



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN
Ufficio federale dell'energia UFE
Uffizi federal d'energia UFE



RÉVISION TOTALE DE LA DIRECTIVE PARTIE C3

VÉRIFICATION DE LA SÉCURITÉ SISMIQUE DES BARRAGES EN BÉTON



THÈMES DE DISCUSSION

- Contexte
 - Comportements sismiques enregistrés
 - Base juridique en Suisse
 - Objectifs de la vérification de sécurité sismique
 - L'état de la science et de la technique
- Paramètres des matériaux
- Méthodologie de vérification de la sécurité sismique
 - Développement d'un modèle
 - Analyses à conduire
 - Vérification de la sécurité sismique des barrages-poids, barrages en contreforts et barrage mobiles
 - Vérification de la sécurité sismique des barrages-voûtes
- Manuels de l'ingénieur



CONTEXTE – COMPORTEMENTS SISMIQUES ENREGISTRÉS

- À l'échelle mondiale, les performances de tous les types de barrages en béton soumis à de forts séismes ont été satisfaisantes.
- Certains barrages en béton ont subi des dommages lors de séismes violents, notamment des fissures et/ou des déformations.
- Il n'existe aucun cas répertorié d'effondrement complet d'un barrage en béton à la suite d'un séisme, à l'exception d'un cas où le barrage est situé au droit d'une faille active (le barrage-mobile de Shih-Kang).
- Cependant, le véritable test d'un grand barrage en béton à retenue pleine soumis à une accélération maximale du sol de plus de 0.5 g est encore à venir.



CONTEXTE – COMPORTEMENTS SISMIQUES ENREGISTRÉS

- Dommages typiques aux barrages en béton enregistrés à la suite de séismes violents:
 - Barrages-poids et barrages à contreforts:
 - **fissuration** du **béton** **et** au **droit de reprises de bétonnage** dans la partie supérieure (dans la zone où le parement aval présente un changement brusque de pente).
 - Barrages-voûtes:
 - **fissuration** du béton **et** au **droit de reprises de bétonnage**,
 - **ouvertures** permanentes des **joints** de plots, et
 - **fissuration** et **déplacements** des **appuis**.



CONTEXTE – COMPORTEMENTS SISMIQUES ENREGISTRÉS

EXEMPLES

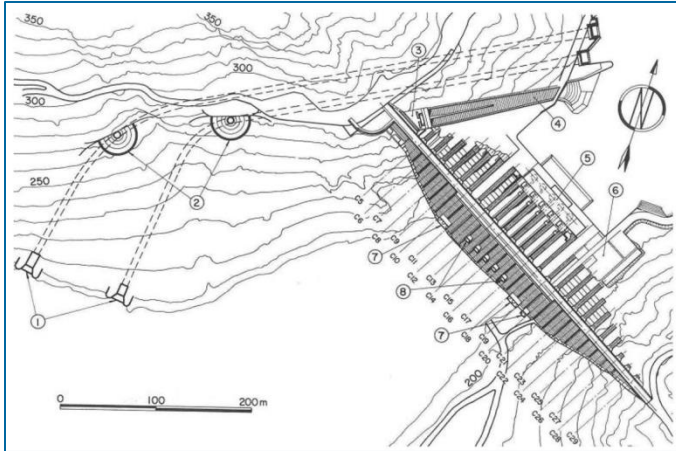
Barrage	Hauteur (m)	Type	Pays	Date	Magnitude M_w	Dégâts	Remarque
Koyna	102	Barrage-poids	Inde	11.12.1967	6.3	Fissuration importante.	
Pacoima	113	Barrage-voûte	USA (Californie)	09.02.1971	6.6	Dégâts à l'appui de la rive gauche.	Retenue à $0.6 \cdot H_{\max}$
Pacoima	113	Barrage-voûte	USA (Californie)	17.01.1994	6.7	Ouvertures des joints; fissuration de la culée-poids gauche; déplacement de l'appui de la rive gauche.	Retenue à $0.3 \cdot H_{\max}$
Sefid Roud	106	Barrage à contreforts	Iran	20.06.1990	7.4	Fissuration importante.	
Shih-Kang	25	Barrage mobile	Taiwan	21.09.1999	7.7	Rupture au droit de la faille Chelungpu.	Écoulement incontrôlé de 100 à 200 m ³ /s



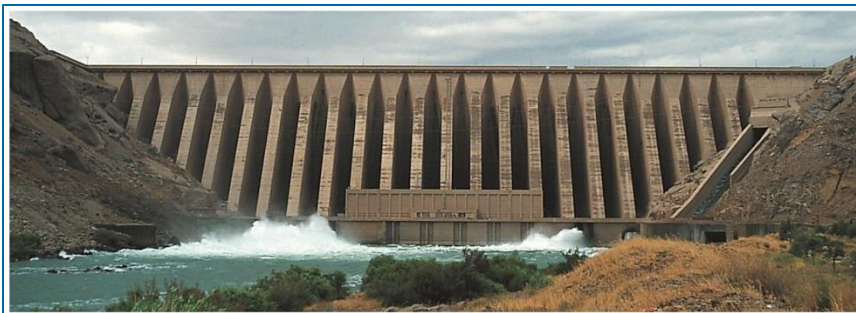
CONTEXTE – COMPORTEMENTS SISMIQUES ENREGISTRÉS

LE BARRAGE DE SEFID ROUD : DÉGÂTS DUS AU SÉISME DE MANJIL DU 20.06.1990

Vue en plan



Le barrage de Sefid Roud immédiatement après le séisme du 20.06.1990



Fissuration au niveau de changement de pente des contreforts (gauche) et au droit d'une reprise de bétonnage (droit)



