

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
Département Hydraulique



Mémoire de Fin d'Etudes en Vue de l'Obtention du
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en
Hydraulique
Intitulé

Dimensionnement des hausses fusibles du barrage de Ain ZADA

Etudié par :

I. BENLACHTAR

Dirigé par :

A. BERMAD

PROMOTION : juin 2009

Je dédie ce travail à ma très chère mère, mes frères et à A.BLIKAZ

Remerciements

Mes remerciements s'adressent aux membres du jury qui ont bien voulu juger ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à mon promoteur monsieur A.BERMAD qui a dirigé ce travail.

Un grand merci à M : Mouloudi, DECHMI et BENZIADA pour leurs encouragements

Mes remerciements les plus sincères aux ingénieurs de l'ANBT en particulier monsieur M.HOUGLAOUENE et F. Yahiaoui pour leurs contributions.

Merci à tous nos enseignants pour leurs formations.

Un dernier merci à cette promo 2009 et à tous mes amis.

Résumé :

Il est de plus en plus difficile de satisfaire les besoins en eaux ; suite à l'envasement des barrages, l'accroissement des populations et la raréfaction des nouveaux sites de construction de barrages. Or, une quantité d'eau supplémentaire par la surélévation des barrages existants s'accompagne d'une élévation du niveau des plus hautes eaux.

Pour cela, l'installation des hausses fusibles sur le déversoir d'un barrage constitue une solution intéressante. Car elle permet de stocker une quantité supplémentaire d'eau sans changement du niveau des plus hautes eaux. De plus, elles garantissent une sécurité vis-à-vis des crues.

Mots clés : envasement, hausses fusibles, surélévation, barrage, Ain Zada

Summary:

The satisfaction of the needs in waters comes up against more and more difficulties; following the silting up of the dams, the growth of the populations and the rarefaction of the new sites of construction of dams. However, to mobilize a quantity of supplementary water by the heightening of the existing dams comes with an elevation of the level of the highest waters.

For it, the installation of the fusegates on the spillway of a dam constitutes an interesting solution. Because it permits to stock a supplementary quantity of water without change of the level of the highest waters. Besides, they guarantee a security opposite the rises in the water level.

Key word : Fusegate, dam, Ain Zada, surelevation

ملخص:

بالتالي و السدود توحل مشكلة مع خصوصا ؛ تشغيلية صعوبات عدة يواجه المياه احتياجات لمختلف شاملة تغطية تحقيق مختلف بين الأمثل الحل ويقدم المشكلة هذه يعالج المتواضع العمل هذا و, عمران بني سد في حدث ما وهذا المياه كمية نقص الممكن من يجعل انه, ومثير ملموسا حلا يشكل السد هذا مصب على المنصهرة الروافع استعمال إن.الموجودة التقنية الوسائل الجيدة الإدارة مع للمياه الأعلى الحد مستوى تغيير دون المياه من إضافية كمية تخزين

المفتاحية الكلمات : الطمي, المنصهرة الروافع, سد, عين زادة

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : Généralité	
I. La problématique de l'envasement.....	3
1. La sédimentation des barrages dans le Maghreb.....	3
2. Les conséquences de l'envasement	6
2.1. Obturation des organes de vidange	6
2.2. Sécurité de l'ouvrage	6
2.3. Envasement des canaux d'irrigation.....	6
2.4. Dégradation de la qualité de l'eau	7
2.5. Réduction de la capacité de la retenue.....	7
II. Equipement de surélévation.....	9
1. Equipement d'un seuil libre.....	9
2. Les vannes.....	9
2.1 Les différents types de vannes.....	9
2.1.1. Vannes levantes verticales	9
2.1.2. Vannes segment et secteur	10
2.1.3. Vannes clapet	11
2.2 Avantages et inconvénients.....	12
3. Les seuils gonflables	12
3.1. Principe de fonctionnement.....	12
3.2. Description d'un seuil gonflé à l'eau	13
3.3. Avantages et inconvénients.....	14
Chapitre II : Etude des hausses fusibles	
I. Historique des hausses	15
II. Les hausses fusibles : types, caractéristiques.....	17
1. La hausse	17
2. Le puits d'alimentation.....	23
3. Le lest	26
4. La chambre de mise en pression	26

III.	Description du procédé	28
IV.	Stabilité : critères, calcul.....	30
	1. Calculs de stabilité.....	30
	2. Choix de la sous-pression pour le basculement dans des conditions normales.....	38
	3. Courbes de stabilité caractéristiques	40
	4. Paramètres de réglage.....	42
V.	Sécurité : conditions normales et dégradées.....	44
	1. Sécurité à l'aval.....	44
	2. Risque de chute de hausse sans déversement.....	44
	3. Comparaison des hydrogrammes de crues.....	45
	4. Risque de basculement simultané de plusieurs hausses.....	47
	5. Entraînement de hausses.....	47
VI.	Facteurs extérieurs spécifiques à chaque ouvrage	48
	1. Chocs	48
	2. Vagues	49
	3. Corps flottants.....	50
	4. Séismicité	52
	5. Glace	55
	6. Type de barrage.....	57
	7. Qualité des prévisions de crues.....	57
	8. Conditions topographiques particulières du site.....	58
VII.	Exploitation et entretien	59
	1. Hausses en place sur le seuil.....	59
	2. Hausses ayant basculé.....	59
	3. Variation de la cote et augmentation du volume de la crue.....	60
	4. Protection anticorrosion.....	61
	5. Possibilité de surélévation ultérieure	61
VIII.	Champ d'application.....	62
	1. Barrages anciens.....	62
	2. Barrages nouveaux.....	62
IX.	Méthode de dimensionnement.....	64

1. Performances hydrauliques des hausses fusibles.....	64
2. Augmentation de la capacité d'un barrage existant.....	65
3. Amélioration de la sécurité d'un barrage existant.....	69
4. Amélioration de la performance d'un barrage excréteur.....	70
5. Optimisation de l'évacuateur de crues pour un barrage neuf.....	71

Chapitre III : Pré-dimensionnement des hausses du barrage de Ain Zada

I. Présentation du barrage (AIN ZADA).....	72
1. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES.....	72
2. LE BARRAGE	74
3. EVACUATEUR DE CRUES.....	75
II. Hydrologie.....	76
1. Données hydrométriques	76
2. Rendement de la retenue	76
3. Crues.....	78
4. Protection du talus amont.....	81
III. Synthèse du pré dimensionnement des hausses fusibles au barrage de Ain Zada.....	82
1. Solution hausses fusibles.....	82
2. Spécifications techniques.....	83
3. Etude du laminage des crues.....	84
4. Programme délais.....	85
IV. Dimensionnement des hausses du barrage de AIN ZADA.....	86
1. Dimension de la hausse	86
2. Calculs de stabilité.....	88
3. Impacte du rehaussement sur le volume de la retenue	96
V. Exemples de barrages en Algérie équipés de hausses fusibles	99
Conclusion globale	102
Liste des tables et des figures.....	103
Références bibliographiques.....	106

Introduction

Le phénomène de la sédimentation des barrages dans le Maghreb atteint les valeurs les plus élevées de la planète. Il est la conséquence la plus dramatique de l'érosion des bassins versants. Plus de 95% des sédiments érodés arrivent dans les retenues de barrages.

Les dépôts de vase au fond des barrages dans la région de Maghreb et plus particulièrement en Algérie risquent de connaître une évolution spectaculaire dans les années à venir, suite aux changements climatiques. La région sera caractérisée par un climat beaucoup plus agressif, avec alternance d'années sèches et humides, et des pluies intenses et dévastatrices pour les sols. Les crues deviendront de plus en plus violentes et brutales et seront la cause d'une forte ablation et le taux d'érosion des bassins versant sera beaucoup plus élevé.

Les 250 barrages du Maghreb reçoivent annuellement une quantité de vase évaluée à 130 millions de m^3 (soit une perte de capacité annuelle égale à 1%) répartie respectivement entre l'Algérie, le Maroc et la Tunisie comme suit : 32 millions de m^3 /an, 65 millions de m^3 /an et 30 millions de m^3 /an. Le barrage Mohamed V (Maroc) lui seul reçoit un volume de 14,5 millions de m^3 de vase par année. Le barrage Mellegue (Tunisie) reçoit une quantité de 5,9 millions de m^3 /an. En Algérie, les 52 grands barrages reçoivent 32 millions de m^3 de matériaux solide annuellement.

Face au problème de perte de la capacité de stockage due au phénomène d'envasement du barrage plusieurs solutions existent, cependant leurs faisabilités dépendent de plusieurs paramètres. On peut citer le dragage, qui dépend du volume d'eau disponible, mais cette solution est très peu utilisée à cause du manque d'eau et du coût prohibitif de l'opération ; la seconde solution c'est les hausses qui augmentent le niveau du seuil de l'écoulement et permettent de combler la perte de la capacité de stockage en ne remettant pas en cause la stabilité du barrage.

L'originalité de ce dispositif est liée aux conditions de stabilité et de basculement du fait que les hausses sont des éléments auto stables. Mais aussi à la forme labyrinthe de la crête, qui permet d'allonger la lame déversante ce qui augmente le coefficient de débit.

Dans ce mémoire on présentera les hausses fusibles, leurs fonctionnement leurs types avec les avantages et inconvénients et leurs pré dimensionnement.

CHAPITRE I

GENERALITÉ

I. La problématique de l'envasement

Dans de nombreux pays du monde, le transport des sédiments dans le réseau hydrographique des bassins versants et leur dépôt dans les retenues pose aux exploitants des barrages des problèmes dont la résolution ne peut qu'être onéreuse. Non seulement la capacité utile est progressivement réduite au fur et à mesure que les sédiments se déposent dans la retenue mais encore l'enlèvement de la vase est une opération délicate et difficile, qui bien souvent exige que volume d'eau soit trois fois supérieur à celui de la vase et que la retenue soit hors service, ce qui est pratiquement impossible dans les pays arides et semi-arides. Dans l'un et l'autre cas, il en résulte des dommages considérables à l'environnement et une mise en péril de l'économie du projet. A titre d'exemple, MADDOK (1969), dans un rapport sur la relation de l'aspect économique avec l'envasement, a déduit que les dommages provoqués par l'envasement des retenues aux Etats Unis avaient coûté la somme de 50 millions de dollars en 1948.

1. La sédimentation des barrages dans le Maghreb

Les pays du Maghreb comme l'Algérie, le Maroc et la Tunisie se caractérisent par la rareté des ressources en eau, rejoignant ainsi l'ensemble des pays arides et semi-arides : le potentiel des eaux mobilisées par 250 barrages n'excède pas 22.10^9 m^3 répartis selon le tableau suivant :

Pays	Nombre de barrages	Capacité (10^9 m^3)
Algérie	114	5 2
Maroc	90	14
Tunisie	30	3.5

Tableau (1.1.1) : Capacité totale des barrages des pays du Maghreb.

Or ces pays font partie d'une zone montagneuse (tellienne), caractérisée par un climat agressif avec alternance d'années sèches et humides, et des pluies d'automne intenses et dévastatrices pour les sols, d'autant plus qu'elles surviennent à une période où la couverture végétale est réduite ou inexistante et les sols ameublés par les labours. La conséquence est que d'une part les crues d'automne, violentes et brutales, sont la cause d'une forte ablation, et que d'autre part, le taux d'érosion dans les bassins versants est important. A titre d'exemple, selon les résultats des travaux de B.HEUSCH, sur les bassins versants du Maghreb, le taux d'abrasion est de 800 t/km².an, tandis que celui obtenu par la SOGREAH est encore plus important, puisqu'il est de l'ordre de 1250 t/km².an.

C'est donc une quantité élevée de matériaux solides qui est transportée annuellement par les cours d'eau jusqu'aux réservoirs des barrages. Or ces trois pays se sont dotés d'une infrastructure hydraulique dont dépend, dans une large mesure, leur développement économique, et qui se trouve ainsi menacée par le phénomène de l'envasement. Au moins 130.10⁶ m³ de sédiments se déposent chaque année dans les retenues, entraînant une diminution des disponibilités en eau potable et pour l'irrigation. Au total, l'envasement moyen annuel dans les pays du Maghreb est estimé comme suit.

Pays	Envasement moyen annuel (10* m3 /an)	Taux d'envasement annuel (%)
Maroc	50	0,5
Algérie	32	0,5
Tunisie	30	1,0

Tableau (1.1.2) : Taux d'envasement annuel dans les pays du Maghreb.

Le tableau (1.1.3) permet de se faire une idée sur l'importance de l'envasement qui affecte l'ensemble des retenues des barrages.

Barrages	Pays	Année de mise en eau	Capacité Initiale (10 ⁶ m ³)	Surface du bassin versant (km ²)	Envasement moyen/an (10 ⁶ m ³ /an)
Al Massira	Maroc	1979	2724	28500	9
Bin el ouidane	Maroc	1953	1484	6400	3,3
Idriss lies	Maroc	1973	1217	3680	2
El Makhabine	Maroc	1979	789	1820	1,8
Mohamed V	Maroc	1967	725	49920	14,5
M.Eddahbi	Maroc	1972	567	15000	4,7
Sidi Salem	Tunisie	1981	555	17730	5,62
S.M.Ben Abd	Maroc	1974	493	9800	2,5
Hassan Eddak	Maroc	1971	369	4400	1,75
Djorf Eltorba	Algérie	1934	350	22000	1,30
El Kansera	Maroc	1935	330	4540	1,4
Y.B.Tachfine	Maroc	1973	310	3784	1,1
Ghrib	Algérie	1939	280	23300	3,20
Mellegue	Tunisie	1954	268	10300	5,94
S.M.B.A	Alcériç	1978	235	4890	1
Oued El Fodda	Algérie	1932	228	-	2,66
Abdelmoumen	Maroc	1981	216,3	1300	0,2
Moulay youcef	Maroc	1970	198	1441	1,4
Lacheffia	Algérie	1965	175,68	575	0,17
Ighil Emda	Algérie	1953	154,8	652	1,60
Zeroud Saad	Tunisie	1982	131	8650	1,163
Nebhana	Tunisie	1965	86,4	855	1,64
Kasseb	Tunisie	-	81,9	101	0,43
Bouhanifia	Algérie	1944	73	7000	0,78
Beni Bahdels	Algérie	1940	63	1016	0,20
Bir M'cherga	Tunisie	1971	53	1398	0,3875
Bakhada	Algérie	1936	37,6	1300	0,27
Foum El Gherza	Algérie	1950	47	1280	0,80
Ibn Batouta	Maroc	1977	43,6	178	0,49
M.Krim elKhatt	Maroc	1081	43	780	2,7
Talle Takekoust	Maroc	1953	34,4	1707	1
Zardezas	Algérie	1936	14,9	345	0,25
Hamiz II	Algérie	1935	21	139	0,35
Mefrouch	Algérie	1936	16	90	0,12
Nakhla	Maroc	1961	13	107	0,12
K'sob	Algérie	1940	11,6	1310	0,30
Lakhmess	Tunisie	1966	8	131	0,037
Chiba	Tunisie	1963	7,86	64	0,255
Masri	Tunisie	1968	6,82	40	0,2
Bezirk	Tunisie	1960	6,46	73,84	0,164
Foum El Gueiss	Algérie	1939	3	156	0,03

Tableau (1.1.3) : Envasement moyen annuel des barrages du Maghreb.

2. Les conséquences de l'envasement

Parmi les problèmes que pose l'envasement des retenues de barrages, on peut retenir quatre inconvénients majeurs qui sont :

- l'obturation des organes de vidange
- la sécurité de l'ouvrage
- l'envasement des canaux d'irrigation
- la dégradation de la qualité de l'eau
- la réduction de la capacité

2.1. Obturation des organes de vidange

Un autre danger présenté par l'envasement est celui du non fonctionnement des organes de vidange de fond. Le cas du barrage de OUED EL FODDA (Chlef) peut servir d'exemple : en effet, la vanne de fond a été bloquée depuis 1948 et elle se trouve maintenant sous plus de 40 mètres de vase ; toute opération de vidange de la retenue est de ce fait impossible.

2.2. Sécurité de l'ouvrage

L'envasement pose un problème de la stabilité de l'ouvrage : on sait que pour une variation linéaire de la hauteur de la vase, la poussée progresse au carré de la hauteur. La densité de la vase peut atteindre 1,6. A titre d'exemple, pour le barrage des ZARDEZAS, les services concernés ont diminué le volume de l'eau claire de $9. 10^6 \text{ m}^3$ en 1990 uniquement pour assurer la sécurité de l'ouvrage : bien évidemment, cela s'est fait au détriment de l'approvisionnement de la population de la ville de Skikda et du périmètre du Saf-saf. Le volume régularisé qui était de $20. 10^6 \text{ m}^3$ s'est trouvé réduit à environ $10. 10^6 \text{ m}^3$.

2.3. Evasement des canaux d'irrigation

Le dépôt des sédiments dans une retenue de barrage destinée à l'irrigation, pose le problème de comblement du réseau (des canaux) d'irrigation se trouvant à l'aval du barrage, en effet dans les pays arides et semi-arides, l'irrigation se fait généralement par de l'eau chargée en sédiments, c'est ainsi que ces particules fines vont se déposer dans les canaux

réduisant leurs sections mouillées et bien sur le débit d'eau véhiculée. Le curage et le nettoyage des canaux deviennent une opération quotidienne.

2.4. Dégradation de la qualité de l'eau

Les sédiments véhiculent des produits chimiques (nitrates, sulfates...,) provenant en particulier des apports en éléments fertilisants pour les cultures, et se déposant dans les réservoirs, entraînant ainsi une dégradation de la qualité de l'eau et favorisant l'eutrophisation de ces réservoirs.

2.5. Réduction de la capacité de la retenue

Cette réduction de la capacité de stockage de l'eau est sans aucun doute la conséquence la plus dramatique de l'envasement : chaque année le fond vaseux évolue et se consolide avec occupation d'un volume considérable de la retenue.

