

Auteur : DORADOUX Alexandre – BRL Ingénierie

# Stabilité de l'écluse de Gamsheim : Eurocodes vs CFBR

## Résumé :

### Stabilité de l'écluse de Gamsheim : Eurocodes vs CFBR

Voies Navigables de France (VNF) a en charge l'entretien, l'exploitation et la maintenance du réseau fluvial navigable. Dans ce cadre, VNF s'est engagé depuis plusieurs années dans une politique de restauration visant à fiabiliser le réseau pour garantir les niveaux de service et envisager la modernisation complète de certains de ses ouvrages.

La remise en état des écluses de Gamsheim situées sur le Rhin s'inscrit donc dans cette politique de rénovation. Les deux écluses présentent une longueur utile de 270m. Les sas offrent une largeur de 24m et les bajoyers ont une hauteur de 21.05m. Ces derniers sont composés d'un empilement de blocs béton.

L'un des objectifs des travaux est de remplacer les drains actuellement bouchés par de nouveaux drains posés à l'air libre dans une tranchée réalisée sous blindage. En phase conception, il a été envisagé une technique de terrassement et remplacement en lieu et place. De ce fait, le bajoyer de rive sera "allégé" du fait du terrassement partiel à l'arrière de l'ouvrage combiné à une alternance de sas plein et de sas vide compte tenu du maintien de la navigation durant cette opération. L'étude a consisté à vérifier la stabilité de cet ouvrage dans ces conditions très spécifiques.

Mais alors, quelle norme dois-je appliquer pour justifier cette stabilité externe ? En première approche, l'ouvrage s'apparentant à un ouvrage de soutènement, l'utilisation de l'Eurocode 7 et plus précisément la norme NF P 94-281 semble la plus appropriée. Néanmoins, à y regarder de plus près et après réflexions, ne pourrait-on pas aussi envisager l'ouvrage comme un barrage dans cette configuration ? Le bajoyer étant un ouvrage massif poids retenant de l'eau d'un côté, la question peut en effet se poser. L'utilisation des « Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids » rédigées par le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) semble tout aussi indiqué.

Mes nombreuses expériences en calculs d'ouvrages de soutènement d'une part et de barrages d'autre part m'ont déjà conduit à utiliser ces deux méthodes de dimensionnement mais jamais sur un même ouvrage. Cette interrogation allant nécessairement se représenter pour de futurs projets, l'occasion était à saisir ! Le projet des écluses de Gamsheim a donc été à l'initiative d'une étude comparative entre ces deux philosophies de calculs. En tant qu'ingénieur, il serait dommage de ne pas tirer profit des bonnes pratiques de chacune d'entre elles. A la fois si proches mais subtilement différentes, ne seraient-elles pas en réalité complémentaires ? L'article s'attachera donc à présenter ces deux approches, à analyser leurs résultats respectifs et à en dégager des premières tendances.

**Mots clés :** Ecluse, stabilité, bajoyer, normes

## 1. Introduction et enjeux

Du fait du nombre croissant d'utilisateurs du réseau fluvial sur le territoire ainsi que des impacts sociaux-économiques importants pouvant résulter d'une fermeture de ce dernier, les périodes de chômages sont réglementées et leurs durées parfois insuffisantes pour réaliser l'ensemble des travaux de réhabilitation lors de la mise à sec de l'écluse.

BRL Ingénierie est régulièrement confronté à ces problématiques qui sont désormais inhérentes aux projets de rénovation d'ouvrages fluviaux. Les travaux de réhabilitation (reprise de l'étanchéité des joints interplots, du réseau de drainage, traitement de la pollution des terre-pleins,...) conduisent souvent à décaisser tout ou partie des remblais situés à l'arrière des bajoyers d'écluse. Il en découle des situations de projets et des conditions spécifiques d'exploitation qui n'avaient pas été imaginées et prises en compte lors des dimensionnements historiques de ces ouvrages : ouvrage mis à nu sans terrain en place à l'arrière, avec un sas plein ou vide.

Dans ces configurations, les bajoyers travaillent en sens inverse de celui pour lequel ils étaient initialement prévus et leur stabilité d'ensemble peut être engagée. Cet article vise à apporter un éclairage, à l'appui de mon expérience personnel, sur le contexte normatif à utiliser et sur les principales différences qui en découlent en termes de résultats.