Fissuration du parement amont au droit d'une reprise de bétonnage



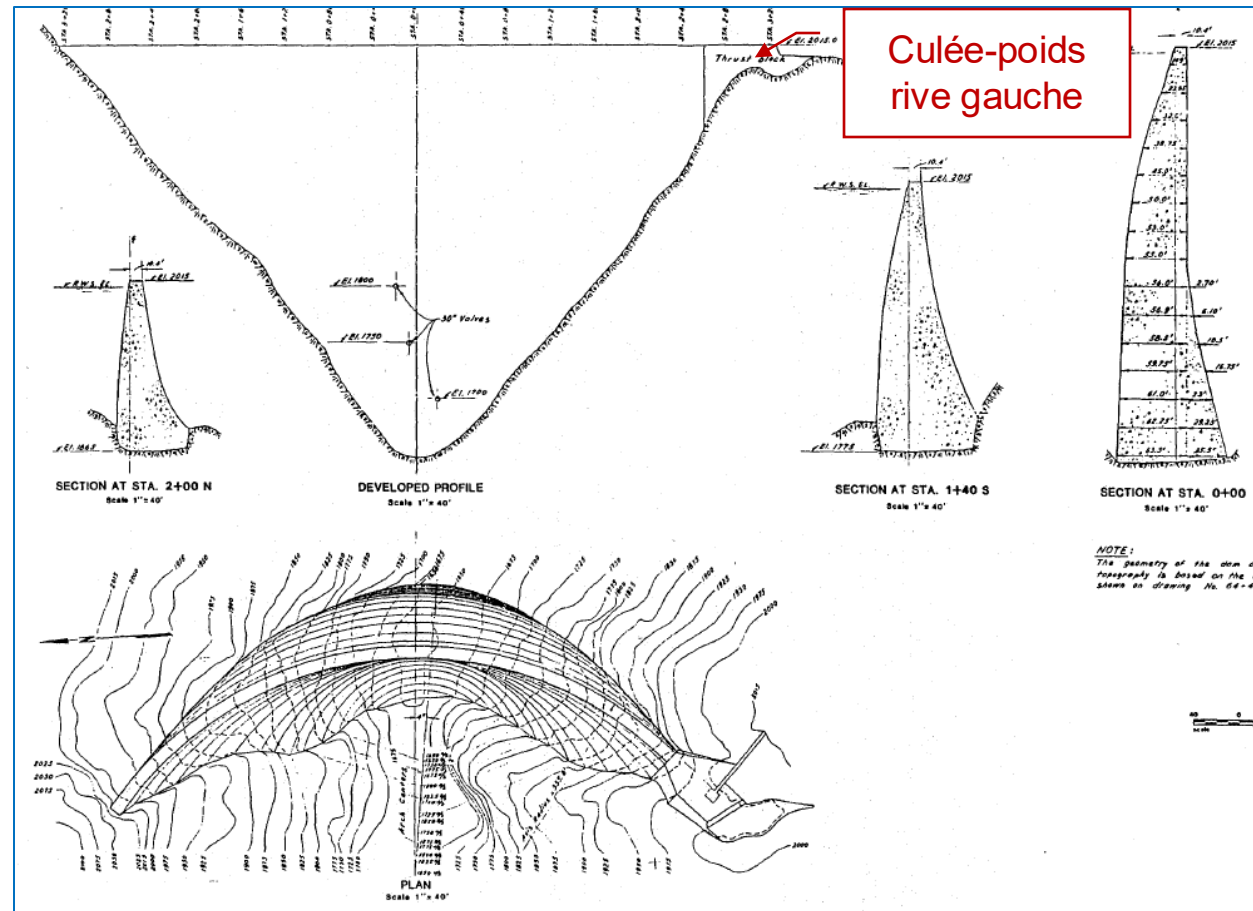
Source: Martin Wieland 2020, *Damage of Sefid Rud buttress dam project in Iran caused by the Magnitude 7.4 Manjil Earthquake of June 21, 1990*, 17 WCEE in Sendai, Japan



