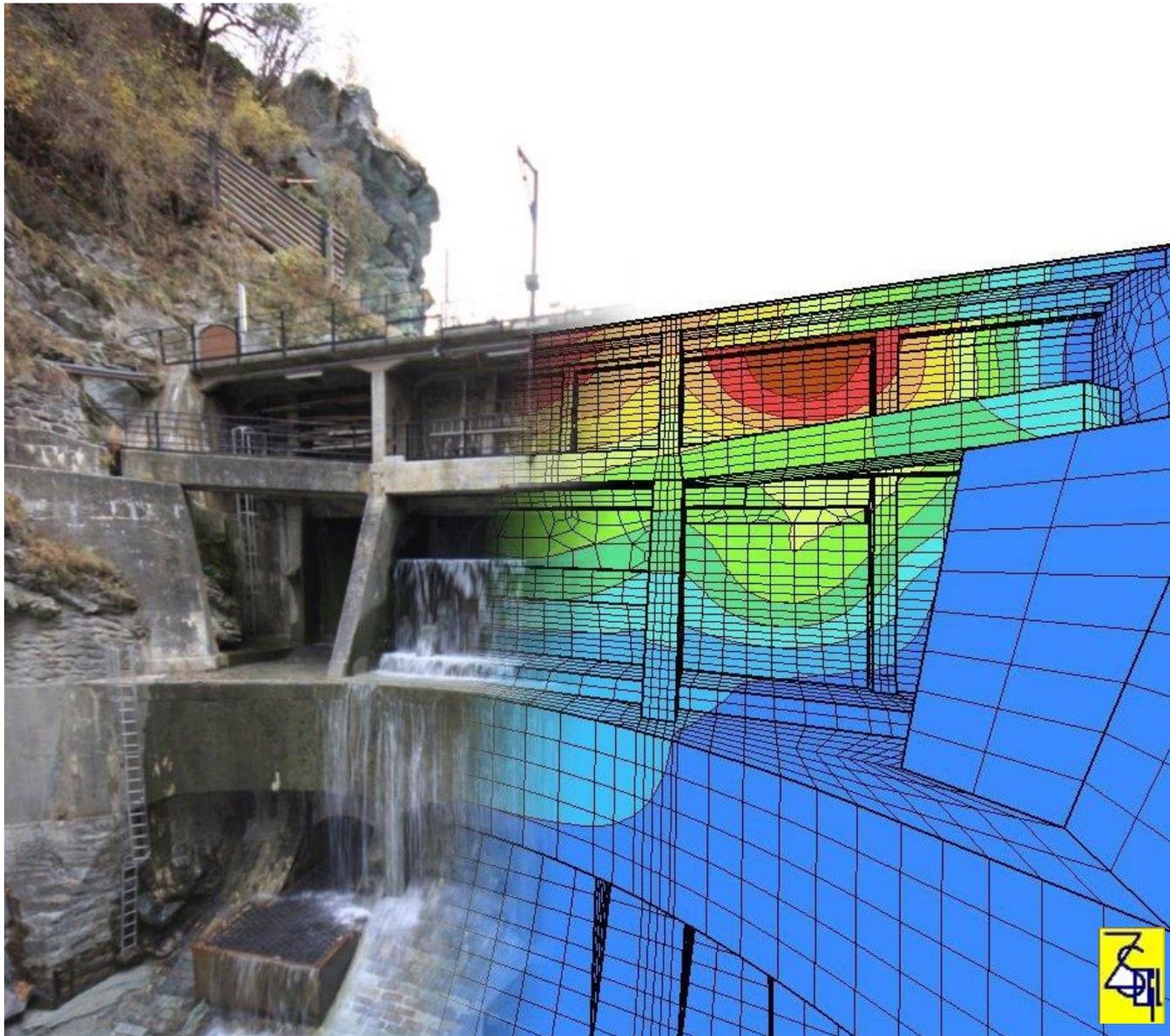
Séance technique CFMR – AFPS du 5 juin 2014, Paris





Pas de temps	Première contrainte principale σ_1 (rouge: traction; bleu: compression)	Arc		Béquilles		Contreforts		Couronnement		Membres latéraux du cadre		Piliers		Membres verticales		Mur	
		max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
		[MPa]															
0.5	Poids propre, poussée de l'eau, T=10°C	0.3	-1.2	0.9	-2.3	1.7	-3.2	1.7	-1.8	2.2	-2.4	2.5	-0.4	1.2	-3.2	2.4	-2.4
1	Hiver	4.4	-1.8	2.6	-2.5	2.6	-4.5	3.6	-1.6	7.5	-2.7	1.4	-2.5	3.0	-2.9	3.4	-2.7
2	Été	0.2	-3.5	1.0	-3.1	2.2	-3.4	1.4	-2.9	1.0	-3.4	2.3	-1.0	1.3	-3.9	1.7	-3.6
3	Hiver + séisme vers l'aval	6.0	-2.3	3.5	-3.3	3.2	-5.8	4.6	-2.1	10.0	-3.6	1.8	-3.1	4.0	-3.2	4.3	-3.1
4	Été + séisme vers l'aval	0.2	-3.6	1.2	-3.8	2.2	-3.7	1.8	-3.3	1.1	-3.3	2.9	-1.0	1.3	-4.0	2.0	-3.7
5	Hiver + séisme vers l'amont	6.1	-1.9	3.3	-2.8	2.6	-4.6	3.9	-1.4	8.9	-2.8	1.6	-3.1	3.7	-2.8	3.9	-2.9
6	Été + séisme vers l'amont	0.2	-3.5	0.8	-2.5	2.0	-3.1	1.0	-2.4	0.7	-3.6	1.9	-1.0	1.2	-3.9	1.5	-3.5





Vérification au séisme de barrages en Suisse au moyen de modélisations par éléments finis

Comportement des massifs rocheux sous sollicitations sismiques

Séance technique CFMR – AFPS du 5 juin 2014, Paris

Sommaire

- Contexte: normes et directives suisses
- Vérification au séisme du barrage de Vieux-Emosson
- Modélisation « fine » de la roche
- Vérification au séisme du barrage de la Luette
- **Conclusions**

Conclusions sur la vérification au séisme des barrages

- En 2003: approche simplifiée recommandée par les directives: **fondation élastique sans masse**
- 10 ans plus tard: possibilité de faire de vraies analyses dynamiques dans le temps **non-linéaires**:
 - **Conditions aux limites** appropriées (amortisseurs, conditions périodiques, DRM, ...)
 - **Lois de comportement et paramètres** du rocher (et du béton)
 - **Interface** barrage-fondation