## 2. La stabilité des bajoyers de l'écluse de Gamsheim : confrontation des approches de calculs

Le site de Gamsheim est constitué de deux écluses parallèles. Dans leur partie courante, les bajoyers de ces ouvrages en béton sont composés d'un empilement successif de blocs pleins de largeurs variables. Le projet de réhabilitation prévoit le changement du réseau de drainage en arrière des bajoyers de rives via la réalisation d'une paroi blindée nécessitant un terrassement partiel du remblai.

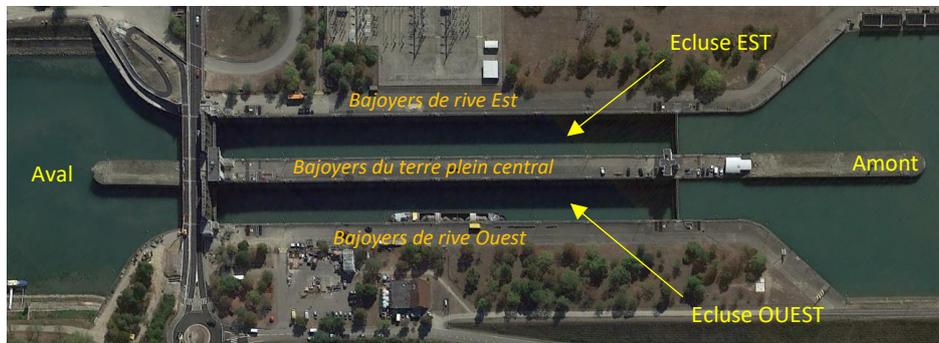


Figure 1: Vue aérienne des écluses de Gamsheim (source: Google Earth)

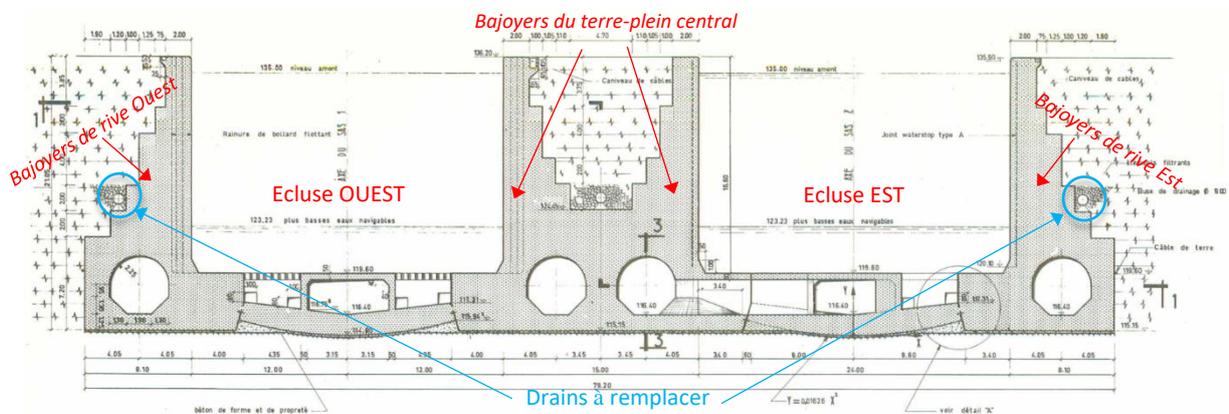


Figure 2: Coupe type des écluses de Gamsheim

## 2.1 Approches théoriques des normes utilisées

Dans l'optique d'étudier la stabilité des bajoyers de l'écluse dans ces conditions très spécifiques et d'aboutir in fine à une étude comparative, j'ai mené le dimensionnement en phase projet selon une double approche normative : tout d'abord suivant les Eurocodes puis ensuite avec les recommandations du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR).

### 2.1.1 Vérifications suivant l'Eurocode 7

En première approche, la stabilité externe est étudiée selon l'Eurocode 7 et plus précisément la norme NF P 94-281 [1]. La stabilité au soulèvement (renversement) des redans est vérifiée par la justification de l'excentrement qui revient à vérifier que :

$$1 - \frac{2 \times e}{B} \geq \frac{1}{15} \quad \text{à l'ELU}$$

$$1 - \frac{2 \times e}{B} \geq \frac{1}{2} \quad \text{à l'ELS}$$

Avec :

- e : excentrement de la composante de charge verticale par rapport au milieu du redan étudié ;
- B : la largeur du redan.

A cette vérification du renversement s'ajoutent également des justifications relatives au glissement et au poinçonnement sous l'élément étudié, mais ces points ne seront pas abordés dans le présent article.