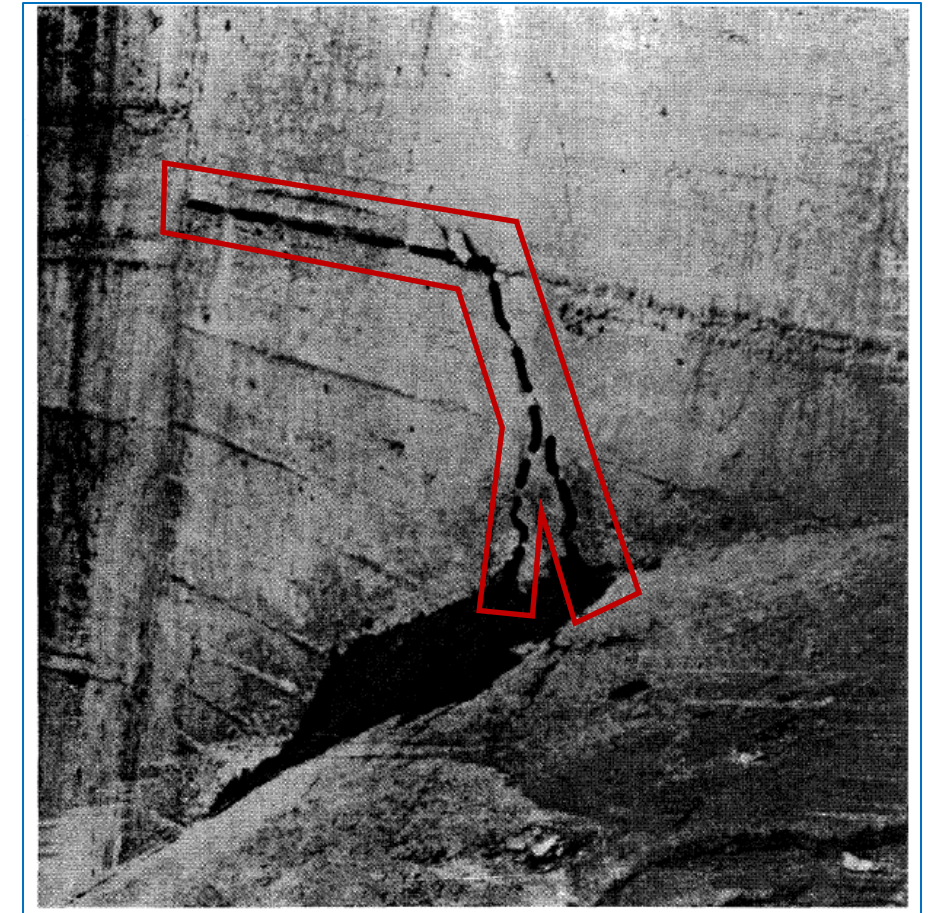
CONTEXTE – COMPORTEMENTS SISMIQUES ENREGISTRÉS

LE BARRAGE DE PACOIMA : DÉGÂTS DUS AU SÉISME DE NORTHRIDGE DU 17.01.1994

Le barrage de Pacoima: géométrie



Fissures dans la culée-poids gauche



Source: USCOLD 1992, *Observed Performance of Dams, Volume I*



CONTEXTE – COMPORTEMENTS SISMIQUES ENREGISTRÉS

LE BARRAGE-MOBILE DE SHIH-KANG : EFFONDREMENT DU AU SÉISME DE CHI-CHI DU 21.09.1999

La rupture de la faille Chelungpu lors du séisme de Chi-Chi est passé à travers de la partie nord (rive droite) du barrage mobile en détruisant la structure en béton armé et des vannes en acier.



Source: E. Faccioli, I. Anastasopoulos, G. Gazetas, A. Callerio, R. Paolucci, 2008. *Fault-rupture foundation interactions: selected case histories*. Bulletin of Earthquake Engineering.



CONTEXTE – BASE JURIDIQUE EN SUISSE

- D'après la LOA*, RS 721.101: «Les **ouvrages d'accumulation** doivent être dimensionnés, construits et exploités conformément **à l'état de la science et de la technique** de sorte que leur **sécurité** reste **assurée** dans **tous** les **cas de charge** et d'exploitation prévisibles».
- L'un des cas de charge à prendre en considération est celui d'un séisme extrême (article 5, alinéa 4, OSOA**).
- Dans certaines régions de **Suisse**, les séismes peuvent atteindre une magnitude de **M_w 7.5**.
- L'expérience mondiale montre que les **barrages en béton** peuvent subir des **dommages importants**, lors de séismes d'une **magnitude supérieure à M_w 6.3**.
- Les barrages en béton en Suisse peuvent donc être sérieusement endommagés par des séismes extrêmes et il faut vérifier que leur sécurité reste assurée pour ce cas de charge:
 - en tenant compte de possibilité des dommages importants structurels; et
 - en utilisant l'état de la science et de la technique.

* Loi fédérale sur les ouvrages d'accumulation du 1er octobre 2010.

** Ordonnance sur les ouvrages d'accumulation du 23 novembre 2022.



CONTEXTE – OBJECTIFS DE LA VÉRIFICATION

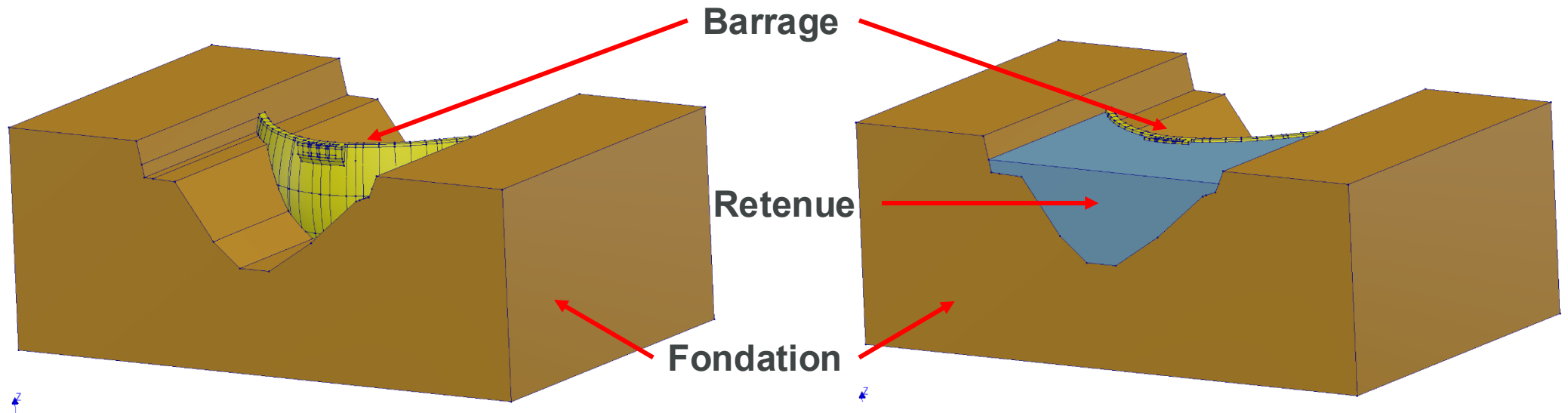
- Il faut vérifier que **pendant** et **après** un tremblement de terre du niveau SES (**séisme d'évaluation de la sécurité**), une défaillance de l'ouvrage pouvant entraîner un **écoulement incontrôlé** et **potentiellement dommageable** des eaux de la retenue (ou d'autres matériaux retenus, p.ex. des débris dans le cas des BPCDN*) **peut être exclu** (paragraphe 2.2).
- Toutefois, des **dommages**, y compris les déformations permanentes qui ne compromettent pas la sûreté de l'installation de stockage, sont considérés comme **acceptables**.
- En plus du séisme d'évaluation de la sécurité, la sécurité des ouvrages d'accumulation de **classe I** doit être vérifiée pour les **répliques** immédiates (paragraphe 4.1.2.2).