La quantité de sédiments déposés dans les 98 barrages Algériens était évaluée à $560 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1996 soit un taux de comblement de 12,5 %, parmi ces barrages on peut citer :

- **Le barrage de FERGOUG**

L'envasement de la retenue du barrage de FERGOUG I (1885-1926) a réduit la capacité utile de $27 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à $14 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ durant les 31 années d'exploitation, soit un volume de vase égal à $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Concernant la retenue du barrage de FERGOUG III, la capacité utile se trouve réduite de $17 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1970 à $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1973 et à $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ en 1985, ce qui représente respectivement un volume de vase de 5 et $13 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ équivalent en définitif à un taux de comblement de 80 % ce qui a amené les services concernés à dévaser le barrage à partir de l'année 1989, par le procédé de dragage.

- **Le barrage de FOU M EL GHERZA**

La sédimentation accélérée de la retenue a été évidente dès le début de la réalisation du barrage, le batardeau amont ayant été complètement comblé en deux ans (1948-1950) ; par la suite, elle a provoqué une montée rapide du toit de vase, soit plus de 35 mètres en 40 années d'exploitation. La capacité de la retenue en 1995 est estimée à $24 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit un comblement de plus de 50 %.

- **Le barrage de OUED EL FODDA**

Du fait de l'envasement intensif qui affecte la retenue de OUED EL FODDA, la capacité initiale évaluée à 228.10^6 m^3 en 1932 s'est retrouvée à 130.10^6 m^3 en 1986 et 112.10^6 m^3 en 1994. Le toit de la vase près des vannettes est à environ 36 mètres du fond, soit un taux de comblement évalué à 50 % en 1994.

- **Le barrage d'IGHIL EMDA**

La capacité est évaluée à 103.10^6 m^3 en 1992 au niveau normal de la retenue (66,5m), soit un taux de comblement de 33 % durant la période 1953-1992.

- **Le barrage de BOUHANIFIA**

C'est dans le but de réduire la vitesse de comblement et ainsi prolonger la durée de vie du barrage de FERGOUG que le barrage de BOUHANIFIA a été réalisé à l'amont. Malheureusement ce barrage s'est retrouvé face à une sédimentation accélérée qui a réduit sa capacité de 73 à 47.10^6 m^3 durant la période 1940-1986, soit une vitesse moyenne de sédimentation égale à $0,56.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Le dépôt des sédiments est estimé à 31.10^6 m^3 en 1995, soit un volume d'eau restant de 42.10^6 m^3 et un taux d'envasement de 42 %.

- **Les deux barrages de K'SOB et ZARDEZAS**

Par suite de la réduction rapide de leur capacité utile, causée par une montée ; accélérée du profil vaseux due à une sédimentation importante, les barrages de K'SOB et ZARDEZAS ont été surélevés respectivement en 1973 et 1975, afin de prolonger leur durée de vie ; car contrairement au dragage la surélévation coûte beaucoup moins chère et peut combler partiellement ou totalement la capacité de stockage perdue.

II. Equipement de surélévation

1. Equipement d'un seuil libre

L'évacuateur de crues doit faire passer la crue de projet sans mettre en danger le barrage et sans provoquer des conditions à l'aval qui seraient plus dangereuses que celles existant avant la construction du barrage.

L'équipement du seuil libre permet de valoriser la tranche du plan d'eau comprise entre le niveau normal de retenu et le niveau des plus hautes eaux. Soit pour accroître la ressource en eau, sans diminuer la sécurité vis-à-vis des crues. Soit pour accroître la sécurité vis-à-vis des crues à niveau de retenue identique.

Certains dispositifs sont envisageables tel que :

- L'installation d'organes mobiles.
- La mise en place de boudins gonflables.

2. Les vannes

2.1. Les différents types de vannes

2.1.1. Vannes levantes verticales

Il s'agit généralement de vannes wagon (sauf pour les petits barrages, parfois équipés de vannes à glissières).

Pour les évacuateurs de surface des grands barrages, ces vannes nécessitent une superstructure assez importante, et généralement un portique de manœuvre et de manutention pour l'entretien.

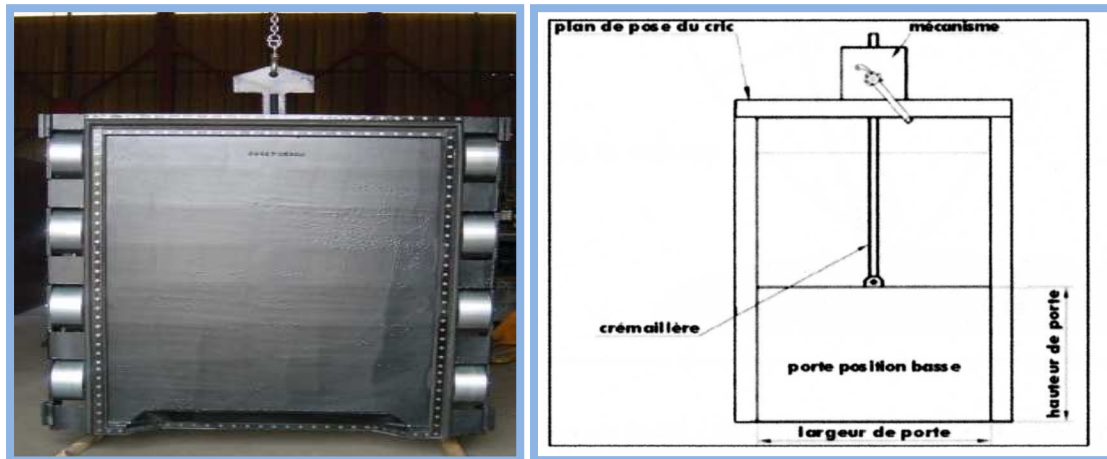


Figure (1.2.1) : vanne levante verticale.

2.1.2. Vannes segment et secteur

La vanne segment et secteur sont le type le plus répandu. En effet, leurs coût de fabrication est moindre.

Elle est caractérisée par la forme de sa tôle bordée en secteur de cylindre. Cette particularité a pour conséquence de transmettre tous les efforts de poussée hydraulique radialement et donc de faire passer les résultantes de forces par l'axe de rotation de l'ensemble. En clair, l'effort de manœuvre de cette vanne ne dépend que très peu de la pression hydraulique que l'on applique à sa surface. De plus, les conditions d'écoulement sont améliorées par rapport à la vanne wagon, compte tenu de l'absence de rainures.

Il est généralement déconseillé de laisser déverser par-dessus une grande vanne segment. En effet, pour un débit important, on risque de voir apparaître de fortes vibrations, mettant en danger la tenue mécanique de la vanne. S'il y a un risque d'accumulation de corps solides à l'amont de la vanne, on peut prévoir un volet mobile au sommet de la vanne segment pour évacuer ces matériaux.

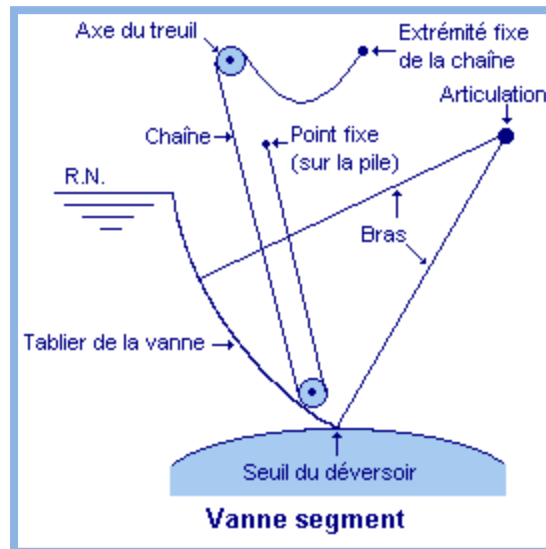


Figure (1.2.2) : Schéma d'une vanne segment.

2.1.3. Vannes clapet

Les vannes clapet équipant les évacuateurs de surface assurent le réglage fin du niveau de la retenue lorsque la hauteur de la nappe déversante est relativement faible.

La vanne clapet est excellente lorsqu'il y a risque d'accumulation d'une grande quantité de corps solides côté amont, car ces matériaux passent facilement par dessus la vanne.

L'organe de manœuvre peut être du type cric, treuil ou vérin hydraulique.... Celui-ci est manuel ou motorisé à commande manuelle, semi-automatique ou automatique.

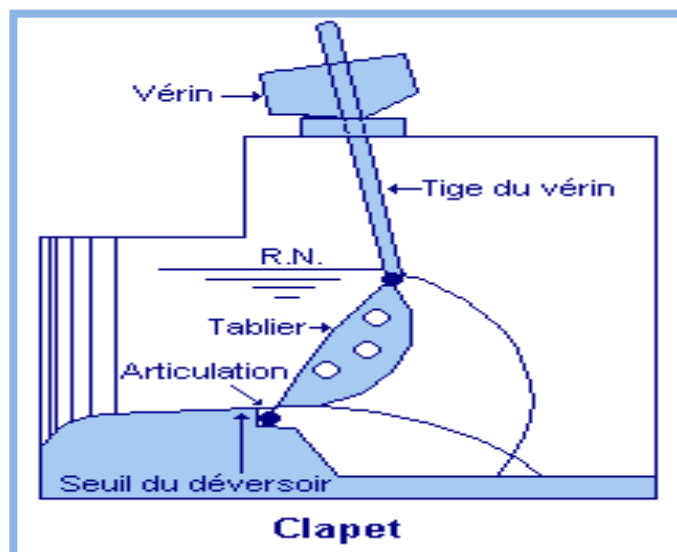


Figure (1.2.3) : Schéma d'une vanne clapet.

2.2. Avantages et inconvénients

L'évacuateur vanné donnant plus de souplesse d'exploitation qu'un seuil libre. De plus, le coût total plus faible que pour un déversoir à seuil libre pour un débit équivalent. Cette souplesse d'exploitation se traduit par la possibilité d'intégrer une stratégie de passage des crues exceptionnelles en limitant les lâchées pour ne pas dépasser le débit au-delà duquel il y aurait des inondations à l'aval.

La fiabilité du fonctionnement des vannes est impérative pour assurer la sécurité du barrage lors du passage des crues exceptionnelles. En général, il y a deux causes principales de défaillance de fonctionnement :

- Soit l'exploitant tarde à ouvrir les vannes ou omet de les ouvrir, alors même que ces vannes sont en bon état de fonctionnement.
- Soit la manœuvre est impossible par suite de désordres affectant la vanne elle-même ou de panne d'un ou de plusieurs éléments de l'équipement de commande.

Afin d'assurer la fiabilité de fonctionnement des évacuateurs de crue vannés, un programme régulier d'inspection et d'entretien des évacuateurs et des vannes est d'une nécessité absolue, donnant existence à des frais de maintenance qui progressent dans le temps.

3. Les seuils gonflables

Inventé et breveté en 1947 par le professeur français MESNAGER. Ce procédé permettrait de gagner en hauteur sans nuire à la sécurité du barrage.

3.1. Principe de fonctionnement

Le principe de base consiste à s'opposer à la poussée de l'eau par une membrane fixée sur le seuil et gonflée à l'air ou à l'eau. Cette membrane résiste à la poussée de l'eau, sans fléchir grâce à la contre pression maintenue à l'intérieur. Mais lorsque le niveau du plan d'eau tend à s'élever, l'accroissement de la poussée de l'eau dégonfle partiellement ou totalement la membrane pour permettre le passage de grands débits.

Donc l'abaissement du seuil lors des crues se fait automatiquement ; par contre la remise à niveau du seuil nécessite une source d'énergie électrique ou mécanique.

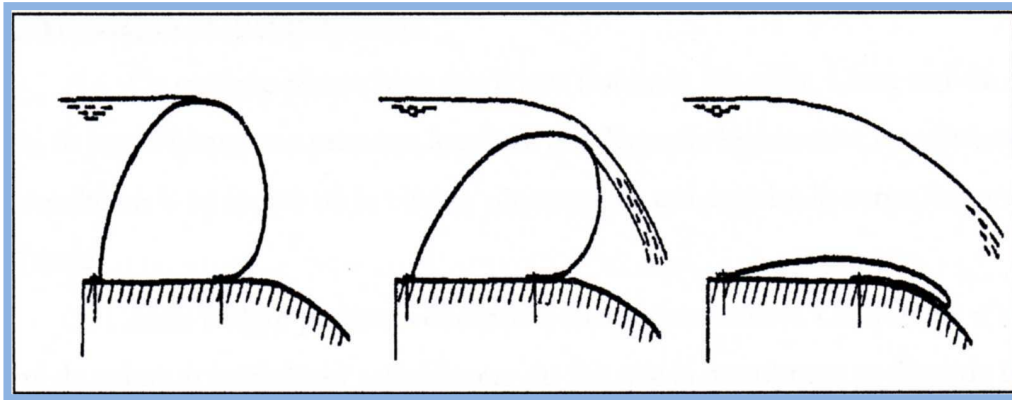


Figure (1.2.4) : Fonctionnement d'un seuil gonflable.

3.2. Description d'un seuil gonflé à l'eau

La membrane est constituée d'un matériau élastomère renforcé par une armature à la fois souple et résistante. Elle est repliée en forme de boudin et fixée à un radier horizontal en béton et aux deux bajoyers. L'enveloppe ainsi formée est reliée à un puits placé sur l'une des rives. Le puits est alimenté en eau de manière à créer une charge Q à l'intérieur de la membrane supérieure de 30% à 50% à la charge P correspondant au plan d'eau normal rehaussé.

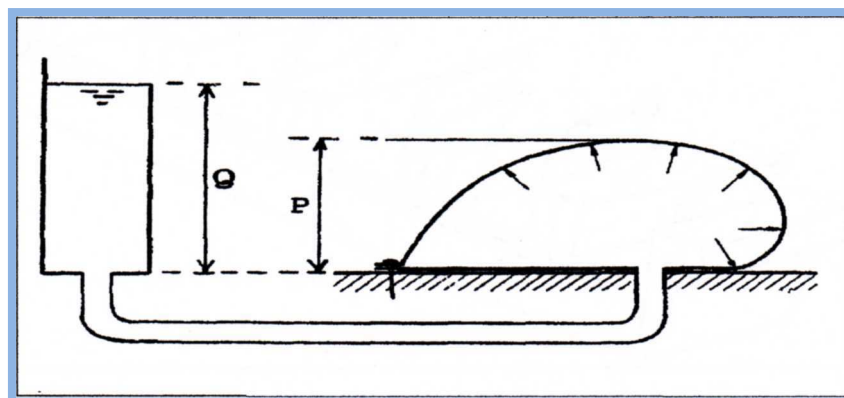


Figure (1.2.5) : Principe d'un seuil gonflé à l'eau.

Lorsque le niveau de l'eau tend à augmenter à l'amont, il cause un accroissement de la poussée P :

- pour des charges $P < Q$: on a un déversement sur le seuil sans que celui-ci se dégonfle.
- pour des charges $P > Q$: le seuil se dégonfle progressivement sous l'effet de la poussée P en expulsant l'eau du puits par sur verse.

3.3. Avantages et inconvénients

Ce système résiste bien aux corps flottants. En effet, à leur arrivée sur la crête, ils provoquent une pression localisée qui dégonfle légèrement la membrane une encoche en V se forme où la vitesse augmente ce qui expulse le corps flottant vers l'aval.

Mais malgré plusieurs décennies d'expérimentation. Ce système n'a pas apporté de solution totalement satisfaisante du fait que la membrane se dégrade très rapidement en perdant ses propriétés élastiques, nécessitant ainsi un remplacement fréquent. Cette membrane est sujet à de fréquentes alternances d'immersion et d'exposition aux l'ultra violets en fonction des fluctuations du niveau d'eau dans le réservoir. Et peut être aussi endommagée par vandalisme.

De plus de tels seuils ont une hauteur généralement de 1,5 m à 3 m ce qui rend le système peu économique.

Cependant autre que les vannes et le seuil gonflable, un système simple, robuste, et sûr appelé hausses fusibles a vu le jour en 1989 et peut être installé sur beaucoup de barrages existants pour :

- Accroître la capacité de stockage des barrages avec des déversoirs à surface libre sans sacrifier le stockage existant.
- Améliorer la capacité de décharge du déversoir sans élever le niveau maximum de l'eau, en abaissant la crête du déversoir avant d'installer Les hausses fusibles,

Ce système fera l'objet du prochain chapitre

CHAPITRE II

ÉTUDE DES HAUSSES FUSIBLES

I. Historique des hausses

L'équipement de déversoirs de barrages par des hausses effaçables lors des crues n'est pas une invention récente ; de tels dispositifs équipaient déjà les barrages mobiles au siècle dernier ; citons notamment les hausses mobiles à barre à talon de type Chanoine ou de type PASQUEAU, que l'on abattait manuellement, les hausses automobiles (ou à tambour) de type Desfontaines qui s'abaissaient automatiquement grâce à un système hydraulique.

Les fermettes Poirée à aiguilles, les rideaux CAMÉRÉ et les plaques Bollée complétaient la panoplie des mécanismes qui équipaient les barrages mobiles au 19^{ème} siècle.

Ces systèmes ont été remplacés par des vannes, parfois actionnées seulement par la force hydraulique (vannes automatiques), puis de plus en plus par des treuils électriques ou des vérins hydrauliques.

Ainsi la technique a-t-elle évolué depuis des matériels forts rustiques vers des systèmes complexes faisant appel à un ensemble de techniques plus élaborées : centrales hydrauliques, automates programmables, téléconduite.

Force est cependant de constater que le niveau de complexité technique atteint par les matériels proposés actuellement par les constructeurs est parfois disproportionné avec les objectifs du maître d'ouvrage.

En effet, s'il est important de pouvoir réguler de façon précise le niveau de la retenue d'un barrage mobile sur un grand cours d'eau, afin de répondre à des impératifs liés à la navigation, à la gestion des éclusées ou à l'évacuation des crues, en revanche, lorsque les conditions d'exploitation sont moins drastiques, et lorsque la vantellerie n'est sollicitée que par le passage de crues exceptionnelles, un retour à des dispositifs de conception et d'entretien simples, peut se justifier.