### 2.1.2 Vérifications suivant les recommandations du CFBR

Le CFBR recommande [2] de mener les vérifications suivantes :

- Vérification de l'état limite d'extension des fissures ;
- Vérification de l'état limite de résistance à l'effort tranchant ;
- Vérification de l'état limite de résistance à la compression.

Tout comme pour les vérifications Eurocodes, il a été fait le choix de ne présenter dans la suite de l'article uniquement que la vérification relative à l'extension des fissures.

La condition de non fissuration s'écrit :

$$\sigma'_N(x) = - \frac{f_{tk}}{\gamma_{mft}}$$

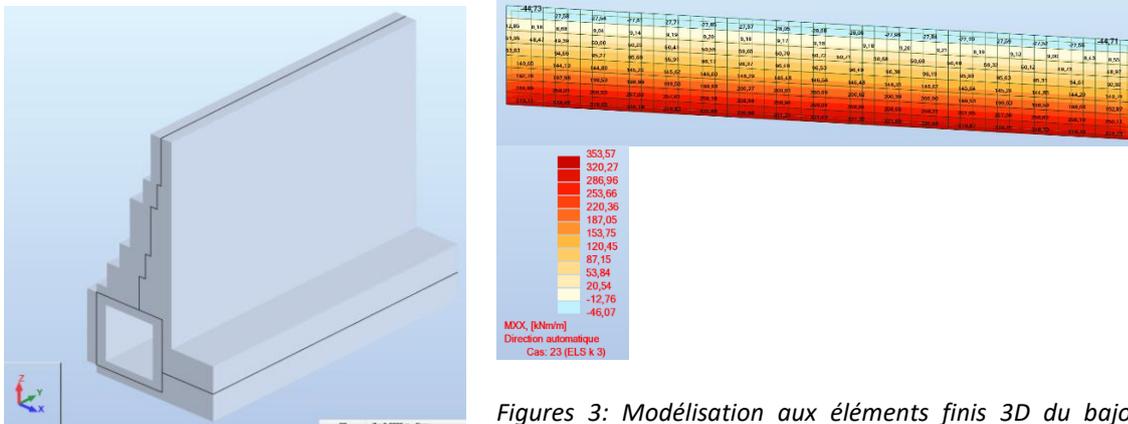
Où :

- $f_{tk}$  est la valeur caractéristique de la résistance à la traction du matériau examiné (en pratique, la valeur dimensionnante est celle au droit des joints de reprises) ;
- $\gamma_{mft}$  est le coefficient partiel venant affecter la valeur caractéristique de la résistance à la traction du matériau et dépendant de la combinaison d'action examinée.

Les conditions d'état-limite à examiner pour l'état-limite d'extension des fissures s'expriment à partir de la longueur d'ouverture de la fissure, obtenue par un calcul itératif dans lequel on considère que la pleine sous-pression s'introduit dans la partie fissurée de la section.

Pour le cas des redans, on retient qu'en combinaison rare, il est admis une ouverture maximum de 25% de la largeur totale du redan.

Il est à noter que les vérifications de stabilité externe suivant l'EC7 m'ont conduit à mener manuellement les calculs en réalisant pour chaque redan un bilan des forces qui s'y appliquent. En parallèle, pour les vérifications suivant le CFBR, une modélisation aux éléments finis sur le logiciel Autodesk Robot Structural Analysis© m'a permis de tirer les contraintes normales et tangentielles nécessaires aux calculs.



Figures 3: Modélisation aux éléments finis 3D du bajoyer de l'écluse de Gambenheim (à gauche) et cartographie de moment de flexion du redan n°3 (en haut, en kN.m/m)

## 2.2 Premières comparaisons et constations : similitudes et différences

Avant même l'analyse des résultats, arrêtons-nous sur les principaux points qui me sont apparus dès les premières étapes, lors de la mise en application de ces deux approches.

### 2.2.1 Vision et orientation générales des deux approches

En prenant le recul suffisant, et faisant fi de la sémantique particulière employée par chacune des deux approches, il m'est apparu très rapidement que les vérifications à mener sont très proches, pour ne pas dire équivalentes, tant les phénomènes qu'elles cherchent à appréhender et à justifier sont de mêmes natures. Cette concordance flagrante et évidente, bien qu'elle ne constitue en rien une réelle justification permettant d'utiliser une méthode au dépend d'une autre, n'en demeure pas moins une première piste qui pourrait laisser envisager une utilisation croisée des bonnes pratiques inhérentes à chacune de ces deux approches.