*Barrages de protection contre les dangers naturels



CONTEXTE – L'ÉTAT DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE

- L'état de la science et de la technique permet d'analyser en détail les performances des barrages en béton en cas de séismes extrêmes de niveau SES en utilisant des méthodes numériques (la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies).
- Le modèle numérique analysé tient compte de la **fondation**, du **barrage** et de la **retenue**
 - Interaction sol-structure
 - Interaction fluide-structure (pressions hydrodynamiques à cause du séisme)





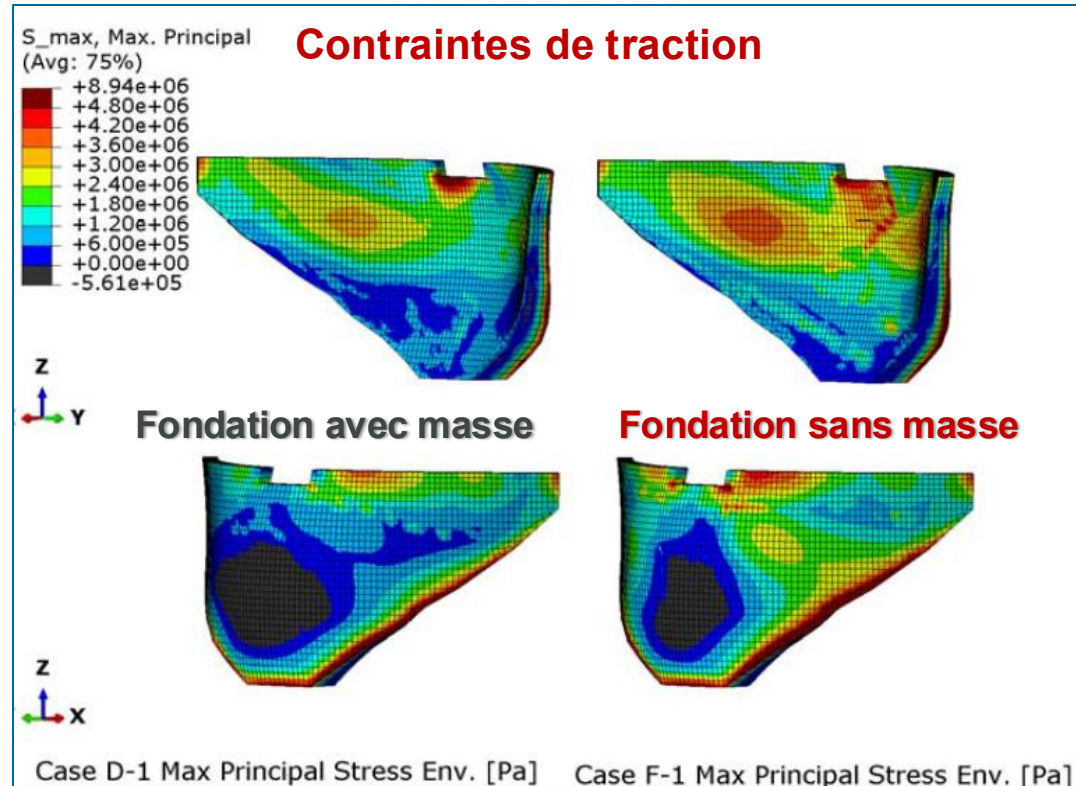
CONTEXTE – L'ÉTAT DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE

- Modélisation élastique-linéaire:
 - Analyse dynamique à l'aide de la méthode du spectre de réponse
 - Analyse dynamique avec évolution temporelle
- **Modélisation non-linéaire (depuis déjà 40 ans):**
 - Analyse dynamique avec évolution temporelle
 - **Interfaces** (discontinuités préexistantes) avec comportement non-linéaire, p.ex. barrage-fondation, joints de plots, reprises de bétonnage
 - Modèles de **matériaux non-linéaires**
 - Modèles continus: modèles élasto-plastiques et modèles d'endommagement
 - Modèles discrets: modèles de la rupture