Ces considérations ont conduit François LEMPERIERE à inventer en 1989 un système original de hausses submersibles et fusibles. La société HYDROPLUS a été créée en 1991 par le groupe VINCI pour développer et exploiter le procédé des hausses fusibles HYDROPLUS.



Originales, les hausses HYDROPLUS le sont à plus d'un titre.

Tout d'abord ce sont des hausses fusibles ; elles ne fondent pas, mais comme un fusible elles fonctionnent par tout ou rien, et comme un fusible elles doivent être remplacées après qu'elles aient rempli leur rôle. Le seuil qui les supporte doit être aménagé pour recevoir une butée et pour permettre l'appui des étanchéités souples des éléments de hausses.

Mais l'originalité du dispositif tient avant tout dans les conditions de basculement. Qui n'a pas remarqué sur la crête d'un barrage quelque batardeau sommaire constitué de planches glissées dans des profilés en H, ou d'une ou deux rangées de parpaings ? Ces dispositifs permettent de relever de quelques dizaines de centimètres le niveau d'une retenue, pour améliorer l'alimentation d'une prise d'eau, par exemple, et ils s'effacent d'eux-mêmes en cas de crue importante. Mais leur plus gros inconvénient est l'incertitude sur le niveau de la retenue qui les fera partir. Trop de paramètres difficilement quantifiables entrent en jeu. Or, chez HYDROPLUS, la cote de basculement peut être définie avec une certaine précision (en théorie presque au centimètre). Parce que le moment de renversement est créé par la sous-pression agissant dans une chambre située sous la hausse. Et cette chambre est alimentée par un puits dont le débouché se trouve précisément à la cote à laquelle la hausse doit s'effacer.

Une autre caractéristique originale est liée à la géométrie de la crête des hausses : en forme de labyrinthe, elle permet d'augmenter la longueur de la lame déversante et par là même occasion augmenter le coefficient de débit à largeur de seuil égale. A noter que cela ne concerne pas les hausses dites non déversantes qui sont droites.

II. Les hausses fusibles : types, caractéristiques

- Description d'une hausse

Chaque hausse fusible est constituée de quatre parties : l'auge (la hausse), l'entonnoir ou puits d'alimentation, la chambre de mise en pression au contact du seuil et le lest. Chacune de ces parties peut avoir une configuration différente en fonction des exigences demandées.

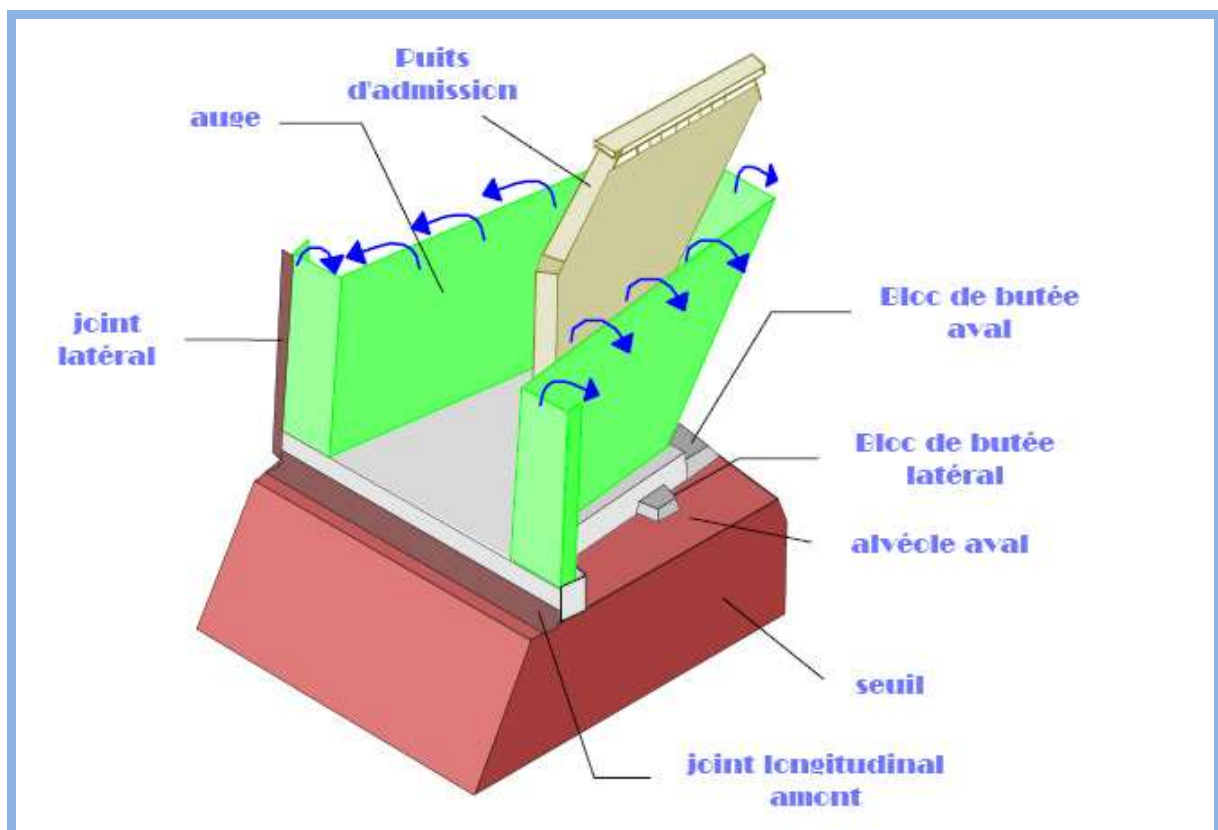


Figure (2.2.1) : vue amont d'une hausse labyrinthe.

1. La hausse

Divers modèles de hausses sont développés afin de répondre aux exigences spécifiques de chaque projet. Les hausses varient en dimensions, en formes, en poids et ainsi qu'en matériaux de fabrication.

La taille des hausses peut être adaptée aux besoins du client ; Les projets mis en application jusqu'ici montrent que la taille des hausses fusibles est échelonnée entre 1,3 m et 6,6 m (soit entre 4pieds et 22pieds).

Des hausses de deux types sont mises en œuvre, caractérisées par la forme de leur crête :

- Les hausses à crête labyrinthe



Figure (2.2.2) : vue aval d'une hausse labyrinthe.

Ces sont des hausses déversantes qui supportent des lames d'eau d'une hauteur comprise entre 30% et 150% de leur propre hauteur.

La hausse est constituée d'un caisson ouvert vers l'amont dont la crête a une forme de labyrinthe. Cette disposition permet l'écoulement des crues modérées sous une hauteur de lame déversante réduite. La longueur développée du labyrinthe est environ 3 fois celle du seuil.

La hauteur de la hausse est couramment comprise entre 1 m et 3 m et varie en fonction de l'objectif recherché. Cette hauteur est en général de l'ordre de 40% à 80% de la hauteur de la lame déversante en l'absence de hausse.

Trois configurations standard sont disponibles et sont classées suivant la largeur en fonction de la hauteur de la hausse, large (W :wide) ou étroite (N :narrow) et suivant la marge de basculement déterminé par un entonnoir bas (LH :low head),

ou un entonnoir élevé (HH :high head). Les dispositifs de chacune de ces configurations sont donnés sur le tableau suivant.

	la marge de basculement (en % de hauteur de la hausse)	Rapport largeur/hauteur
Étroite entonnoir bas (NLH)	entre 30% H et 70% H	1.0 (+/- 5%)
Large entonnoir bas (LLH)	entre 30% H et 70% H	1.5 (+/- 5%)
Large entonnoir élevé (LHH)	entre 70% H et 140% H	1.8 (+/- 5%)

Tableau (2.2.1) : la marge de basculement en fonction du rapport largeur/hauteur.

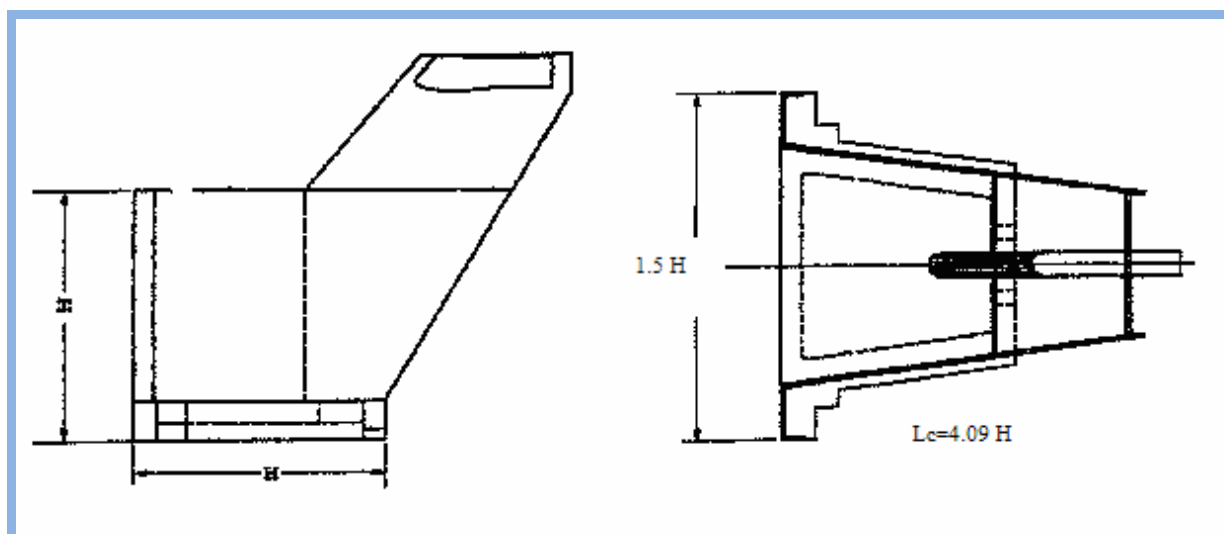


Figure (2.2.3) : Hausse labyrinthe à faible lame déversante.

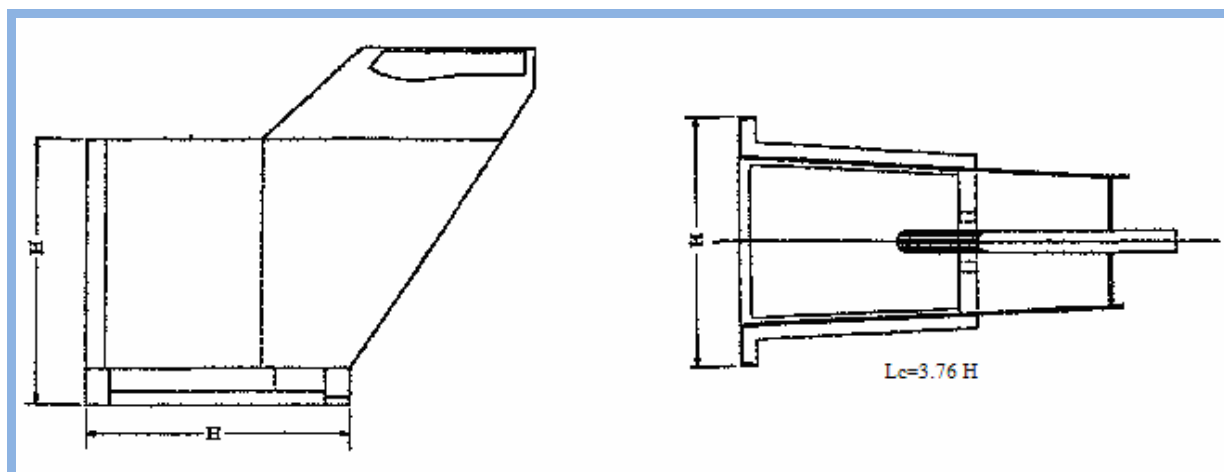


Figure (2.2.4) : Hausse labyrinthe à lame déversante modérée.

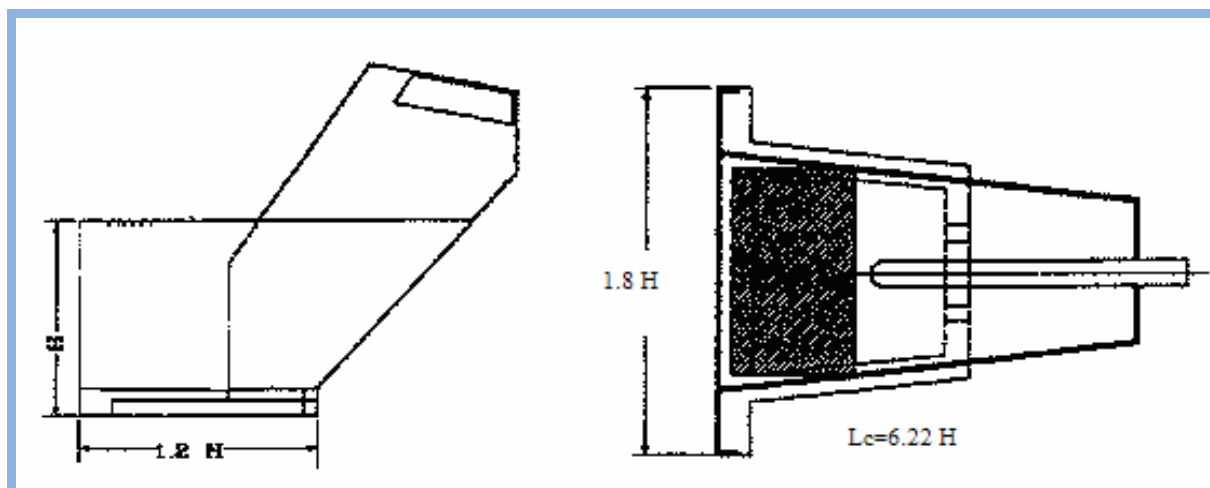


Figure (2.2.5) : Hausse labyrinthe à forte lame déversante.

Les hausses labyrinthe sont en acier ou en béton ; elles peuvent également être mixtes : auge en acier, chambre en béton. Les puits sont en acier. Toutes les parties en acier font l'objet d'un traitement anticorrosion.

Le poids moyen de ces hausses est de :

- 20 t pour 2 m de hauteur d'élément.
- 150 t pour 5 m de hauteur d'élément.
- 400 t pour plus de 5 m de hauteur d'élément.

Dans le cas de hausses très lourdes ou en présence d'un accès difficile, les hausses et leurs chambres peuvent être réalisées en éléments préfabriqués assemblés sur le seuil.

• Les hausses à crête rectiligne

Elles sont de 3 types :

Les hausses destinées à supporter de très fortes lames d'eau

Dans ce cas le labyrinthe perdrait une grande partie de son efficacité.

Ces hausses sont profilées de manière à obtenir le meilleur coefficient d'écoulement et sont en général construites en béton plein éventuellement coulé en place. Leur puits est en béton ou en acier. Elles peuvent être de grandes dimensions (20 m de large) et supporter des lames d'eau d'une hauteur allant jusqu'à 4 fois leur hauteur propre.

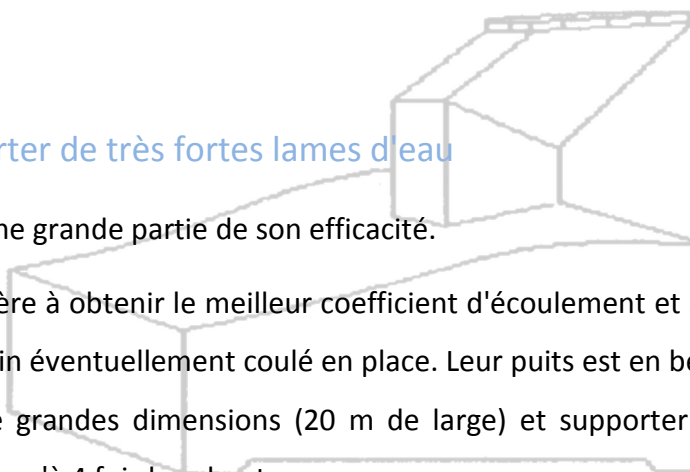




Figure (2.2.6) : vue amont des hausses à crête rectiligne.

Les hausses spéciales dites "grand froid"

Ces hausses sont conçues pour être utilisées dans des conditions de froid très sévères. Leur face amont est profilée et spécialement revêtue de manière à réduire le frottement et l'abrasion de la glace. Très stables, ces hausses sont construites en acier ou en béton.

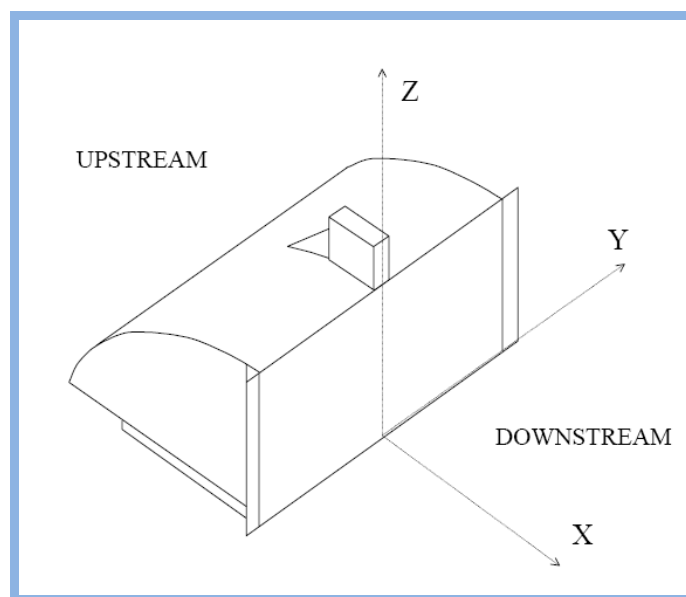


Figure (2.2.7) : vue aval des hausses grand froid.