Vérifications Eurocodes	Phénomènes observés	Vérifications CFBR
Vérification de l'excentrement	Renversement	Vérification de l'extension des fissures
Vérification du glissement	Translation	Vérification de la résistance à l'effort tranchant
Vérification du poinçonnement	Portance du support	Vérification de la résistance à la compression

Tableau 1: Similitudes des vérifications à mener pour l'Eurocode et le CFBR

### 2.2.2 Niveaux d'eau et combinaisons d'action à prendre en compte

Lors de la mise en application de ces deux approches, j'ai été rapidement confronté au choix des niveaux d'eau à retenir pour chaque état limite. Les Eurocodes et le CFBR traitant de typologies d'ouvrage distincts, les niveaux caractéristiques et les dénominations associées diffèrent : quand les Eurocodes évoquent les états limites caractéristique (ELS) et ultimes (ELU), le CFBR abordent dans le même temps des états limites quasi-permanent et rares, associés en grande partie au niveau du plan

d'eau à l'amont du barrage (retenue normale, retenue au Plus Hautes Eaux,...). Ces dernières dénominations d'état limite pouvant même porter à confusion et désorienter l'utilisateur lorsque l'on sait que ces « adjectifs » ont pu être employés par le passé dans le BAEL [3].

Afin de s'affranchir au maximum, une nouvelle fois, de ces différences d'appellation, j'ai en grande partie orienté l'étude sur la définition de plusieurs hauteurs d'eau (niveau de nappe) dans le terre-plein :

- Une nappe à +126.15 m NGF pour les vérifications ELS de l'Eurocode ;
- Une nappe à +127.00 m NGF pour les vérifications ELU de l'Eurocode et combinaisons rares du CFBR.

### 2.2.3 Approche pragmatique

La mise en œuvre simultanée de ces deux méthodes m'a également permis de mettre en exergue une dernière différence notable. Du fait sans doute de son caractère normatif et européen, et malgré la rédaction de fascicules et d'annexes d'application nationale, les vérifications explicitées dans les Eurocodes ont souvent été perçues comme très génériques, laissant parfois l'ingénieur quelque peu démuni face à sa bonne compréhension et mise en application concrète. Profitant d'un domaine d'application plus restreint, les recommandations éditées par le CFBR ont l'avantage d'apporter une vision plus pragmatique sur les hypothèses de calculs. Le choix de certaines valeurs caractéristiques basé sur l'état connu de l'ouvrage et la détermination itérative de la sous-pression à retenir en sont de parfaites illustrations.

A titre d'exemple, le CFBR définit les valeurs caractéristiques de résistance à la traction des joints de reprise de la manière suivante :

- Pour les reprises traitées :  $f_{t\text{-joint},k} = \frac{1}{2} f_{tk\text{-béton}}$  ;
- Pour les reprises non traitées :  $f_{t\text{-joint},k} = (0 \text{ à } 1/3) f_{tk\text{-béton}}$  ;
- Après fissuration :  $f_{t\text{-joint},k} = 0$ .

### 2.3 Résultats des deux approches

Les résultats obtenus pour les différentes vérifications évoquées précédemment sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Vérification excentrement ELU EUROCODES	Valeur admissible	CAS 3 : Nappe à +127 NN + SAS VIDE		CAS 4: Nappe à +127 NN + SAS PLEIN	
		1-2e/B	$\Gamma$	1-2e/B	$\Gamma$
Elément 1 (= bloc supérieur)	0,0667	1,035	15,525	0,715	10,725
Elément 2	0,0667	0,699	10,485	0,676	10,14
Elément 3	0,0667	0,641	9,615	0,45	6,75
Elément 4	0,0667	0,491	7,365	0,553	8,295
Elément 5	0,0667	0,277	4,155	0,724	10,86
Elément 6 (= bloc inférieur)	0,0667	0,181	2,715	0,845	12,675

$$\Gamma = \frac{1 - \frac{2e}{B}}{\frac{1}{15}}$$

Vérification excentrement ELS EUROCODES	Valeur admissible	CAS 1: Nappe à +126,15 NN + SAS VIDE		CAS 2: Nappe à +126,15 NN + SAS PLEIN	
		1-2e/B	$\Gamma$	1-2e/B	$\Gamma$
Elément 1 (= bloc supérieur)	0,5000	1,31	2,62	0,715	1,43
Elément 2	0,5000	1,062	2,124	0,676	1,352
Elément 3	0,5000	0,857	1,714	0,518	1,036
Elément 4	0,5000	0,764	1,528	0,594	1,188
Elément 5	0,5000	0,614	1,228	0,732	1,464
Elément 6 (= bloc inférieur)	0,5000	0,503	1,006	0,827	1,654