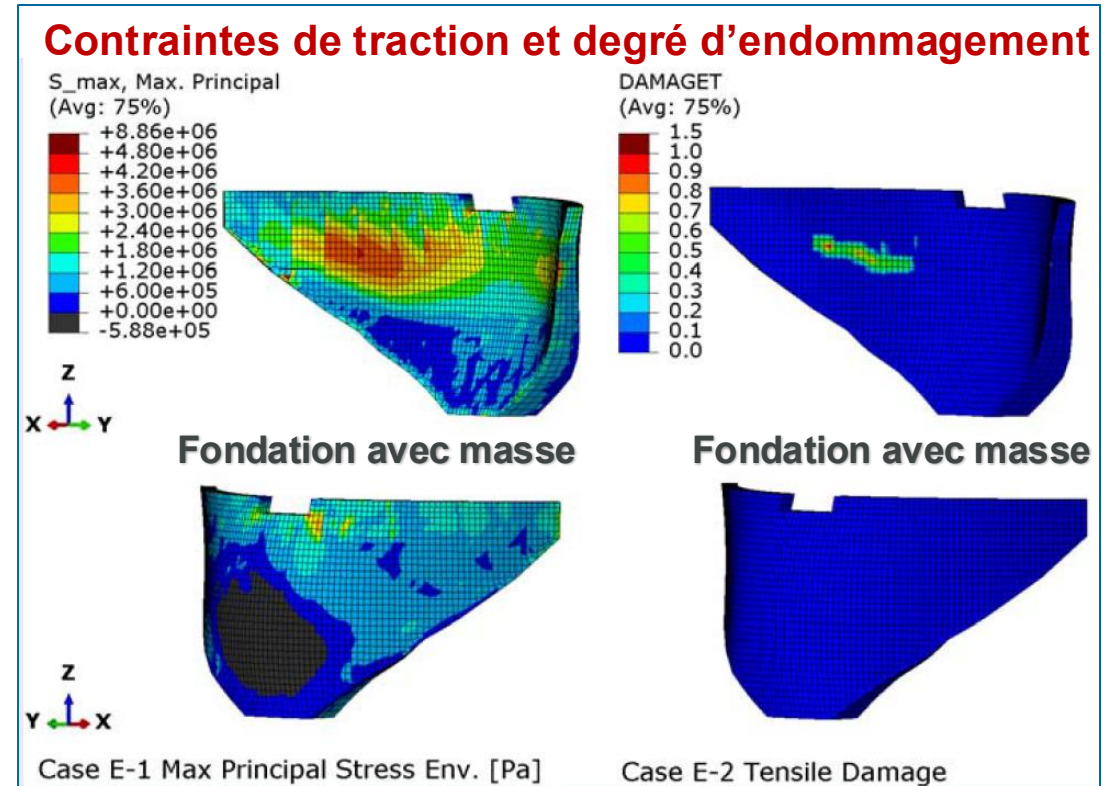


CONTEXTE – L'ÉTAT DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE

EXEMPLE : MODÉLISATION DU COMPORTEMENT SISMIQUE DES BARRAGES-VOÛTES



Cas D-1: monolithique, fondation avec masse
Cas F-1: monolithique, fondation sans masse



Cas E-1: modélisation des interfaces
Cas E-2: interfaces et fissuration du béton

Source: Faggiani, G. (2025). *Static and seismic FEM simulations of Tsankov Kamak concrete arch dam*. ICOLD TC-A Benchmark Workshop, Sofia 2025.



CONTEXTE – CONCLUSION

- Une adaptation des méthodes figurantes dans la version précédente de la partie C3 de la directive était nécessaire. Les raisons en sont les suivantes :
 - D'après SUIhaz2015, l'aléa sismique a généralement augmenté.
 - Un excès de conservatisme dans les méthodes peut conduire à des conclusions erronées en ce qui concerne la nécessité d'une mise en conformité des ouvrages d'accumulation.
 - L'hypothèse d'un comportement non linéaire dans les calculs reflète un comportement qui peut effectivement se produire en cas de séismes extrêmes et doit être pris en compte.



PARAMÈTRES DES MATÉRIAUX

- La détermination des valeurs des paramètres des matériaux doit être basée sur les détails donnés dans la **partie C1, paragraphe 4.6.3** de la directive.

Les valeurs doivent être estimées avec prudence: si la valeur caractéristique du module d'élasticité du béton entraîne une réponse sismique plus faible, la valeur moyenne devrait être prise en compte. **(paragraphe 5.1.1)**

4.6.3. Détermination des caractéristiques des matériaux

Les paramètres nécessaires des matériaux doivent en général être déterminés grâce à des essais représentatifs en laboratoire et sur le terrain. Le fractile de 5% est à retenir pour les valeurs de résistance¹¹. Les résultats d'essais réalisés pendant la construction peuvent être utilisés pour les ouvrages existants. Il faut en tous les cas rester prudent quant au choix des paramètres du fait des incertitudes associées à la détermination des caractéristiques des matériaux.

Les paramètres des matériaux peuvent également être calculés à partir d'analyses de mesures de comportement de l'ouvrage, s'il peut être démontré que le calcul inverse (rétro-analyse) est apte à déterminer les paramètres nécessaires.

La résistance du béton à la compression statique uniaxiale f_{cs} (détermination par essai sur cylindre dont la taille est à déterminer en fonction de la granulométrie du béton) et à la traction statique f_{ts} (détermination par essai brésilien sur cylindre dont la taille est également à déterminer en fonction de la granulométrie du béton) sont à déterminer pour un âge du béton représentatif de l'instant d'apparition de l'action réelle ou hypothétique pour laquelle la vérification est effectuée, ou de manière conservatrice.

Pour les ouvrages d'accumulation des **classes I et II**, la résistance à la traction du béton doit être déterminée sur la base d'essais à la traction. En l'absence de tels essais, une résistance nulle est à introduire dans les analyses et vérifications.

Pour les ouvrages d'accumulation de la **classe III**, la résistance à la traction statique du béton f_{ts} (en MPa) peut être évaluée en fonction de la résistance à la compression statique f_{cs} (en MPa) sur la base de la relation [Arioglu et al. 2006] :

$$f_{ts} = 3 / 8 \cdot f_{cs}^{2/3}, \text{ au maximum } 3 \text{ MPa}$$

Pour les ouvrages d'accumulation existants de la **classe III**, les paramètres des matériaux peuvent être issus de la littérature ou de données de constructions comparables. Si les valeurs de résistance sont estimées ainsi, elles doivent être réduites d'un facteur de 1,2 (y compris angle de frottement), la cohésion devant, elle, être réduite d'un facteur de 2,0. Les facteurs partiels de résistance selon le chapitre 4.6.5 s'ajoutent à cette réduction.