Les fusibles de sécurité

Ces hausses sont réglées pour basculer avant déversement ou à la suite d'un déversement annonciateur très faible. Elles sont dans la plupart des cas associées à des vannes qu'elles assistent en cas de très fortes crues et dont elles peuvent pallier une défaillance éventuelle. Elles peuvent être utilisées seules pour mettre automatiquement en service des bassins de stockage de crues disposés le long de grands fleuves. Leur hauteur peut varier entre un mètre et une dizaine de mètres. Elles sont généralement constituées de 2 panneaux rectangulaires en acier ou en béton préfabriqué.

Le poids moyen de ces hausses est :

- 40 t pour 5 m de hauteur.
- 100 t pour 8 m de hauteur.
- 250 t pour 12 m de hauteur.

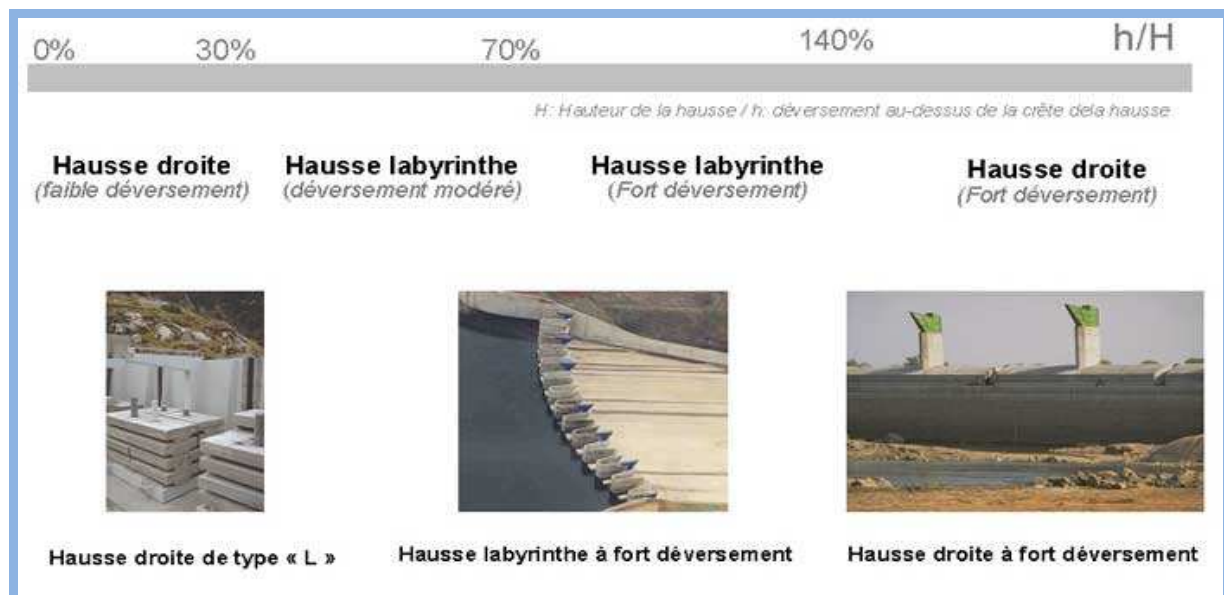


Figure (2.2.8) : type de hausses utilisées en fonction du rapport h/H.

Un autre type de hausse a vu le jour après quelque perfectionnement.

Hausses rabattables

Le nouveau type de hausses fusibles rabattables ne remplace pas les hausses actuellement sur le marché. Ils fonctionnent selon le même principe que la version originale, mais leur conception plus raffinée tiennent compte d'une réaction qui est mieux adaptée aux projets où l'hydrologie locale exige un abaissement fréquent des hausses afin de protéger la structure.

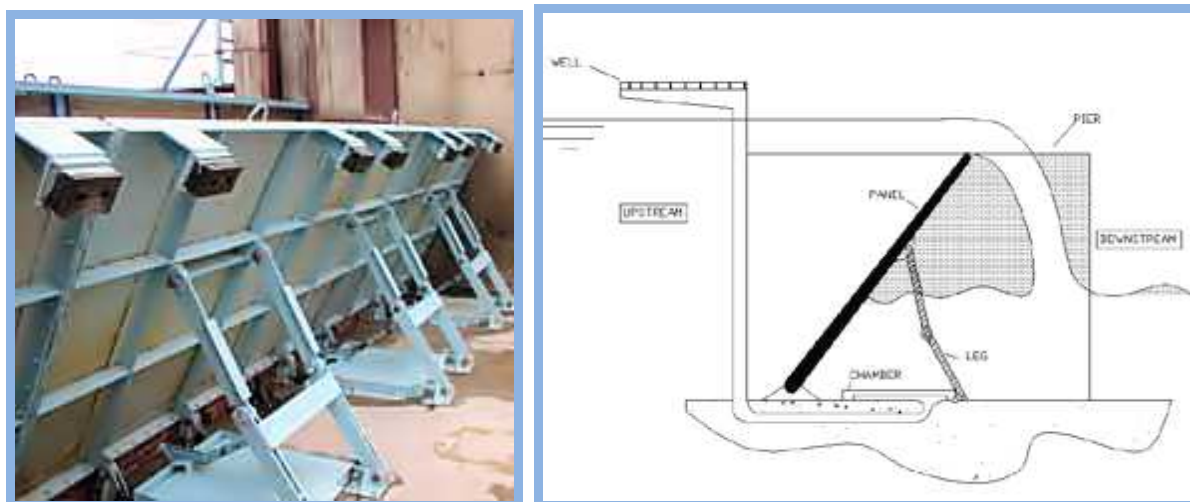


Figure (2.2.9) : photo et schémas représentatifs des hausses rabattables.

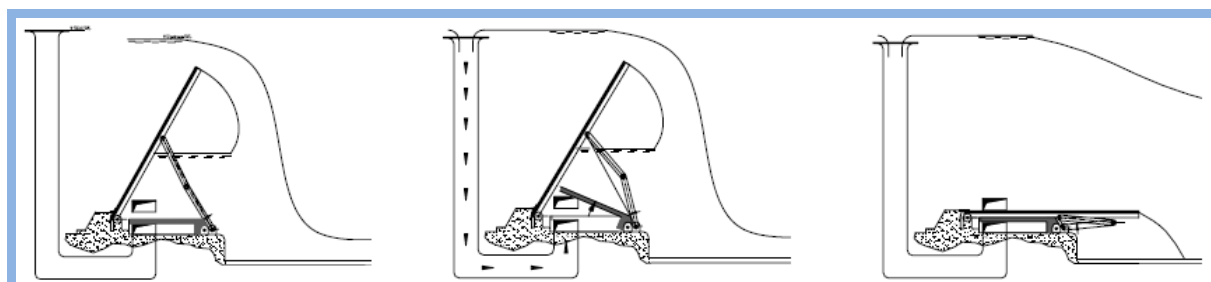


Figure (2.2.10) : schémas de fonctionnement des hausses rabattables.

2. Le puits d'alimentation

- Le puits d'alimentation est généralement solidaire de la hausse et construit en acier. Sa partie supérieure est évasée, l'embouchure est protégée par des barreaux et surmontée d'un chapeau. Dans cette position le puits, par sa présence, participe à l'aération

de la lame. Dans le cas de très fortes lames, le puits est doublé en aval par un évent d'aération. Son fût est alors construit en béton afin d'éviter les vibrations. La position du puits par rapport à la hausse et le profil de son embouchure sont adaptés à la forme des lignes d'eau.



Figure (2.2.11) : puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier).

• **Les puits d'alimentation peuvent être regroupés dans des chambres aménagées dans les bajoyers.** Le puits est alors relié à la chambre de mise en pression par une conduite noyée dans le seuil. Cette disposition permet de laisser le seuil libre de tout obstacle ; elle permet également un réglage encore plus précis et facilement ajustable des cotes de basculement.



Figure (2.2.12) : puits d'alimentation regroupés dans des chambres aménagées dans les bajoyers.

•Le basculement d'une hausse peut commander le basculement d'une hausse voisine par l'intermédiaire d'une conduite noyée dans le seuil et reliée à la chambre de celle-ci. (deux hausses qui se partage le même puits).



Figure (2.2.13) : deux hausses qui se partage le même puits.

•Le seuil peut être disposé en marches d'escalier, les premières hausses à basculer étant posées sur les marches les plus hautes. Cette disposition permet de limiter les pertes d'eau dans le cas où le maître d'ouvrage aurait fait le choix d'une période de basculement courte.



Figure (2.2.14) : hausses posées sur un seuil en marche d'escalier.

- Les hausses peuvent être posées en corolle sur un déversoir en tulipe, moyennant des dispositions particulières.

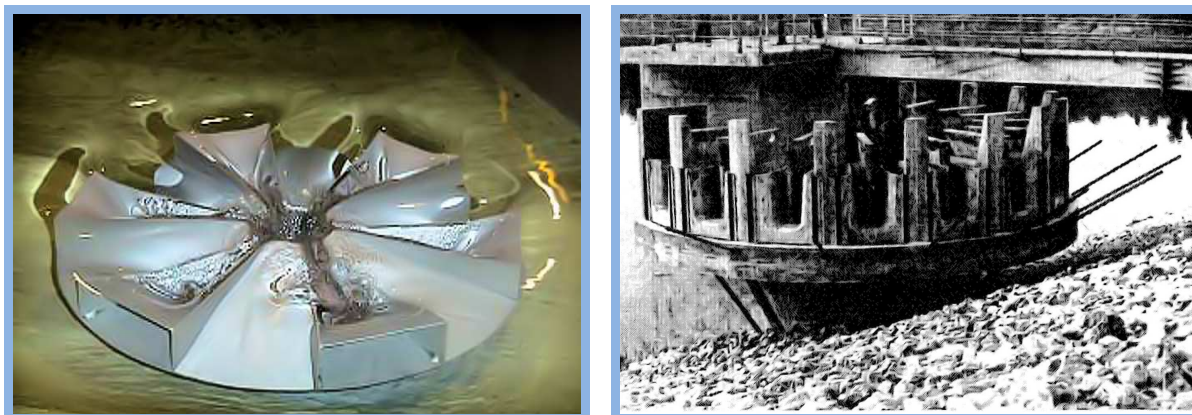


Figure (2.2.15) : hausses en corolle sur un déversoir en tulipe.

3. Le lest

Par conception, l'équilibrage général des hausses est assuré, compte tenu de leur forme et de la nature des matériaux qui les constituent.

Le lest sert à compléter cet équilibrage et à ajuster la pression régnant dans la chambre au moment du basculement de chaque hausse. Il permet en particulier de différencier le comportement de chaque hausse.

Il est constitué suivant les cas, de blocs de béton, d'acier, ou de fonte.

4. La chambre de mise en pression

La chambre de mise en pression est solidaire à la hausse, sa base est construite en béton ou en acier. Elle est en contact en aval avec deux butées en béton ancrées dans le seuil et un dispositif d'étanchéité l'isole du réservoir amont.

Elle comporte des purges afin d'éviter la mise en pression accidentelle de la chambre due aux eaux de fuites à partir du réservoir. La section des purges est nettement inférieure à celle du puits d'alimentation de façon à provoquer à coup sûr la sous pression en cas de déversement dans le puits

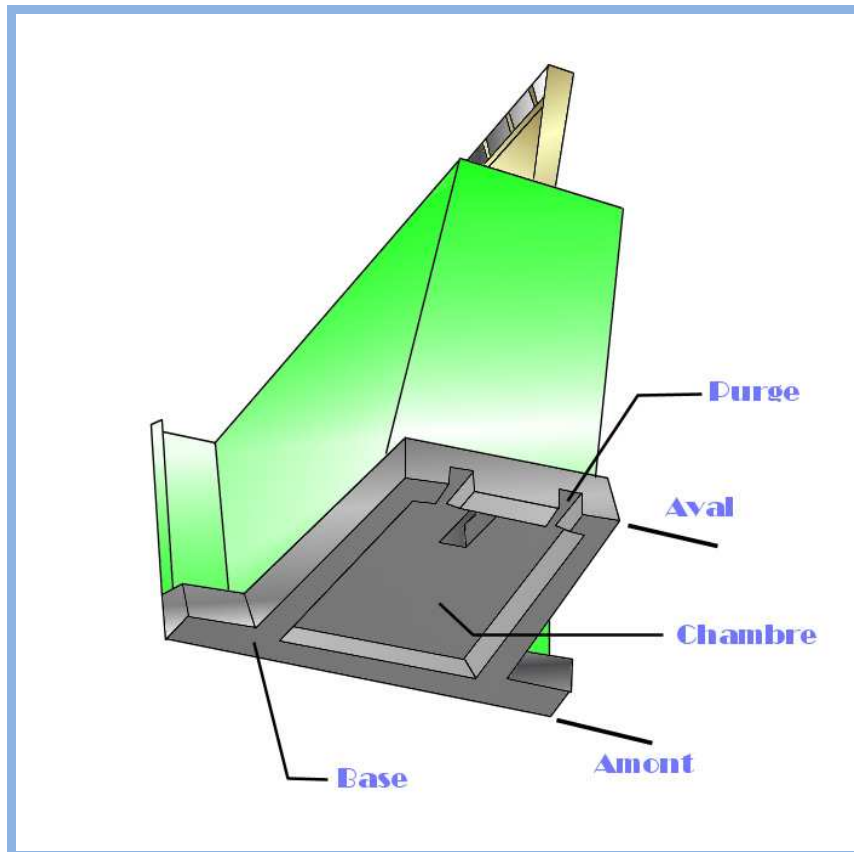


Figure (2.2.16) : vue d'en bas d'une hausse labyrinthe.

III. Description du procédé

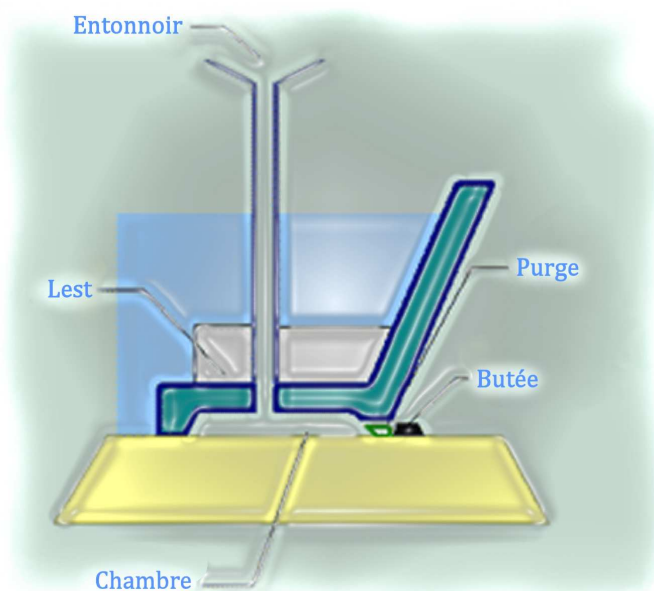


Figure (2.3.1)

Le procédé des hausses fusibles est basé sur le fonctionnement du dispositif suivant :

- des modules jointifs et indépendants (les hausses) sont posés sur le seuil libre d'un déversoir de manière à former un écran étanche ;
- ils sont munis d'une butée à l'aval et lestés de manière à rester stables sous la poussée de l'eau ;
- des purges drainent l'interface avec le seuil ;
- un entonnoir est disposé à l'amont de la crête de chaque module, il est en communication avec l'interface entre le module et le seuil, son sommet est réglé à une cote déterminée.

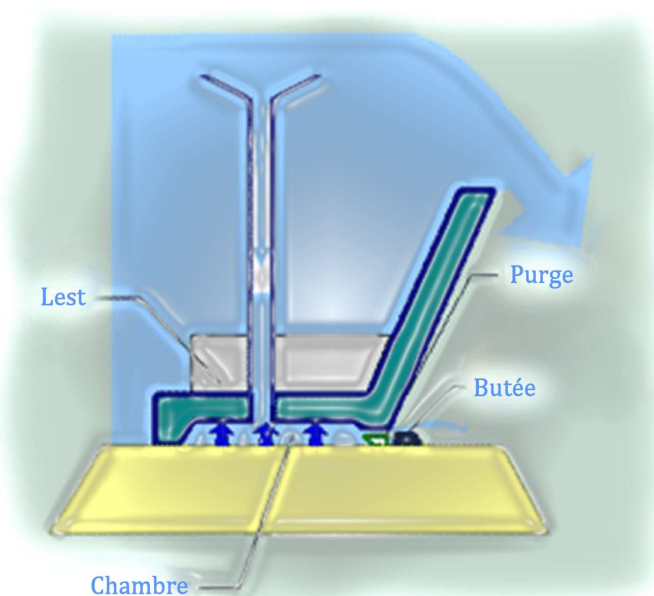


Figure (2.3.2)

L'interface d'un module est alimentée lorsque le niveau de l'eau dépasse le sommet de son entonnoir.

Dès que les purges sont saturées, une pression s'établit sous le module, apportant une discontinuité dans l'évolution du rapport des forces qui conduit au déséquilibre du module et à son basculement vers l'aval où il est emporté par le courant.

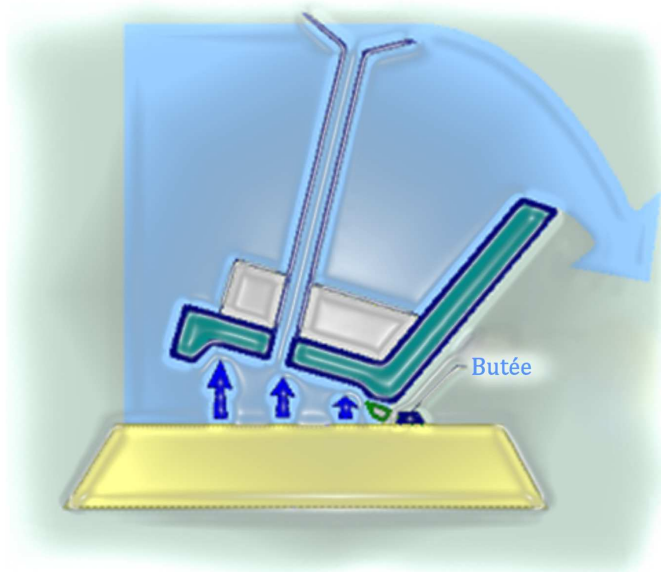


Figure (2.3.3)

Au fur et à mesure de la montée de l'eau, les modules basculent les uns après les autres.