$$\Gamma = \frac{1 - \frac{2e}{B}}{\frac{1}{2}}$$

Etat limite d'extension des fissures CFBR	Valeur admissible	CAS 3 : Nappe à +127 NN + SAS VIDE		CAS 4: Nappe à +127 NN + SAS PLEIN	
		% calculé	$\Gamma$	% calculé	$\Gamma$
Elément 1 (= bloc supérieur)	25,00	0	>>>1	0	>>>1
Elément 2	25,00	0	>>>1	0	>>>1
Elément 3	25,00	10,23	2,44	8,19	3,05
Elément 4	25,00	20,22	1,24	0	>>>1
Elément 5	25,00	8,79	2,84	0	>>>1
Elément 6 (= bloc inférieur)	Vérification particulière menée par ailleurs ( <i>hors article</i> )				

$$\Gamma = \frac{25\%}{\% \text{ calculé}}$$

Tableaux 2: Résultats de la stabilité externe EC7 et CFBR (vérification du renversement / extension de fissures)

Dans le cadre des écluses de Gamsheim, et quel que soit le contexte normatif employé, il ressort qu'en présence de nappe fluviale, le cas {Terrassement partiel + sas vide} est toujours plus instable que le cas {Terrassement partiel + sas plein}. L'analyse croisée de ces différentes vérifications met également en évidence que la vérification d'excentrement à l'ELS de l'EC7 est la condition limite la plus rapidement atteinte

### 3. Conclusion et perspectives

Il est essentiel en phase de conception d'étudier tous les scénarii possibles et de s'assurer de la faisabilité technique du projet sous ses contraintes d'exploitation particulières. A la lumière des éléments présentés dans cet article, une comparaison directe entre la méthode Eurocodes et CFBR n'est pas évidente du fait que:

- Les deux méthodes nécessitent des combinaisons d'états limites différentes (bien que toutefois très similaires) ;
- Les résultats CFBR dépendent du choix des valeurs à retenir pour les coefficients partiels et des caractéristiques intrinsèques des interfaces entre blocs ;
- Les conditions limites recherchées sont différentes et plus ou moins drastiques suivant la méthode retenue ;
- La méthode CFBR, bien que très précise (calcul itératif, profil de sous pression plus réaliste,...), reste très orientée ouvrage de type barrage et l'application aux écluses n'est pas clairement spécifiée.

Quoiqu'il en soit, les philosophies générales de calculs demeurent proches et ces deux méthodologies peuvent être croisées afin de s'approcher au plus juste des phénomènes physiques réels qui s'observent sur ces ouvrages anciens à réhabiliter.

L'étude comparative entre ces deux philosophies de calculs n'a été menée uniquement que sur le projet des écluses de Gamsheim, ne permettant pas, pour l'heure, de tirer de conclusions générales. Néanmoins, en tant qu'ingénieur, et tout en restant dans le cadre réglementaire des Eurocodes usuellement reconnu par la profession comme applicables pour ce genre d'ouvrage, il me semble opportun de pouvoir tirer profit des bonnes pratiques présentes dans les recommandations du CFBR.

De ce fait, et afin de faire en sorte que les premières conclusions initiées par cette étude contribue à la communauté et au plus grand nombre, il me semble important de poursuivre la démarche en :

- Menant de nouvelles analyses comparatives sur d'autres projets (écluses ou autres infrastructures) ;
- Profitant de la refonte actuellement en cours de ROSA 2000, et à laquelle j'ai été amené à participer, pour actualiser par exemple le fascicule dédié aux écluses en évoquant les différentes approches possibles ;
- Montant éventuellement un groupe de travail dédié à ce sujet et qui regrouperait des membres de différentes organisations (AIPCN, CFBR,...).



**Références bibliographiques :**

[1] NF P 94-281 – Justification des ouvrages géotechniques – Normes d’application nationale de l’Eurocode 7 – Ouvrages de soutènement – Murs

[2] Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids – CFBR – Octobre 2012

[3] Fascicule n°62 – Titre I – Section I : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites – BAEL 91 révisé 99