PARAMÈTRES DES MATÉRIAUX

- En règle générale, les paramètres nécessaires des matériaux pour le barrage et la fondation doivent **être déterminés au moyen d'essais en laboratoire et sur le terrain.**
- Afin déterminer les paramètres des matériaux, il faut opter pour des essais qui sont représentatifs du cas de charge sismique.
- Pour tenir compte des incertitudes dans les paramètres des matériaux, **des analyses de sensibilité** doivent être effectuées. **(paragraphe 5.1.2)**



PARAMÈTRES DES MATÉRIAUX

- Poids volumique:
doit être déterminé au moyen de mesures ou une valeur prudente doit être prise en compte. **(paragraphe 5.2.1)**
- Valeurs de résistance dynamique du béton:
peuvent être évaluées de manière empirique en augmentant de 30% les valeurs statiques correspondantes. **(paragraphe 5.2.2)**
- Module d'élasticité dynamique du béton:
peut être évalué en augmentant de 25% le module statique. **(paragraphe 5.2.2)**
- **Degré d'amortissement:**
un degré d'amortissement visqueux de **5%** de l'amortissement critique peut être utilisé. Si des valeurs plus élevées sont utilisées, elles doivent être justifiées. **(paragraphe 5.2.5)**
- **Résistance au cisaillement** de l'interface béton-rocher ou à l'interface entre deux reprises de bétonnage: il convient d'utiliser la résistance au cisaillement **résiduelle**. **(paragraphe 5.2.7)**



MÉTHODOLOGIE

- Le calibrage des paramètres des matériaux doit être effectué au début de l'évaluation de la sécurité sismique.
- Les discontinuités observées et les endommagements préexistants doivent être pris en compte dans le modèle.
- Si l'évaluation montre que la sécurité sismique n'est pas garantie pour l'état actuel du barrage et le mode d'exploitation du bassin de retenue, des mesures doivent être proposées pour assurer la sécurité sismique.



MÉTHODOLOGIE – DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE

- Le **modèle** doit prendre en compte la **fondation**, le **barrage** et la **retenue**, ainsi que les charges et actions applicables.
- Les combinaisons de charges à considérer doivent être conformes au **paragraphe 4.3** de la directive **partie C1**.
- Le **modèle** doit permettre de **simuler correctement** les **actions sismiques**. (**paragraphe 6.2.1**)
- Des modèles constitutifs appropriés doivent être utilisés pour la fondation. En cas d'incertitudes, des analyses de sensibilité avec des limites inférieures et supérieures des propriétés des matériaux doivent être considérées. (**paragraphe 6.2.3**)
- Pour un barrage existant, le modèle structurel peut être calibré sur des données fiables obtenues à partir d'une surveillance régulière et/ou sismique et/ou de mesures *in situ*. (**paragraphe 6.2.5**)



MÉTHODOLOGIE – ANALYSES À CONDUIRE

- L'analyse doit porter sur le comportement de l'ouvrage d'accumulation **pendant** le tremblement de terre, **ainsi que** dans la **période qui suit** le tremblement de terre. **(paragraphe 6.3.1)**
- Pour l'évaluation de la **sécurité** des structures **après le séisme**, on doit tenir compte de:
 - des déplacements permanents,
 - des endommagements,
 - des nouvelles conditions de sous-pression, et
 - d'autres effets potentiels.
causés par le séisme. **(paragraphe 6.3.3)**
- La **procédure d'analyse** doit être choisie en fonction de la **classe** de l'ouvrage d'accumulation. La plausibilité des résultats obtenus peut être vérifiée à l'aide de méthodes moins complexes. **(paragraphe 6.3.4)**



MÉTHODOLOGIE – ANALYSES À CONDUIRE

- **Les exigences minimales requises pour les barrages-poids en béton et en maçonnerie, les barrages à contreforts et les barrages mobiles (paragraphe 6.3.4.1):**
- Pour les ouvrages d'accumulation de **classe III**: analyse modale avec spectre de réponse simplifiée utilisant uniquement le **mode naturel fondamental** de vibration;
- Pour les ouvrages d'accumulation de **classe II**: **analyse modale avec spectre de réponse**; et
- Pour les ouvrages d'accumulation de **classe I**: **analyse dynamique avec évolution temporelle.**
- **Les exigences minimales requises pour les barrages-voûtes (paragraphe 6.3.4.2):**
- Pour les ouvrages d'accumulation de **classe III**: **analyse modale avec spectre de réponse**;
- Pour les ouvrages d'accumulation de **classe II**: **analyse modale avec spectre de réponse**; et
- Pour les ouvrages d'accumulation de **classe I**: **analyse dynamique avec évolution temporelle.**
- **Pour les cas d'analyse dynamique avec évolution temporelle, la vérification de la sécurité sismique doit être satisfaite pour toutes les traces temporelles de l'accélération sélectionnées.**



MÉTHODOLOGIE

BARRAGES-POIDS, BARRAGES À CONTREFORTS ET BARRAGES MOBILES

- **Modèle géométrique (paragraphe 6.6.1.2, 6.6.1.3, 6.6.1.4):**
 - Barrages-poids: modèle 2D (ou 3D, p.ex. en cas d'une vallée étroite, etc.)
 - Barrages à contreforts: modèle 3D
 - Barrages-mobiles: modèle 3D (au moins un pilier et la moitié des passes adj.).
- **Composante de la sollicitation à prendre en compte (paragraphe 6.6.2)**
 - Classes I et II: composantes horizontales et composante verticale
 - Classe III: la composante verticale peut être négligée.



MÉTHODOLOGIE

BARRAGES-POIDS, BARRAGES À CONTREFORTS ET BARRAGES MOBILES

- **Modes de rupture** possibles à investiguer:
 - contraintes excessives
 - => fissuration/cisaillement
 - => sous-pressions accrues
 - => **formation d'un bloc détaché**
 - => perte de stabilité au glissement / au renversement / au soulèvement
 - => perte de stabilité en flexion des piliers d'évacuateur de crue à vannes au sommet
 - d'autres modes de rupture
- **Cas de référence** à analyser avant de procéder à des modèles plus complexes:
 - comportement élastique-linéaire est supposé pour le système barrage-fondation;
 - la fondation est supposée sans masse.