Leur cote de basculement est réglée avec précision par le calage en hauteur de leur entonnoir, différent d'un module à l'autre.



Figure (2.3.4) : simulation de l'écoulement après un premier basculement.

Jusqu'au basculement de la première hausse, l'utilisateur a l'avantage du stockage supplémentaire et le système fonctionne comme tout autre barrage non rehaussé.

Avec les hausses fusibles, seulement un nombre d'unités est suffisant à surmonter une crue.

En outre, les hauteurs du réservoir auquel chaque hausse bascule peuvent être contrôlées avec précision.

IV. Stabilité : critères, calcul

1. Calculs de stabilité

Bien que les principes considérés ici s'appliquent à tous les types de hausses fusibles, le mémoire suivant se limitera aux hausses fusibles à crête labyrinthe (voir dessin ci-dessous) et traitera de la stabilité au renversement et au basculement.

La stabilité au glissement est simplement assurée par les butées aval ménagées dans le seuil du déversoir. Elles sont conçues pour résister à la poussée horizontale des hausses fusibles.

L'étude de la stabilité des hausses fusibles au renversement nécessite de déterminer les moments par rapport aux butées de toutes les forces agissant sur la hausse fusible.

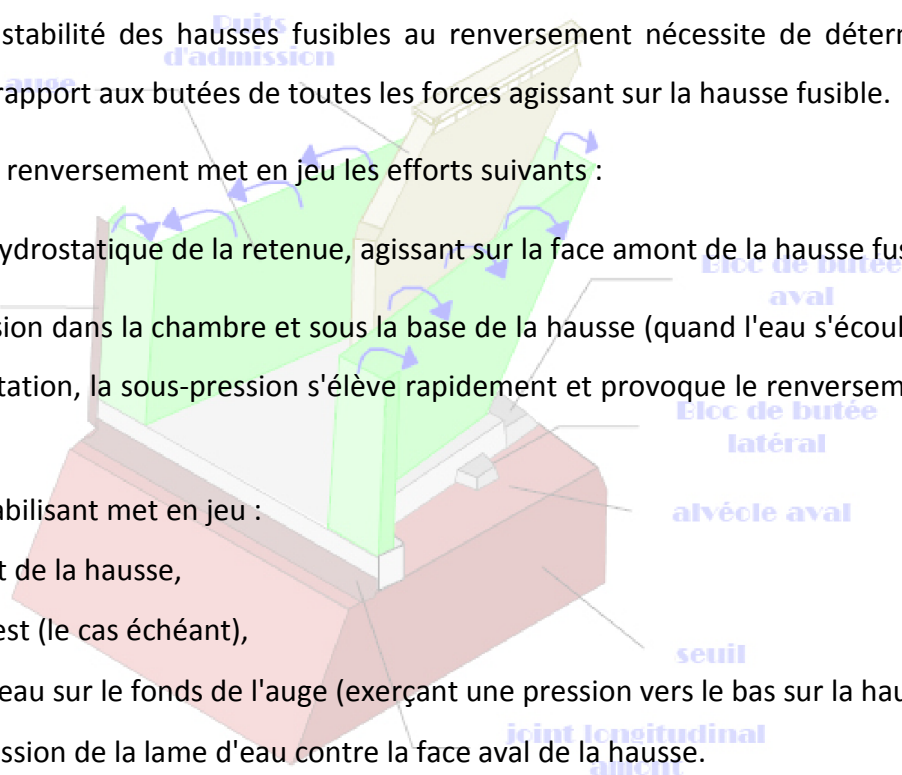
Le moment de renversement met en jeu les efforts suivants :

- la pression hydrostatique de la retenue, agissant sur la face amont de la hausse fusible,
- la sous-pression dans la chambre et sous la base de la hausse (quand l'eau s'écoule dans les puits d'alimentation, la sous-pression s'élève rapidement et provoque le renversement de la hausse).

Le moment stabilisant met en jeu :

- le poids mort de la hausse,
- le poids du lest (le cas échéant),
- le poids de l'eau sur le fonds de l'auge (exerçant une pression vers le bas sur la hausse),
- la contre pression de la lame d'eau contre la face aval de la hausse.

Les détails des relations sur lesquelles repose l'analyse de stabilité sont donnés ci-après.



- Pression hydrostatique amont

Pour simplifier les équations suivantes, la pression hydrostatique sur les puits n'est pas prise en compte.

Si $h \leq H$

La résultante de la pression hydrostatique amont est : $F_{am} = 1/2 \rho_e g L h^2$

Le moment de la pression amont est : $M_{am} = 1/6 \rho_e g L h^3$

avec :

h : hauteur de la retenue au-dessus du seuil supportant les hausses

H : hauteur de la hausse

L : largeur de la hausse

ρ_e : densité de l'eau

g : accélération de la pesanteur

Si $h > H$

$F_{amont} = 1/2 \rho_e g L H^2 + \rho_e g L H (h - H) = 1/2 \rho_e g L H (2h - H)$

$M_{amont} = 1/6 \rho_e g L H^3 + 1/2 \rho_e g L H^2 (h - H) = 1/6 \rho_e g L H^2 (3h - 2H)$

- Poids de la hausse et du lest

Poids mort de la hausse : P_{hausse}

Moment du poids de la hausse : $M_{hausse} = P_{hausse} X_{hausse}$

Poids du lest : P_{lest}

Moment du poids du lest : $M_{lest} = P_{lest} X_{lest}$

où X_{hausse} et X_{lest} sont les distances horizontales des centres de gravité de la hausse et du lest depuis la butée.

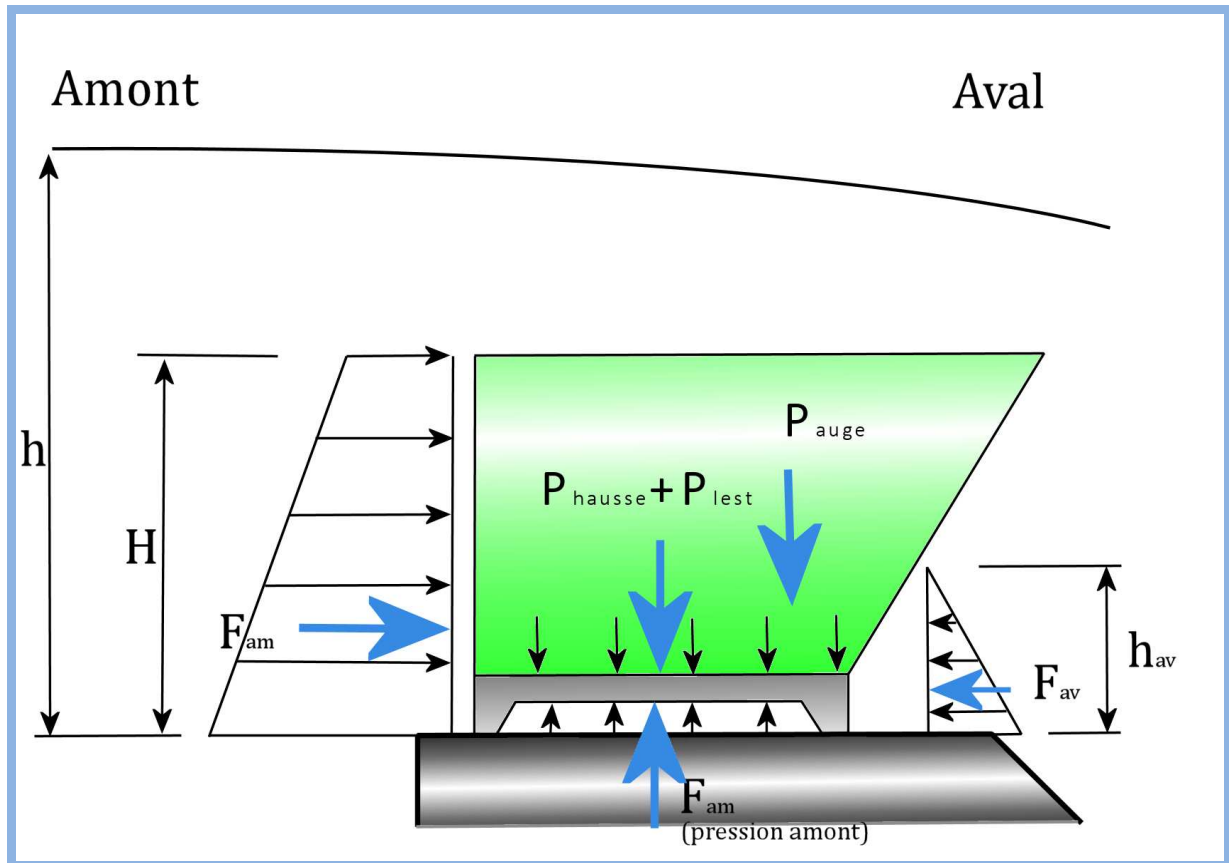


Figure (2.4.1) : système de forces agissant sur une hausse labyrinthique.

- Pression exercée vers le bas dans l'auge

Quand la hausse ne déverse pas ($h < H$), la résultante de la pression verticale qui s'exerce à l'intérieur de l'auge est égale au poids de l'eau dans l'auge. Elle varie de 0 à $P_0 = \rho_e V_0$ (V_0 étant la contenance de l'auge).

Lors du déversement, la ligne d'eau au-dessus de la hausse suit une courbe descendante vers l'aval. Les composantes verticales des pressions exercées à l'intérieur de l'auge ont été déterminées à partir d'essais sur modèles réduits.

Résultante verticale de la pression dans l'auge : P_{auge}

Moment de la résultante verticale de la pression dans l'auge : M_{auge}

- Contre pression de la lame déversante

Résultante de la contre pression de la lame déversante : $F_{av} = 1/2 \rho_e g L_{aval} h_{aval}^2$

Moment de la contre pression : $M_{\text{aval}} = 1/6 \rho_e g L_{\text{aval}} h_{\text{aval}}^3$

dans lequel h_{aval} est la charge d'eau s'exerçant contre la face aval de l'auge et L_{aval} la largeur de la face aval de l'auge.

Les essais sur modèles réduits ont montré que si le débit n'est pas contrôlé par le niveau aval, h_{aval} varie du 1/4 au 1/5 de la charge amont h .

Le moment de la contre pression est faible en comparaison avec les autres moments participant à la stabilité de la hausse.

- Sous-pression dans la chambre et sous la base

La connaissance de la sous-pression dans la chambre et sous la base de la hausse dans les conditions normales et critiques est essentielle pour comprendre la stabilité de la hausse. Jusqu'à ce que la chambre se remplisse, la hausse dispose d'une marge de stabilité importante, du fait que le puits entonne l'eau pour une charge amont prédéterminée. Le basculement s'effectue sûrement lorsque le niveau amont prévu est atteint.

La sous pression dans la chambre et sous la base de la hausse et le résultat de l'équilibre entre les débits entrants et sortants :

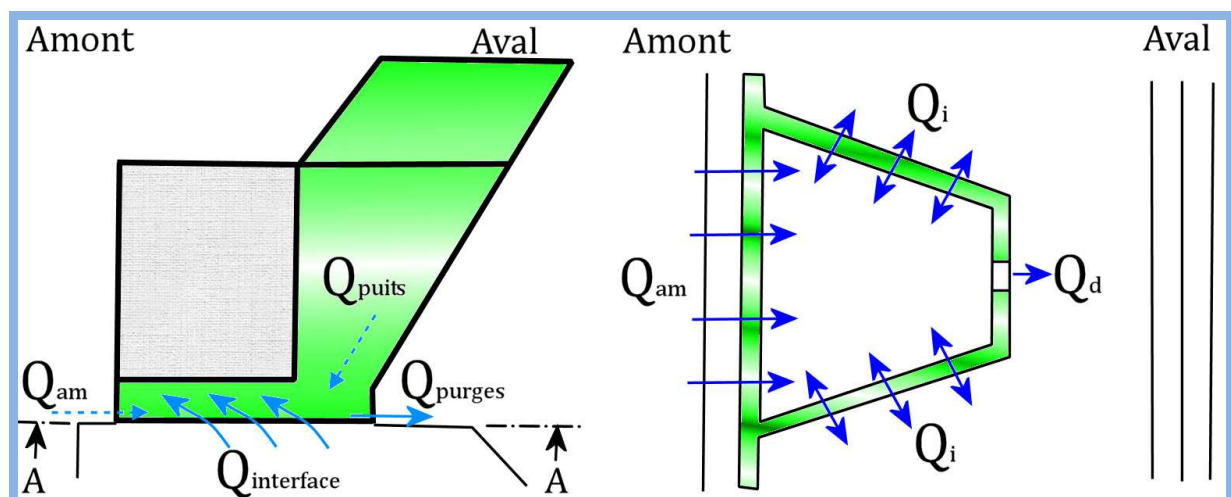


Figure (2.4.2) : les différents débits transitant par la chambre de mise en pression.

- débit entrant depuis l'aval à travers l'interface entre le seuil et la base de la hausse ($Q_{interface}$)
- débit entrant dans la chambre à travers le joint amont dégradé, le cas échéant (Q_{amont})
- débit évacué par les purges, en général à la pression atmosphérique (Q_{purges})
- débit entonné par le puits, le cas échéant (Q_{puits})

Les débits entrant dans la chambre sont comptés positivement, les débits sortant sont compté négativement.

La charge dans la chambre est calculée en référence au seuil, puis réduite de la hauteur de la chambre afin de calculer le moment de renversement.

Dans les conditions normales, un joint amont prévient les fuites de la retenue dans la chambre ($Q_{amont} = 0$). Quand la hausse déverse, les fuites à travers l'interface hausse / seuil sont évacuées par les purges ($Q_{interface} + Q_{purges} = 0$). Ces purges sont dimensionnées de façon à évacuer en temps normal les fuites latérales provenant de l'aval de l'auge, avec un niveau d'eau dans la chambre quasiment nul. Dans ces conditions, la pression dans la chambre est appelée : "sous pression naturelle".

Lors d'une crue importante, le puits entonne de l'eau dans la chambre ($Q_{interface} + Q_{purges} + Q_{puits} = 0$), et la sous pression croît rapidement. Lorsque la pression dans la chambre atteint une valeur prédéterminée, la hausse commence à se soulever du seuil, rompant l'étanchéité amont, et la chambre est mise en communication avec la retenue. Le débit entrant depuis la retenue fait monter la pression dans la chambre, le moment de renversement augmente, et la hausse bascule vers l'aval.

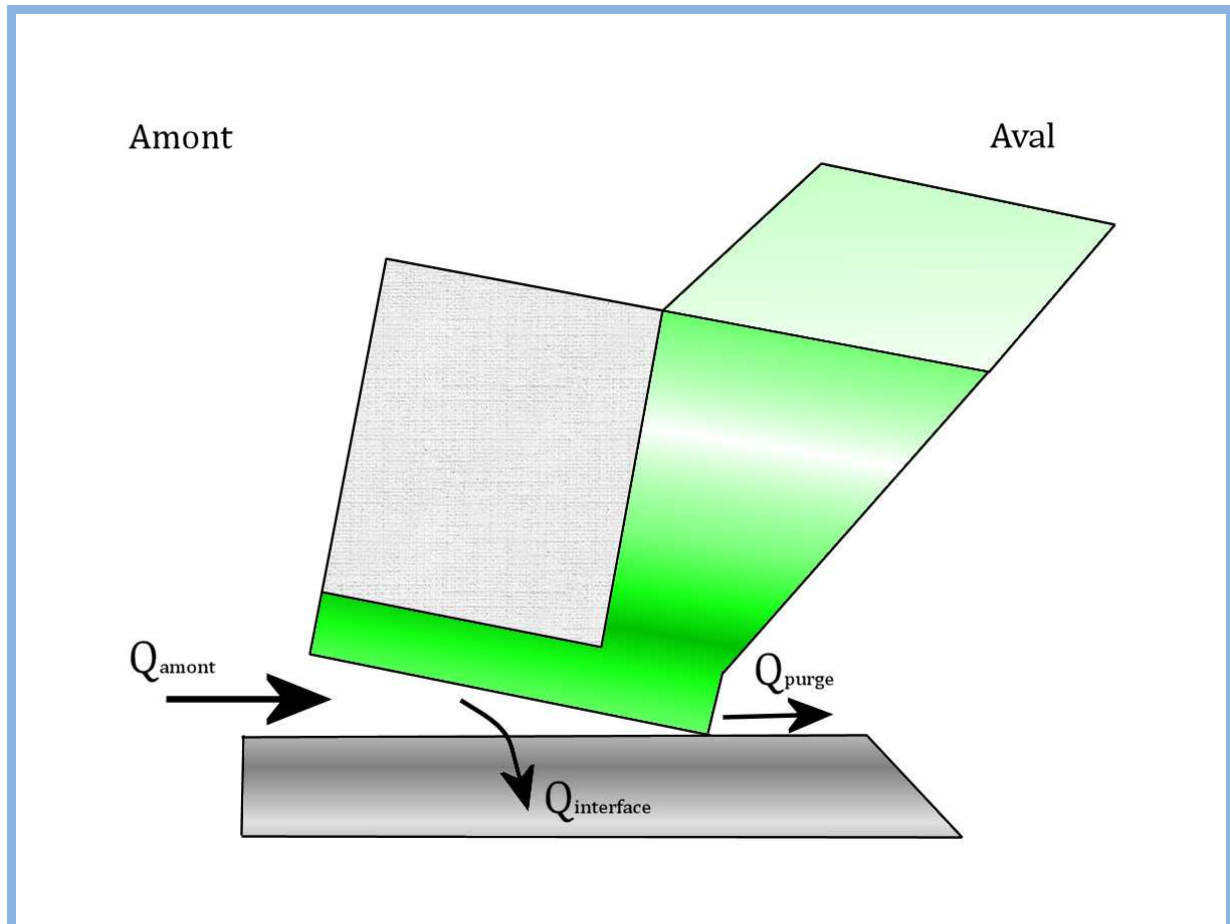


Figure (2.4.3) : les débits transitant par la chambre de mise en pression durant un soulèvement du bord amont.