MÉTHODOLOGIE

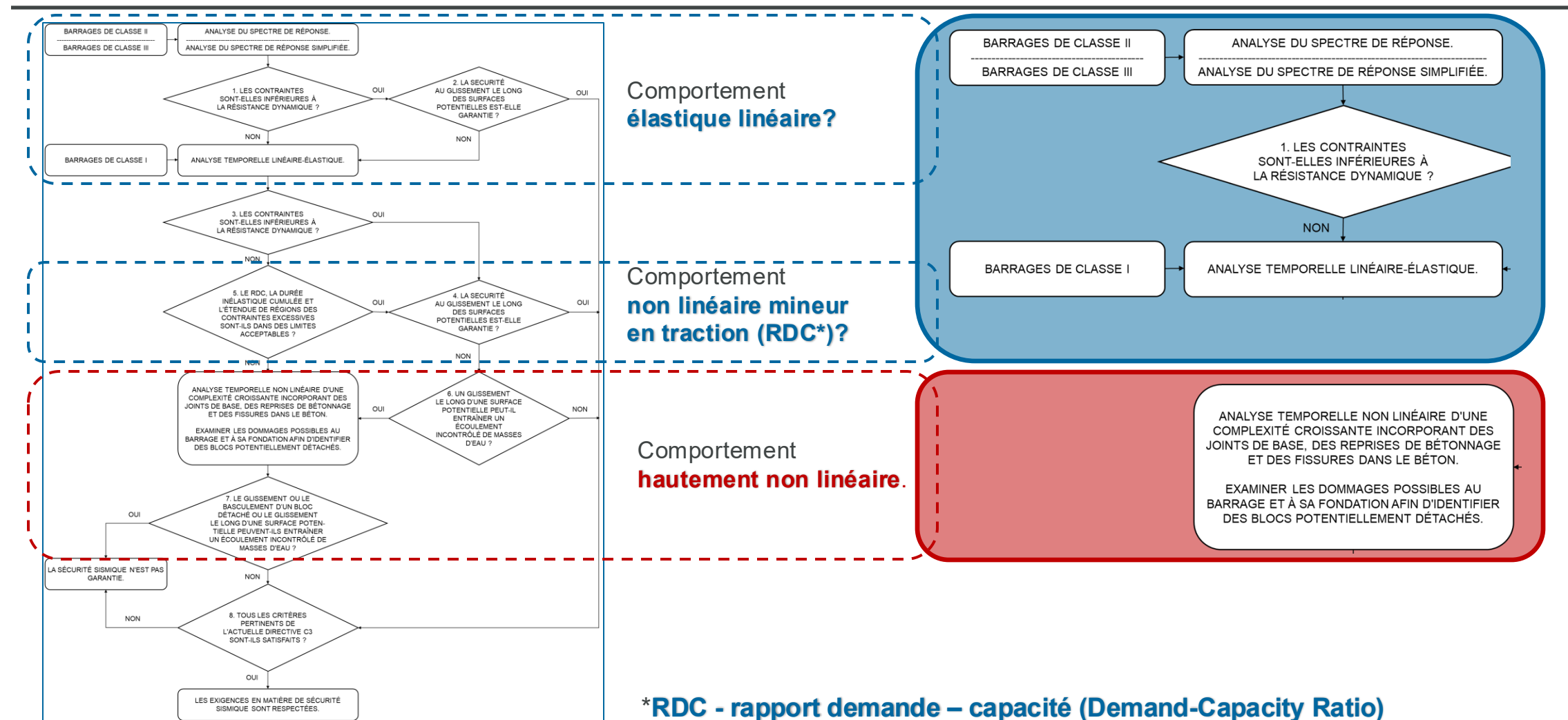
BARRAGES-POIDS, BARRAGES À CONTREFORTS ET BARRAGES MOBILES

- Vérification de la sécurité sismique (paragraphe 6.6.3)
 - **Évaluation** des **contraintes** et des déformations
Si nécessaire, la **complexité** de l'analyse **peut augmenter progressivement** en considérant d'abord un comportement
 - **élastique linéaire**, puis
 - **non linéaire mineur en traction**, et enfin
 - **hautement non linéaire**.
 - **Évaluation** de la **sécurité** (en utilisant les résultats de l'analyse des contraintes)
 - au **glissement**
 - au **renversement**
 - au **soulèvement**



MÉTHODOLOGIE – LOGIGRAMME DE VÉRIFICATION DE LA SÉCURITÉ SISMIQUE

BARRAGES-POIDS, BARRAGES À CONTREFORTS ET BARRAGES MOBILES





MÉTHODOLOGIE

BARRAGES-VOÛTES

- **Modèle géométrique (paragraphe 6.7.1.1, 6.7.1.3)**
 - Barrages-voûtes de toutes les classes: modèle 3D.
 - Barrages-voûtes de toutes les classes: le modèle doit inclure explicitement la fondation.
- **Composantes de la sollicitation sismique à prendre en compte (paragraphe 6.7.2.1)**
 - Barrages-voûtes de toutes les classes: deux composantes horizontales orthogonales et une composante verticale
 - Dans le cas d'une analyse temporelle: la combinaison des composantes horizontales doit être choisie de manière à produire les résultats les plus conservateurs.