Lorsque le bord amont de la hausse se soulève en premier du seuil, le débit entrant de la retenue dans la chambre augmente et dépasse largement le débit provenant du puits (Q_{puits}). Lorsque la hausse pivote, la trouée latérale offre à l'eau une surface de plus en plus grande pour s'évacuer de la chambre. Le débit des purges (Q_{purges}) devient négligeable comparé avec les fuites latérales ($Q_{\text{interface}}$).

Lorsque la hausse a pivoté (environ de 10°), l'équilibre des débits entrants et sortants (qui régit la sous-pression dans la chambre) devient simplement l'équilibre entre l'eau entrant directement du réservoir dans la chambre et l'eau s'échappant vers l'aval ($Q_{\text{amont}} + Q_{\text{interface}} = 0$).

La même situation se produit si la hausse se soulève du seuil sans que l'eau atteigne la crête du puits, comme cela peut se produire en cas de choc important dû à des corps flottants, par exemple.

Dans ce cas, il est possible de déterminer la sous pression maximale qui pourrait s'exercer dans la chambre à partir de la charge amont. La sous pression atteint asymptotiquement ce maximum lorsque la rotation de la hausse devient significative. Cette valeur intermédiaire de pression, entre les charges amont et aval, est désignée sous le nom de "sous-pression maximale de soulèvement". La sous-pression maximale de soulèvement a été déterminée dans les essais sur modèle réduit en soulevant le bord amont de la hausse jusqu'à ce que l'ouverture latérale atteigne environ dix fois la surface cumulée des purges.

Pour des hausses labyrinthe, la sous pression maximale de soulèvement est approximativement égale à la demie somme des charges amont et aval $(h+h_{\text{aval}})/2$

La dégradation du joint amont permettrait à l'eau de s'écouler depuis la retenue dans la chambre ($Q_{\text{amont}} + Q_{\text{interface}} + Q_{\text{purgés}} = 0$). La pression dans la chambre serait plus élevée que la sous pression naturelle. Cependant elle demeurerait encore inférieure à la sous pression maximale de soulèvement, parce que les purges sont conçues pour une capacité de décharge supérieure au débit engendré par les fuites depuis la retenue. Le colmatage des purges créerait dans la chambre une pression atteignant une valeur proche de la charge aval h_{aval} ($Q_{\text{interface}} = 0$), mais elle serait encore bien inférieure à la sous pression maximale de soulèvement.

Dans les conditions normales, sans entonnement dans le puits, la pression dans la chambre est égale à la sous pression naturelle. Des désordres peuvent engendrer une pression plus élevée, mais elle sera toujours plus faible que la sous pression maximale de soulèvement.

Ce calcul de débits peut être synthétisé dans les équations suivantes :

Les débits qui peuvent pénétrer dans la chambre sont :

- Débit par le puits d'alimentation du fait d'un déversement sur l'entonnoir Q_{puits} .

$$Q_{\text{puits}} = \mu_{\text{puits}} L' (2g)^{1/2} h_{\text{puits}}^{3/2}$$

Avec

- μ_{puits} : Coefficient de débit pour le puits.
- L' : Longueur déversante efficace.
- h_{puits} : hauteur du déversement sur l'entonnoir du puits.

- Débit à travers l'espace réduit entre le réservoir et la chambre Q_{amont} .

$$Q_{\text{amont}} = \mu_{\text{amont}} S [2g (h - h_{\text{chambre}})]^{1/2}$$

Avec

- μ_{amont} : Coefficient de perte de charge due à un soulèvement amont de la hausse.
- S : Section de passage.
- h_{chambre} : Charge dans la chambre.

Les débits qui peuvent sortir de la chambre sont :

- Débit sortant par les purges Q_{purges} .

$$Q_{\text{purges}} = \mu_{\text{purges}} S_{\text{purges}} (2g [h_{\text{chambre}} - h_{\text{aval}}])^{1/2}$$

Avec

- S_{purges} : Section des purges.
- μ_{purges} : Coefficient de perte de charge pour les purges.

- Débit à travers l'espace réduit entre la chambre et l'aval $Q_{\text{interface}}$.

$$Q_{\text{interface}} = \mu_{\text{interface}} S' (2g [h_{\text{chambre}} - h_{\text{aval}}])^{1/2}$$

Avec

- S' : Section de l'espace réduit entre la chambre et l'aval.
- $\mu_{\text{interface}}$: Coefficient de perte de charge.

L'équation d'équilibre des débits devient :

$$Q_{\text{interface}} + Q_{\text{purges}} = Q_{\text{amont}} + Q_{\text{puits}}$$

2. Choix de la sous-pression pour le basculement dans des conditions normales

Les hausses fusibles sont conçues pour assurer la sécurité dans les conditions les plus critiques, par exemple avec le joint amont complètement détruit, ou le puits d'alimentation ou les purges bouchés. Il s'agit de situations extrêmes qui n'advieudraient qu'en cas de dégradations volontaires ou d'arrêt total de la surveillance et de la maintenance du barrage.

Le lestage de la hausse assure que la sous-pression nécessaire pour la soulever et la basculer, en mode normal, est plus importante que la pression provenant de modes dégradés, par exemple : drains bouchés, ou joint amont endommagé (voir figure ci-après)

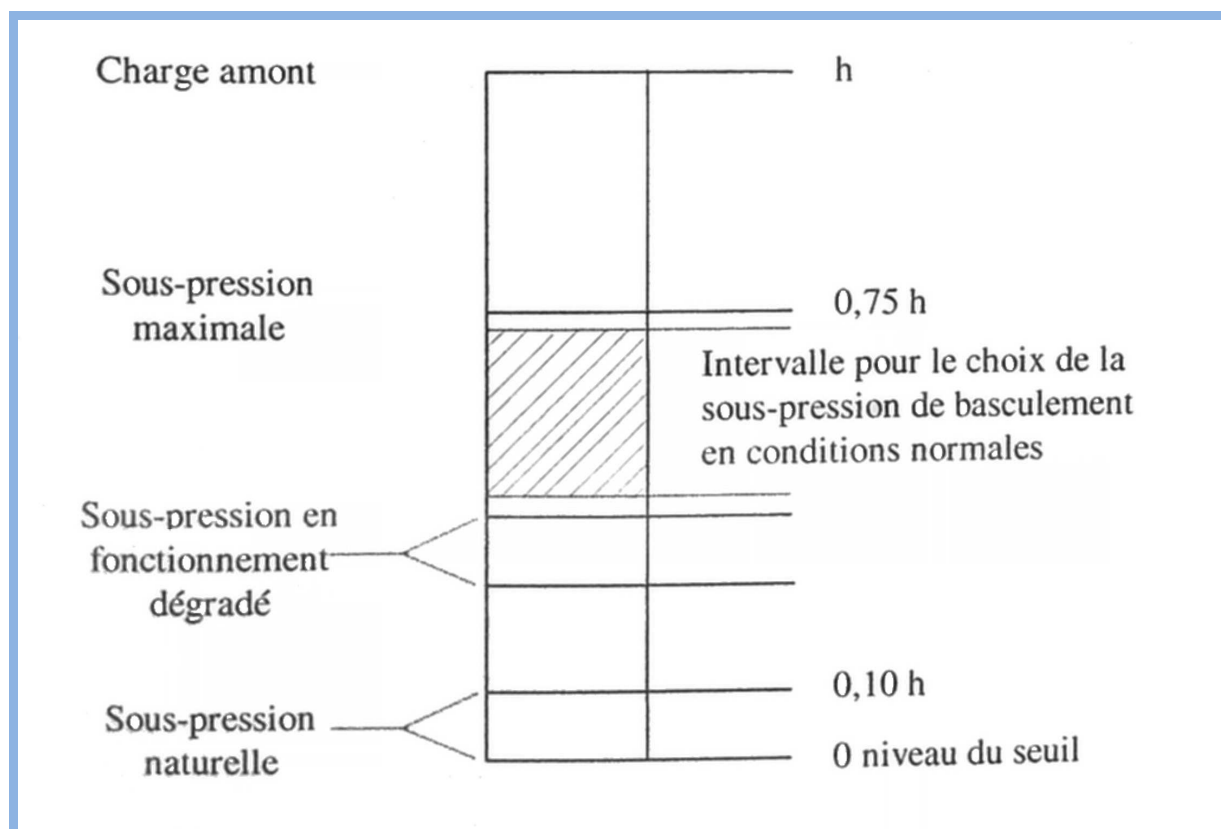


Figure (2.4.4) : les différentes sous-pressions dans le puits en fonction des conditions d'utilisations.

- **Stabilité au glissement**

La stabilité au glissement est assurée par des butées enrées dans le bord aval du déversoir. Ces butées permettent de reprendre les efforts horizontaux exercés par la poussée de l'eau.

L'estimation de l'effort exercé sur les butées est calculé en considérant la retenue au niveau des plus hautes eaux et en négligeant le frottement entre la hausse et le seuil.

Donc :

$$F_{\text{Butées}} = 1/6 \rho_e g L H^2 (3h-2H)$$

avec :

h : hauteur de la retenue au-dessus du seuil supportant les hausses

H : hauteur de la hausse

L : largeur de la hausse

ρ_e : densité de l'eau

g : accélération de la pesanteur

3. Courbes de stabilité caractéristiques

Les courbes de stabilité des hausses représentent le moment stabilisateur et le moment renversant en fonction du niveau d'eau amont en mode normal et dégradé. La charge d'eau est mesurée à partir de la base de la hausse. La marge de sécurité est la différence entre le moment stabilisateur et le moment de renversement. Le renversement a lieu lorsque ces deux moments sont égaux (voir graphique ci-dessous).

- Conditions normales

Quand le puits commence à être alimenté, la charge dans la chambre augmente rapidement et la marge de stabilité de la hausse diminue pour s'annuler pour la cote de basculement normal prédéterminée.

Entre le début d'alimentation du puits et le basculement, la variation du niveau d'eau dans la retenue est d'environ 2 à 3% de la hauteur de la hausse.

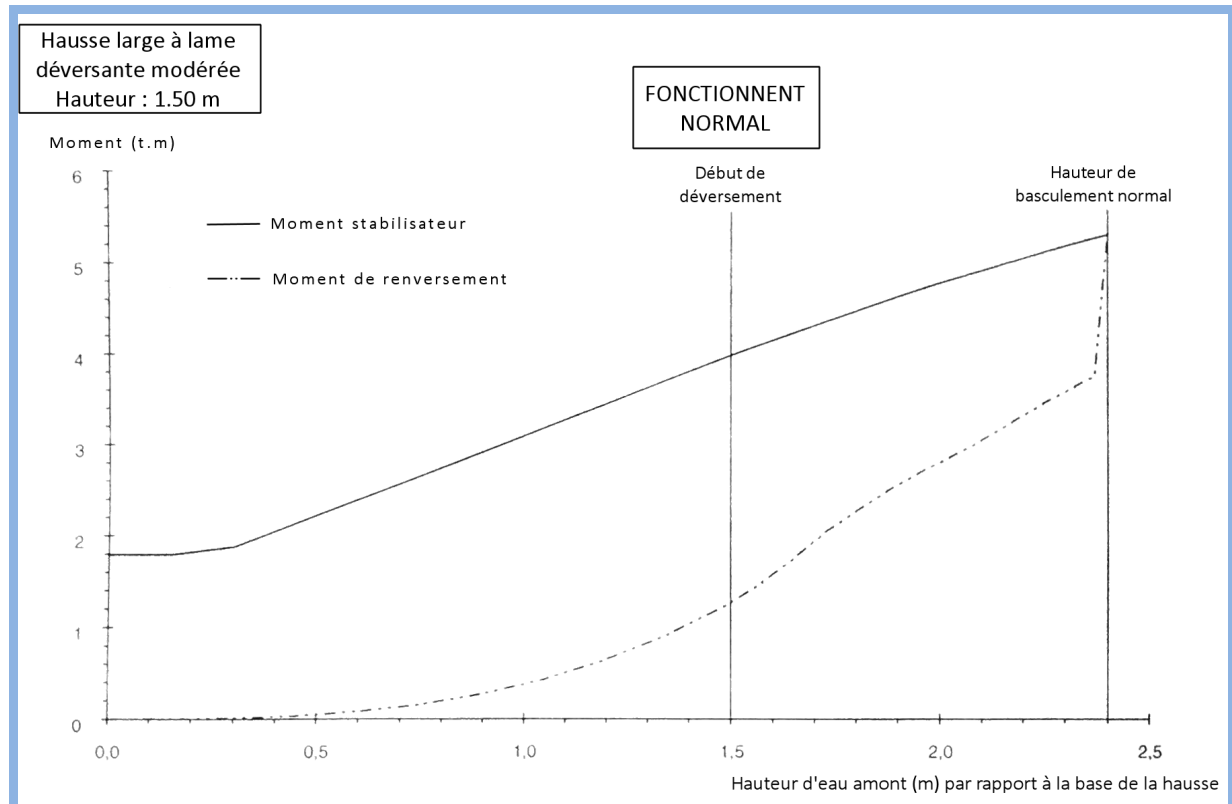


Figure (2.4.5) : courbes de stabilité caractéristiques (fonctionnement normal).

- Cotes de sécurité

Le graphique de la page suivante représente :

- La "sous pression naturelle", qui s'établit dans la chambre sans alimentation du puits. Le basculement est alors obtenu pour un niveau amont appelé "cote ultime de stabilité".
- La sous pression maximale qui ne peut être dépassée dans la chambre. Le basculement est alors obtenu pour un niveau amont appelé "cote minimale de fusibilité".

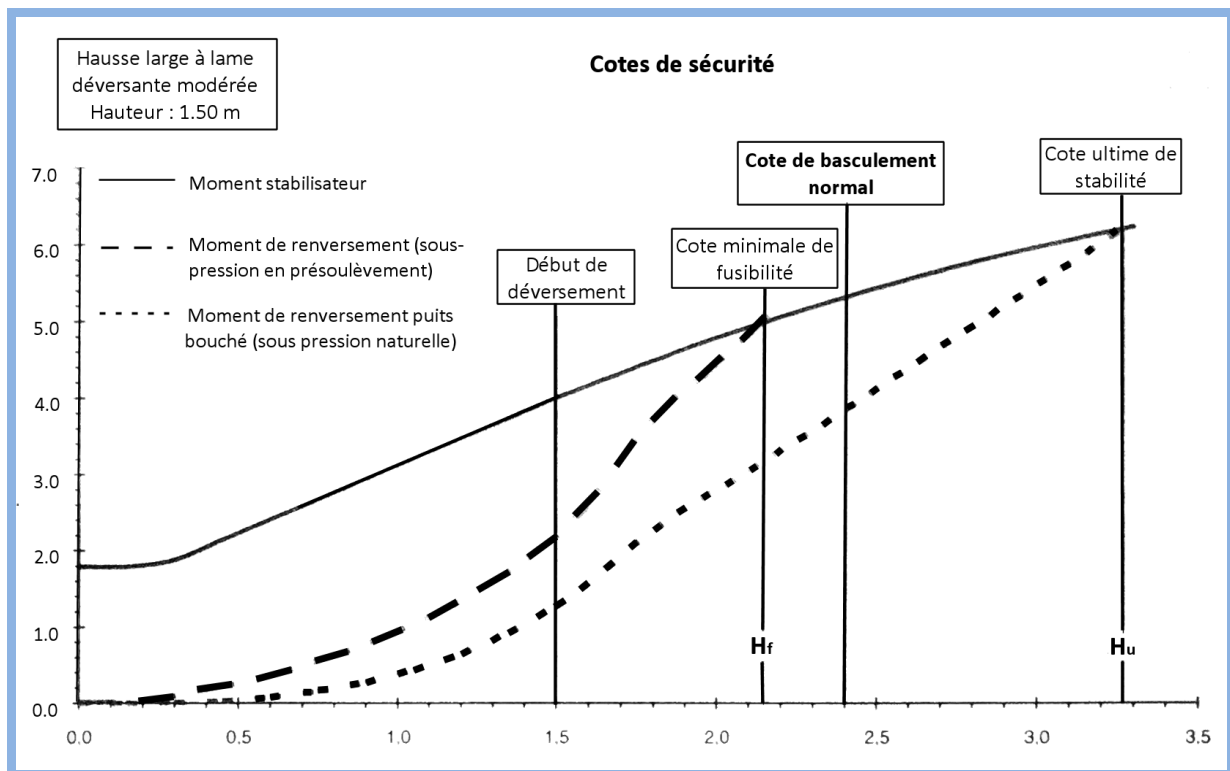


Figure (2.4.6) : courbes de stabilité caractéristiques (cotes de sécurité).

- **Dysfonctionnement**

Dans le cas de dysfonctionnements extrêmes, quand le niveau amont atteint celui correspondant au début de l'alimentation du puits, la marge de stabilité de la hausse est encore positive.