MÉTHODOLOGIE

BARRAGES-VOÛTES

- **Modes de rupture** possibles à investiguer :
 - contraintes excessives
 - => fissuration/cisaillement
 - => ouvertures excessives des joints de plots
 - => **formation des blocs détachés**
 - => perte de stabilité au glissement / au renversement
 - => augmentation des sous-pressions des coins des appuis
 - => perte de stabilité au glissement des coins des appuis
 - => perte de stabilité en flexion des piliers d'évacuateur de crue à vannes au sommet
 - **d'autres modes de rupture**
- **Cas de référence** à analyser avant de procéder à des modèles plus complexes:
 - comportement élastique-linéaire est supposé pour le système barrage-fondation;
 - la fondation est supposée sans masse.



MÉTHODOLOGIE

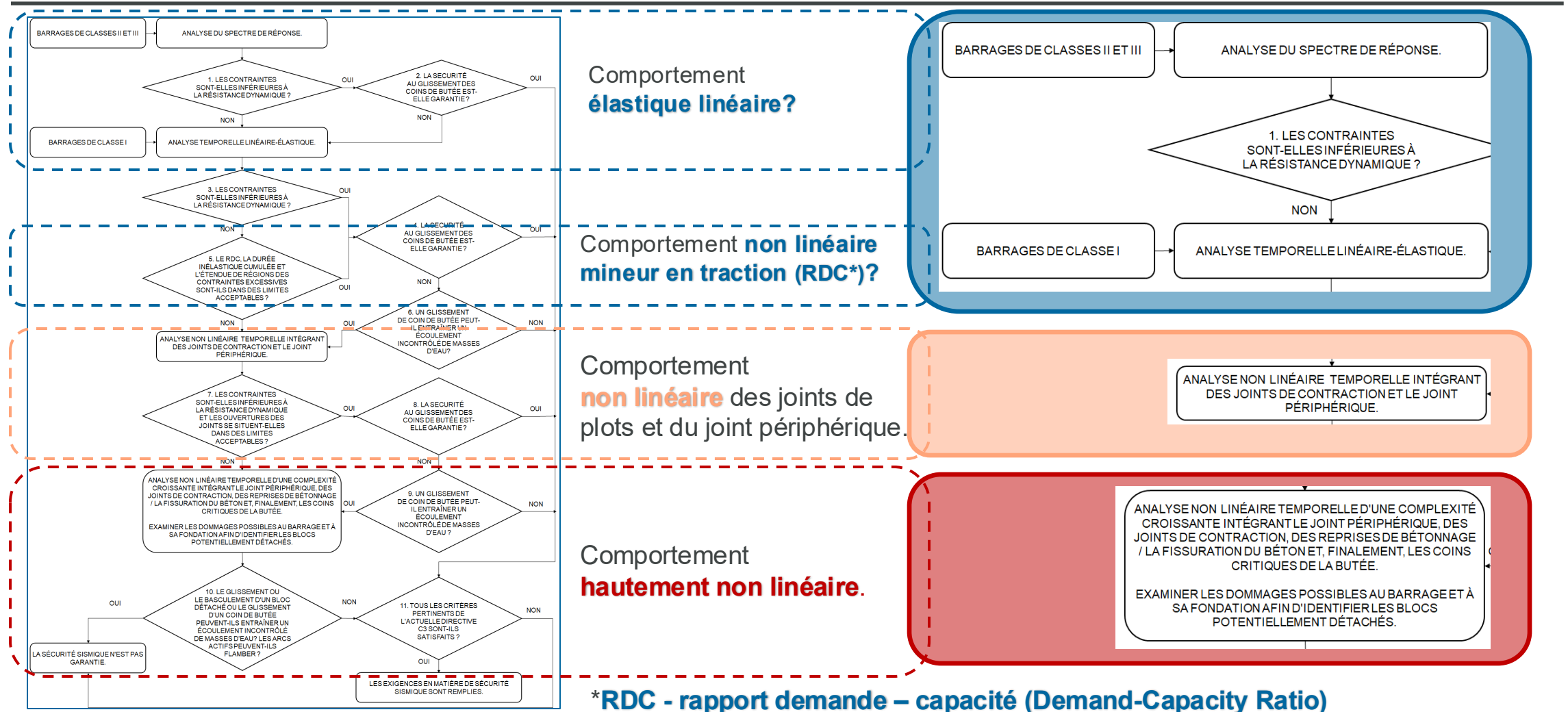
BARRAGES-VOÛTES

- **Vérification de la sécurité sismique (paragraphe 6.7.3)**
 - **Évaluation** des **contraintes** et des déformations
Si nécessaire, la **complexité** de l'analyse **peut augmenter progressivement** en considérant d'abord un comportement
 - **élastique linéaire**, puis
 - **non linéaire mineur en traction**, puis
 - **non linéaire dû aux déplacements relatifs des joints de plots**, et enfin
 - **hautement non linéaire**.
 - **Évaluation** de la **sécurité** (en utilisant les résultats de l'analyse des contraintes)
 - **au glissement des coins rocheux des appuis**,
 - au flambage post-sismique des arcs actifs (dans le cas des endommagements),
 - au glissement de l'ensemble du barrage (dans le cas d'une large vallée).



MÉTHODOLOGIE – LOGIGRAMME DE VÉRIFICATION DE LA SÉCURITÉ SISMIQUE

BARRAGES-VOÛTES





MANUELS D'INGÉNIEUR

BARRAGES-POIDS; BARRAGES-VOÛTES

- Objectifs:
 - Modèles constitutifs; détermination des valeurs des paramètres des matériaux.
 - Méthodes d'analyse élastiques-linéaires.
 - Méthodes d'analyse non-linéaires.
 - Exemples de vérification de la sécurité au séisme d'après la directive partie C3:
 - Barrages-poids
 - Barrages-voûtes



MERCI POUR VOTRE ATTENTION !



Anton Tzenkov
Spécialiste de la surveillance des barrages

DETEC OFEN TS

anton.tzenkov@bfe.admin.ch

energieplus.com