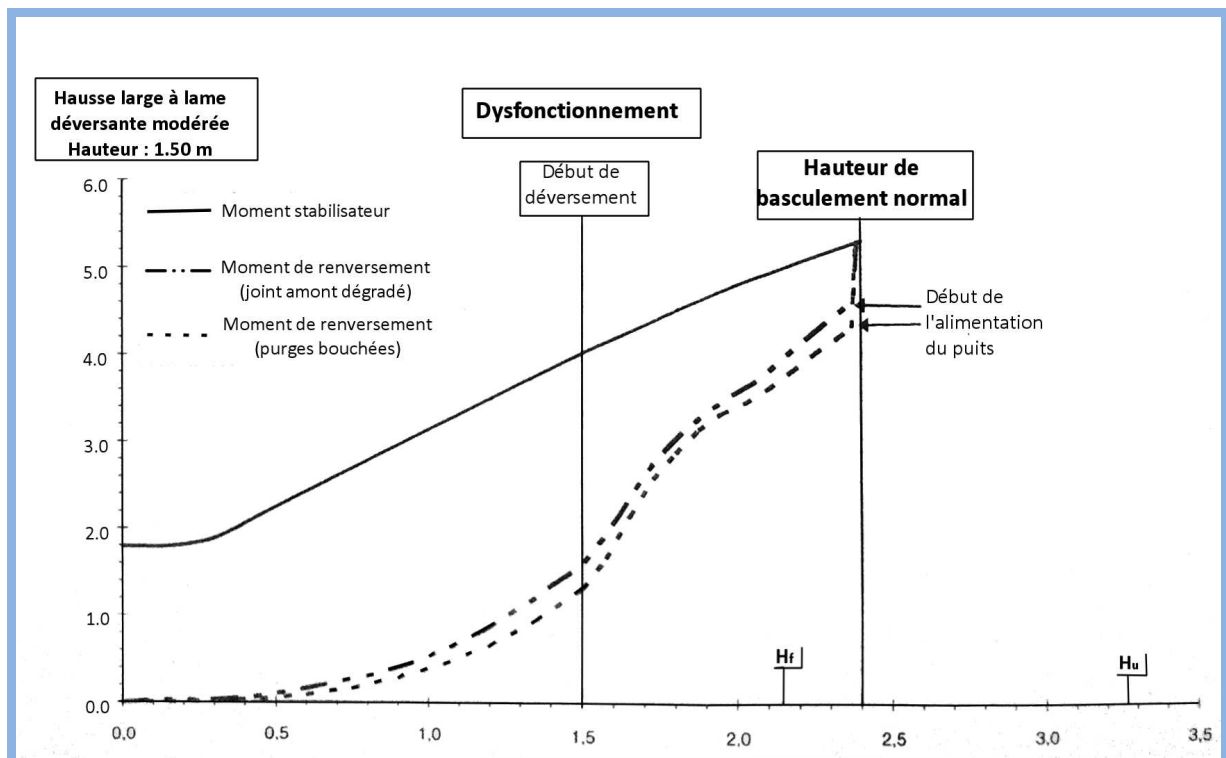


Figure (2.4.7) : courbes de stabilité caractéristiques (Dysfonctionnement).

4. Paramètres de réglage

Il existe plusieurs paramètres permettant d'optimiser ou éventuellement d'adapter à des cas particuliers la sécurité de fonctionnement des hausses.

- **Réglage des puits** : Le déversement sur le puits nécessaire au basculement est de 2 à 3% de la hauteur de la hausse. Un écart de réglage des puits de cet ordre, ou même légèrement inférieur, permet d'éviter toute possibilité d'un basculement simultané de deux hausses en fonctionnement normal, la sous pression dans la chambre augmentant rapidement avec la lame déversante au dessus du puits.

- La cote minimale de fusibilité détermine la lame versante en dessous de laquelle la hausse n'est pas fusible. Pour un niveau amont inférieur à la cote minimale de fusibilité, si la hausse entame le basculement par alimentation accidentelle du puits ou suite à un choc qui entraîne une rotation limitée de celle-ci, elle regagne une position stable.

En général, la cote minimale de fusibilité correspond à une lame déversante sur la hausse comprise entre 60% et 80% du basculement normal.

- Le lest est un facteur de réglage de cette cote de sécurité et permet d'éviter leur basculement simultané en cas de dysfonctionnement puits bouché, lorsque le réglage des puits n'a plus d'incidence. Le lestage approprié, déterminé grâce aux courbes de stabilité, permet de différencier les hausses équipant un même seuil. Cependant le maître d'ouvrage peut fixer dans une large mesure la valeur de la cote minimale de fusibilité et donc le débit de la crue correspondante.

- Cote ultime de stabilité

Beaucoup de ruptures de barrages observées sont dues à la non ouverture des vannes. La cote ultime de stabilité détermine la lame déversante pour laquelle le basculement est obtenu même si l'alimentation du puits est empêchée. Pour cette cote, la hausse bascule sous l'action de la seule poussée hydrostatique amont.

Les éléments fusibles équipant un seuil étant parfaitement indépendants, la probabilité d'avoir ce dysfonctionnement sur toutes les hausses est quasiment nulle. Cependant, selon les conditions d'exploitation et les objectifs fixés par le maître d'ouvrage, les hausses sont dimensionnées de manière à ce qu'une crue de très faible probabilité soit évacuée, même avec tous les puits (ou une grande partie) complètement bouchés, sans risque pour le barrage. Cette crue peut être la crue de projet.

V. Sécurité : conditions normales et dégradées

1. Sécurité à l'aval

La création d'une crue artificielle à l'aval d'un barrage en l'absence de crue en amont, suite à un mauvais fonctionnement de l'organe d'évacuation de crue, peut avoir des conséquences très graves sur la population à l'aval du barrage, qui n'aura pas été prévenue.

Il est donc primordial de réduire au maximum le risque de basculement intempestif d'une hausse.

L'ensemble des hausses équipant un seuil est un dispositif autonome, sans asservissement mécanique ni électrique ; le basculement d'une hausse ne nécessite aucun dispositif de manœuvre ; chaque hausse fusible est indépendante des autres, ceci réduit le risque de dysfonctionnement sur l'ensemble des hausses équipant un seuil.

2. Risque de chute de hausse sans déversement

Ce risque doit être écarté. En aucun cas, une hausse ne doit pouvoir basculer sans qu'il y ait eu déversement préalable sur cette hausse, qui constitue un signal annonciateur pour des personnes pouvant circuler à l'aval du barrage.

La vérification doit être effectuée pour le cas de fonctionnement normal de la hausse, mais aussi pour les cas de fonctionnement dégradé.

Les hausses "non déversantes" (conçues pour basculer sans déversement préalable "annonciateur") ne sont pas couvertes par la présente recommandation.

•Fonctionnement normal

On entend par fonctionnement normal, les conditions de la hausse avec ses différents dispositifs en état de fonctionnement correct (purges, puits, joints, conditions climatiques sans gel...).

Par souci de sécurité des personnes pouvant circuler à l'aval du barrage, un débit "significatif" doit déverser au-dessus des hausses avant basculement.

Il est à noter que dans les applications courantes, la plupart du temps le niveau amont est en dessous de la retenue normale et les hausses ne déversent pas. Les crues modérées conduisent à un déversement faible, sans basculement d'élément de hausse.

La comparaison du moment de stabilité avec celui de renversement montre que le coefficient de sécurité au renversement à vide, à retenue normale et pour des crues modérées est supérieur à 2. En outre, juste avant le début de l'alimentation du puits, ce coefficient est de l'ordre de 1,5.

• Fonctionnements dégradés

Les cas de fonctionnements dégradés, et leurs combinaisons possibles, doivent faire l'objet de vérifications ; il s'agit notamment du cas de dysfonctionnement avec puits bouché, avec obturation complète des purges et avec dégradation totale du joint longitudinal amont.

Même dans ce cas de dysfonctionnements extrêmes, la hausse ne doit pas basculer tant que le puits n'est pas alimenté.

L'obturation complète des purges et la dégradation totale du joint amont, qui correspondent à des conditions anormales de fonctionnement, ne doivent pas avoir d'incidence significative sur le niveau de basculement. Celui-ci doit rester très proche du niveau de basculement en fonctionnement normal et en particulier supérieur au niveau amont correspondant au début de l'alimentation du puits.

3. Comparaison des hydrogrammes de crues

• Généralités

La règle à respecter est que la présence du barrage n'ait pas pour effet d'aggraver la crue, ce qui revient en général à ce que le débit maximal à l'aval soit inférieur ou égal au débit maximal entrant dans la retenue. Mais, selon les cas, il faut également veiller à ne pas trop aggraver le gradient pendant la phase de montée de débit (qui peut être dangereux par effet de surprise) ou le volume total de la crue (dont l'effet peut être plus grave que celui du débit maximal, en cas d'inondation par exemple).

Le fonctionnement des hausses ne respectant pas ces conditions : sur débit et augmentation du gradient lors de chaque basculement, augmentation du volume de la crue par vidange de

la tranche de retenue correspondant à la hauteur des hausses (de même qu'avec des siphons-évacuateurs de crue), le projeteur devra veiller à ce que les effets correspondants demeurent compatibles avec l'importance de la crue entraînant le basculement compte tenu des usages et des installations humaines à l'aval; et que le débit à l'aval du barrage ne puisse jamais être supérieur au débit de la crue "amont", ce qui se traduit par la vérification dans l'hydrogramme des débits entrant et sortant que la valeur du débit sortant soit toujours inférieure à la valeur du débit entrant avec les différents scénarios de basculements des éléments, pour les différentes crues étudiées (jusqu'à la crue de projet).

Les fonctionnements nominaux des éléments basculant à leur cote de retenue prédéterminée respective sont examinés, ainsi que les fonctionnements dégradés, notamment :

- basculement retardé pour tous les éléments, en cas d'obturation complète des puits, pouvant par exemple résulter d'un acte de malveillance,
- basculement simultané de plusieurs éléments de hausse adjacents (enchevêtrement de corps flottants à l'amont des éléments), le basculement pouvant être soit anticipé, soit retardé.

Sur les évacuateurs de crue avec déversoir, le débit sortant est toujours inférieur ou égal au débit entrant tant que l'on n'a pas dépassé le débit de la crue de projet ; ensuite le débit sortant décroît moins vite que le débit entrant, on rencontre deux périodes :

- le débit sortant continue d'être inférieur au débit entrant,
- le débit sortant devient égal au débit entrant,
- ensuite, le débit sortant est toujours supérieur au débit entrant : quand la retenue a un laminage très faible, on a toujours : $Q_{\text{sortant}} \approx Q_{\text{entrant}}$, contrairement au cas où le laminage est important.

Pour les déversoirs équipés de hausses fusibles, lors des sur débits au moment des basculements, la variation du débit sortant est différente selon que le laminage de la retenue est faible ou significatif.

•Cas de retenue à laminage faible

On observe une courte période où Q_{sortant} peut être supérieur à Q_{entrant} ; l'effet sur l'aval est très bref, car on retrouve très vite le débit entrant.

•Cas de retenue à laminage significatif

Le débit sortant reste toujours inférieur au débit entrant, mais, en revanche, le sur débit ne s'amortit pas et il y a augmentation continue du débit en aval.

4. Risque de basculement simultané de plusieurs hausses

La conception du projet avec hausses fusibles peut aboutir au basculement simultané de plusieurs hausses pour une cote de retenue donnée ; le calcul de l'augmentation relative de débit lors de ce basculement est effectué, on vérifie qu'elle est inférieure ou égale à 30 %, pour chaque groupe de hausses.

D'autre part, et afin de ne pas créer de sur débit imprévu, l'écart de niveau de retenue entraînant le basculement de hausses de groupes différents ne doit pas être inférieur à la "précision" des hausses fusibles, augmentée d'une marge de sécurité. En règle générale, cet écart sera supérieur ou égal à 5 cm. Dans le cadre d'une étude spécifique au site menée en collaboration avec le Constructeur, une meilleure précision peut être obtenue notamment selon le mode d'alimentation en eau des puits (par exemple : puits reportés dans les bajoyers)

5. Entraînement de hausses

En cas de présence de pont (ou d'autre type d'ouvrage de franchissement) à l'aval immédiat du barrage ou de l'évacuateur de crues comportant des hausses, il y a risque en cas d'entraînement d'éléments de hausses dans le lit aval de formation d'embâcle à l'amont de ce pont, puis création d'une surcharge horizontale importante, souvent non admissible pour ces ouvrages.

VI. Facteurs extérieurs spécifiques à chaque ouvrage

Le principe de fonctionnement des hausses fusibles est basé sur la création d'un effort de renversement important pour un niveau amont prédéterminé, en mettant en charge la chambre par alimentation du puits. Cela permet de dimensionner les hausses fusibles avec une marge de stabilité importante tant que le puits n'est pas alimenté. Les hausses ont ainsi une grande sécurité de fonctionnement vis à vis des efforts que peuvent induire des facteurs extérieurs spécifiques à chaque site, tels que les chocs, les vagues pouvant se développer dans la retenue, les corps flottants, la sismicité et l'effet de la glace en zones montagneuses ou dans les pays à climat froid.

1. Chocs

Les chocs à prendre en compte dépendent des sites, mais aussi pour chaque site du niveau d'eau dans la retenue. Avant déversement ou pour de très faibles déversements, dans certains sites et en l'absence de protection, les hausses peuvent être soumises aux chocs de bateaux à moteurs (vitesses élevées). Durant les crues, dans le cas où les puits sont implantés sur les hausses et si aucun passage pour les corps flottants n'est aménagé, les hausses peuvent être soumises aux chocs de corps flottants amenés par les crues et qui viennent buter sur les puits (vitesses faibles et du même ordre que celle de l'écoulement).

Le risque potentiel est constitué par le basculement anticipé : la hausse risque de basculer pour une cote de retenue inférieure à la cote prévue.

Hydroplus a fait réaliser des essais sur des hausses modèle réduit de 0,40 m de hauteur, dans des conditions très conservatrices, où l'amortissement des chocs par la déformation de la hausse ou de la masse qui la heurte est quasiment nul. Ces essais ont montré qu'en général, les chocs qu'on peut rencontrer dans les réservoirs de barrages n'affectent pas la stabilité des hausses.

Il convient néanmoins de faire préciser au Constructeur le choc maximal admissible (tableau des masses et vitesses des corps flottants) pouvant entraîner le basculement d'un élément

de hausse (pour différentes hauteur de retenue). Le projeteur vérifiera la probabilité de tels chocs dans le cas de la retenue concernée :

- corps flottants (sans vitesse par rapport à l'écoulement),
- embarcation à moteur (avec une certaine vitesse par rapport à l'écoulement).

2. Vagues

Dans les retenues de grande surface, sous l'effet de vents importants, il peut arriver que la direction des vagues soit déviée par rapport à l'axe amont / aval du déversoir : on doit vérifier qu'il n'y a pas de risque d'entonner des débits suffisants (par la face latérale des puits) pour amorcer un basculement anticipé de la hausse.

L'incidence des vagues sur les hausses fusibles a fait l'objet de campagnes d'essais sur modèles réduit, d'abord au laboratoire national d'hydraulique à Chatou (LNH, EDF / DER), puis récemment au laboratoire de l'université du Colorado à Fort Collins aux Etats-Unis. Cette dernière campagne d'essais a été réalisée en tenant compte des recommandations contenues dans le bulletin 91 du CIGB concernant les vagues pouvant se développer dans les réservoirs de barrages.

Ces essais ont montré que les vagues qu'on peut rencontrer dans les réservoirs de barrages n'ont pas d'incidence significative sur le fonctionnement des hausses fusibles. En effet, le basculement d'une hausse fusible ne peut se produire qu'avec l'association d'un niveau dans la retenue égal au niveau de basculement et d'une alimentation continue du puits suffisante pour créer la charge dans la chambre nécessaire pour le basculement.

Les puits des hausses sont équipés d'un chapeau qui entraîne une limitation du débit d'alimentation même quand la crête des vagues dépasse largement le niveau du puits. En outre, l'alimentation du puits due à de telles vagues est discontinue. Grâce aux purges aval, la charge dans la chambre qui en résulte est nettement insuffisante pour entraîner le basculement.

Au vu des essais réalisés au LNH, pour une houle perpendiculaire au seuil, les paramètres à considérer sont : l'amplitude des vagues (hauteur) et la demi-période des vagues (longueur).

En s'appuyant sur le retour d'expérience de l'exploitant sur l'importance des vagues sur la retenue (cas d'un barrage existant), ou par un calcul théorique plus ou moins poussé, il est possible d'estimer la hauteur des vagues pouvant se former sur une retenue.

Au vu de ces éléments, on peut être amené à tenir compte de l'effet des vagues, en définissant une cote minimale d'entrée des puits en tenant compte de la cote de R.N., augmentée de la hauteur des vagues et d'une revanche de sécurité.

3. Corps flottants

Sauf en haute montagne, les cours d'eau présentent du charriage, à des degrés divers. Ce phénomène augmente considérablement en cas de crue (et avec le temps de retour de la crue : le cours d'eau "nettoie" les rives lors de la crue).

Pour apprécier le charriage du cours d'eau au droit du barrage concerné, la consultation des archives de l'exploitant est d'un grand intérêt (clichés lors de crues, estimations quantitatives et qualitatives des corps flottants) :

- pour un projet d'ajout de hausses sur un barrage existant : il s'agit des archives relatives au barrage concerné,
- pour un projet de barrage sur lequel on étudie une variante avec hausses fusibles : il s'agit des archives de barrages voisins sur le même cours d'eau.

Dans le cas où ces archives sont anciennes, on considérera les changements ayant pu se produire à l'amont, et susceptibles de modifier le charriage (création ou disparition d'exploitations forestières ...).

On recherchera à éviter une géométrie pouvant favoriser le coincement de corps flottants (raidisseurs ...).

Des essais réalisés au Laboratoire de la Tennessee Valley Authority ont montré que des corps flottants peuvent s'accumuler devant les hausses labyrinthes en cas de faibles lames déversantes, sans avoir une influence significative sur la loi hauteur / débit. Quand la lame déversante augmente, ces corps flottants sont en grande partie évacués, le seul obstacle étant constitué par les puits des hausses. L'accumulation (importante) de corps flottants

peut entraîner une augmentation de la poussée hydrostatique amont, mais celle-ci affecte peu la stabilité de la hausse, dont la marge de stabilité reste importante tant que le puits n'est pas alimenté.

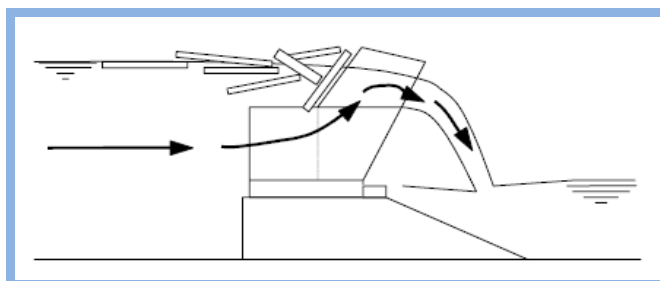


Figure (2.6.1) : l'effet des corps flottants sur le déversement.

- Charriage modéré

En cas de risque de charriage "modéré", il convient de mener une étude particulière, du fait de l'absence de preuve irréfutable (retour d'expérience) sur l'influence de l'accumulation de corps flottants risquant de se former avec des hausses standards.

Le risque est une perte de précision du basculement (ce dernier est soit retardé, soit anticipé). En cas de basculement retardé, le risque peut être un basculement simultané d'éléments adjacents "poussés" par un embâcle amont, se traduisant à l'aval par une augmentation soudaine et importante de débit, dangereuse pour la population à l'aval.

L'implantation des puits dans les bajoyers du déversoir, ou l'utilisation d'un puits implanté dans une hausse pour alimenter les chambres de plusieurs hausses, permettent de réduire considérablement l'accumulation des corps flottants devant les hausses.

Une autre solution consiste à installer une drome à l'amont pour diriger les corps flottants vers un organe d'évacuation de surface apte à les évacuer efficacement :

- clapet,
- boudin gonflable,
- série de hausses fusibles dépourvues de puits, de labyrinthe en crête et de toute structure à l'amont susceptible de bloquer des corps flottants.



Figure (2.6.2) : capture des corps flottants à l'aide d'une drome.

- Charriage important

L'efficacité des dromes étant discutable en cas de risque de charriage important, l'emploi de hausses fusibles déversantes, du type labyrinthe est alors déconseillé, dans l'état actuel.

4. Séismicité

Un séisme peut provoquer un basculement anticipé de hausses :

- pendant le séisme (du fait de la modification des moments en présence)
- après le séisme, si le séisme a eu pour effet de déplacer les hausses sur le seuil, et que ces hausses n'ont pas repris leur emplacement initial : un pré soulèvement des hausses est possible (ce qui peut entraîner une fuite du joint horizontal amont).

Les conséquences de ce basculement anticipé ne concernent pas la sécurité du barrage proprement dit, mais celle des populations à l'aval, du fait de la crue artificielle générée (on doit noter qu'avec un plan d'eau à la cote de R.N. le basculement simultané de tous les éléments génère une "crue" artificielle de débit pouvant atteindre au départ 70 % du débit de la crue de projet, et dont la durée dépend de la capacité stockée par les hausses). En outre, ce basculement anticipé est néfaste sur le plan économique, du fait de la perte de la tranche d'eau stockée par les hausses.

Dans tous les cas, pour traiter le cas d'un séisme survenant sur un barrage équipé de hausses lorsque la retenue est à la cote de R.N on effectuera la vérification suivante :

les hausses étant simplement posées au sommet du barrage, il faut s'assurer que les accélérations en crête (horizontale et verticale) ne compromettent pas leur stabilité, notamment dans les phases où le soulèvement permet à la sous-pression de s'appliquer sous les éléments ; on calculera la stabilité en prenant le plan d'eau à la cote de R.N. définitive, comme pour un barrage classique.

Selon l'importance du barrage (en termes de risque) et de la sismicité, on tiendra compte dans le dimensionnement des hausses du moment de basculement créé par les accélérations dues au séisme de projet.

Pour les sites concernés par une sismicité notable, il est préconisé :

- pour les crues modérées : de réduire la hauteur des hausses afin d'augmenter la marge de sécurité au séisme,
- pour les crues exceptionnelles : de ne pas considérer simultanément la "cruve exceptionnelle" et le "séisme" à condition que la consigne d'exploitation prévoie une visite attentive des hausses après chaque séisme important, et leur remise en place éventuelle.

• Détermination des charges sismiques

Les charges additionnelles résultant du séisme sont les suivantes :

$$F_h = a_h \cdot g \cdot W$$

Avec

F_h : force horizontale appliquée au niveau du centre de gravité de la hausse due à la composante horizontale de l'accélération.

a_h : Composante horizontale de l'accélération sismique.

W : Poids total de la hausse.

g : Accélération gravitaire.

$$F_v = a_v \cdot g \cdot W$$

Avec

F_v : force verticale appliquée au niveau du centre de gravité de la hausse due à la composante verticale de l'accélération sismique.

a_h : Composante verticale de l'accélération sismique.

P_z : pression additionnelle due au volume d'eau mis en mouvement du fait du séisme.

Pression hydrodynamique est calculée grâce à la formule de WESTERGAARD.

$$p_z = 0,875 \cdot a_h \cdot g \cdot \rho_e \cdot H^{1/2} \cdot Z^{1/2}$$

Avec

H' : Profondeur de l'eau à l'amont du déversoir.

Z : Profondeur de la pression dynamique recherché.

La distribution de la pression varie le long de la profondeur de la hausse telle qu'elle est nulle au niveau de la crête et est maximale au niveau du pied de la hausse.

La force hydrodynamique est :

$$P_z = \int_0^L p_z \, dS \quad \text{tel que : } dS = L \cdot dz$$

Avec

L : Largueur de la hausse.

$$P_z = \int 0.875 \cdot a_h \cdot g \cdot \rho \cdot H^{1/2} \cdot Z^{1/2} \cdot L \cdot dz$$

$$P_z = 0.583 \cdot a_h \cdot g \cdot \rho \cdot H^{1/2} \cdot Z_h^{3/2} \cdot L$$

Le moment résultant de cette force mesure depuis la face amont est :

$$M(P_z) = \int P_z \cdot dS$$

$$M(P_z) = \int P_z \cdot L \cdot dz$$

$$M(P_z) = 0,35 \cdot a_h \cdot g \cdot \rho \cdot Z_h^{5/2} \cdot L \cdot H^{1/2}$$

Analyse de l'action sismique

La hausse est considérée stable lorsque le facteur de sécurité qui est le rapport entre le moment stabilisant et déstabilisant soit supérieur à 1.

Le moment déstabilisant lors d'un séisme est obtenue on additionnant les charges sismiques au moment déstabilisant. Qui est alors compare au moment de stabilité.

5. Glace

Le gel peut perturber le basculement normal des hausses :

- soulèvement amont des hausses par la poussée de la glace (risque : mise en sous pression de la chambre avant alimentation du puits),
- en cas de déversement faible sur les hausses en période de gel : formation d'une "poutre" de glace sur la partie aval du socle, risquant de boucher les purges des éléments (risque de basculement légèrement anticipé et de liaisonner des éléments de hausse adjacents, ce risque de basculement est retardé ou anticipé).

Les documents relatifs à l'exploitation des hausses doivent préciser les dispositions à prendre pour éviter ces risques, par exemple maintenir le niveau de la retenue à un niveau nettement inférieur à celui du seuil sur lequel reposent les hausses.



Figure (2.6.3) : hausses fusibles en Russie.

Des essais sur modèles réduits de 0,60 m de hauteur ont été réalisés à St John's au Canada, pour un modèle standard de hausses labyrinthe et pour des hausses spécialement conçues pour des utilisations dans des climats très froids, appelées "Hausses glace".

Dans les cas courants, en période froide, les réservoirs des barrages ne sont pas pleins. Cependant, dans certaines régions, les réservoirs peuvent être pleins pendant les périodes de grand froid. Plusieurs types d'actions de la glace sur les hausses ont été étudiés :

- Poussée thermique en cas de variation de température,
- Variation du niveau dans la retenue, la glace étant adhérente aux hausses.

L'effet de la poussée thermique est très réduit par la flexibilité des hausses fusibles et surtout par le fait que celles-ci peuvent très légèrement pivoter (déplacement horizontal de l'ordre du cm en crête des hausses) sans basculer et absorber ainsi une grande partie de la dilatation thermique de la glace. La rotation de la hausse dépend beaucoup des caractéristiques du réservoir (dimensions, nature des rives, etc.)

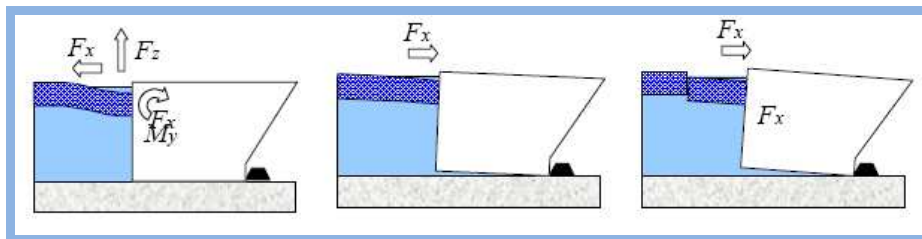


Figure (2.6.4) : Poussée thermique

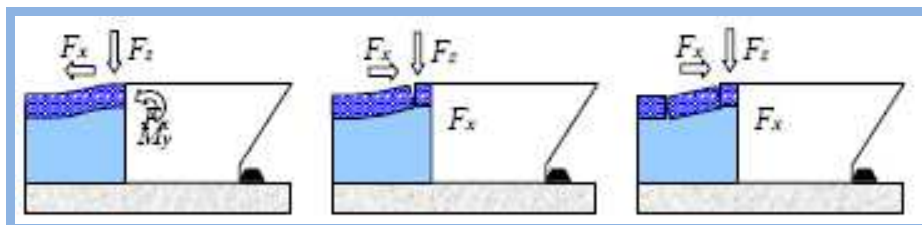


Figure (2.6.5) : Variation du niveau dans la retenue, la glace étant adhérente aux hausses.

En cas de variation du niveau de la retenue, on observe une rupture en flexion de la couche de glace au droit du contact hausses / glace, les hausses étant stables.

Cette campagne d'essais a permis de définir pour chaque hauteur de hausses labyrinthes ou hausses glace, l'épaisseur de glace en dessous de laquelle elles peuvent être utilisées en toute sécurité. Ceci est pris en compte dans le dimensionnement des hausses pour chaque application.

L'action de mouvement de blocs de glace peut être assimilée à des chocs de très faibles vitesses et n'a pas été spécialement traitée dans cette campagne d'essais. Une campagne

d'essais a été réalisée, au Laboratoire Hydraulique de L'institut de Recherche pour les Structures de l'Energie à Moscou, afin d'étudier en détail ce dernier point.

6. Type de barrage

Selon le type de barrage, le risque en cas de déversement au dessus du barrage est différent, il peut conduire à la ruine pour un barrage en remblai.

La probabilité de ce déversement doit être calculée précisément, à partir de l'hypothèse du dysfonctionnement d'une partie ou de la totalité des éléments de hausse (ce dysfonctionnement correspondant à la superposition plausible de situations combinées : puits bouchés ...).

• Cas des barrages en remblai

Par principe, on devra dimensionner les hausses pour qu'en cas de puits totalement bouchés (basculement retardé), elles puissent basculer avant que la cote de l'eau n'ait atteint - 30 cm par rapport :

- au sommet du noyau pour les barrages à noyau,
- au sommet du masque amont pour les barrages à parement amont étanche.

• Cas des barrages en béton

Par principe, on devra dimensionner les hausses pour qu'en cas de puits totalement bouchés (basculement retardé), elles puissent basculer avant que la cote de l'eau ne dépasse la cote limite de stabilité du barrage.

7. Qualité des prévisions de crues

En cas de doute sur la validité de l'étude de crue, et pour un barrage sensible au déversement (en cas de dépassement de la cote de retenue prévue pour la crue de projet), il conviendra de sur dimensionner le dispositif.

8. Conditions topographiques particulières du site

• Caractéristiques hydrauliques à l'aval

L'emploi des hausses fusibles est déconseillé dans les cas pour lesquels on peut craindre un coincement d'éléments de hausse à l'aval immédiat de l'ouvrage, pouvant amener à son obstruction par l'apport de corps flottants, notamment :

- évacuation des crues via une galerie ou un canal étroit,
- évacuateur en tulipe.

La prudence s'impose également en cas de canal à faible pente, en effet :

- dans l'état actuel des connaissances, une grande dispersion existe sur la détermination du phénomène d'entraînement d'une hausse dans le lit aval.
- une dispersion des résultats a été notée lors des essais hydrauliques sur modèles réduits, dans un canal à fond horizontal et lisse,
- les conditions réelles (écoulement torrentiel, fond du lit aval plus ou moins rugueux, corps flottants) ont un fort impact.

• Déversoir déporté sur une rive

Si les hausses sont installées sur un déversoir déporté sur une rive, il convient de prendre en compte l'inclinaison latérale de la nappe d'eau à l'amont immédiat du déversoir (lors du déversement) : la hauteur de retenue considérée pour chaque élément doit tenir compte de cette singularité (sinon, il peut y avoir un risque de perturbation de l'ordre théorique de basculement des hausses).

Si nécessaire, une étude hydraulique sur modèle réduit peut permettre d'apprécier, au moins qualitativement, ce phénomène (la précision atteinte sur les mesures de niveau n'est pas toujours compatible avec la différence de niveau de la retenue entraînant le basculement des différents éléments de hausse).

VII. Exploitation et entretien

1. Hausses en place sur le seuil

L'attention est attirée sur la nécessité de disposer de moyens d'accès piétonniers à l'aval (existants ou à créer). Ces circulations sont nécessaires pour les opérations d'exploitation (après un déversement) et pour les opérations d'entretien.

En cas d'impossibilité (exemple : cas de grands barrages-voûtes), l'exploitant pourra recourir à des entreprises spécialisées dans les travaux à grande hauteur ; il perd alors cependant la possibilité d'intervenir de façon non programmée (lors de passage de crues avec déversement).

Pour l'entretien, on peut étudier :

- une conception des purges et du puits permettant de vérifier facilement la non obstruction des purges (exemple : choix d'une purge unique implantée dans l'axe du puits ...)
- un dispositif fiable et durable permettant de soulever les éléments de hausse lors des opérations de maintenance périodiques (exemple : cric ou vérin plat...).

Cette recommandation ne traite pas de façon détaillée l'exploitation et l'entretien des hausses fusibles : le guide d'exploitation devra être élaboré pour chaque projet sur la base des recommandations du Constructeur : vérification de la non obturation du puits et des purges, de l'état des joints ...

2. Hausses ayant basculé

D'une façon générale, les dégradations des hausses ayant basculé risquent d'être trop importantes pour que leur remise en état soit rentable en comparaison avec leur remplacement par des hausses neuves (notamment du fait des déformations "plastiques" des auges en tôle, et éventuellement des dégradations du socle).

Dans le cadre d'un projet de barrage neuf, il pourra être judicieux de prévoir un portique de manutention des hausses, utilisé lors de la première mise en place des hausses, et lors de la remise en place de hausses neuves après un basculement.

3. Variation de la cote et augmentation du volume de la crue

En cas de basculement d'au moins un élément, les hausses présentent l'inconvénient d'augmenter le volume de la crue, par rapport à un évacuateur de crues classique tel qu'un déversoir simple, des vannes ou des clapets (l'augmentation de volume correspond à la différence de cote entre la nouvelle R.N. et le socle). Cet inconvénient est proportionnellement plus important pour des crues modestes que pour une crue voisine de la crue de projet.

Pour chaque projet, le Projeteur analyse les conséquences de cette augmentation de volume de la crue, et leur niveau d'acceptabilité.

La variation de la cote de retenue est la suivante :

- augmentation, depuis la cote de la nouvelle R.N. jusqu'à la cote de basculement de la hausse
- puis diminution progressive jusqu'à atteindre la cote du seuil sur lequel sont disposées les hausses.

L'amplitude de cette variation est, en général, supérieure à celle constatée lors du passage de la même crue sur un déversoir simple.

Enfin, la retenue ne pourra être rétablie à la cote de la nouvelle R.N. que quand la hausse ayant basculé aura été remise en place.

Ces deux points constituent des inconvénients des hausses fusibles, il appartient au projeteur d'analyser les conséquences de l'augmentation de volume de la crue et de la perte de la tranche utile en considérant la périodicité de la crue retenue pour le premier basculement.

4. Protection anticorrosion

Pour les hausses comportant des parties ou des fixations métalliques, les choix pris engagent la pérennité des hausses et le coût d'entretien à terme de ces systèmes : la protection anticorrosion doit donc être étudiée précisément lors du projet :

- définition de la garantie requise (critères, durée)
- "réparabilité" des procédés retenus : faisabilité sur des hausses en place, nécessité d'enlèvement des hausses, remplacement de parties de hausses ...
- recherche de risque d'apparition de phénomènes de corrosion galvaniques (acier inoxydable / acier noir, caoutchouc / acier inoxydable ...). La liste des exemples cités n'est pas exhaustive, et d'autre par, un choix approprié des nuances des matériaux cités peut permettre d'éviter ces problèmes.

On se réfère à la Recommandation X-MA-05-03, en assimilant les parties en acier des hausses à des vannes de barrages immergées ou semi-immergées.

5. Possibilité de surélévation ultérieure

Dans certains cas, en particulier quand les documents administratifs le permettent, il pourra être opportun de prévoir un système de hausses susceptibles de permettre une surélévation ultérieure aisément réalisable (avec ou sans modification de la P.H.E.). Dans le cas de rehaussement de la P.H.E., on déterminera si une étude complémentaire globale de l'ouvrage est nécessaire (visant notamment à vérifier : la stabilité de l'ouvrage, la capacité des organes de vidange ...).

VIII. Champ d'application

Les hausses fusibles peuvent être utilisées sur des barrages nouveaux ou anciens pour améliorer la sécurité des évacuateurs de crues.

1. Barrages anciens

L'évolution des connaissances hydrologiques et des méthodes de détermination des crues conduisent dans beaucoup de cas à une révision à la hausse de la crue de projet et à la nécessité d'augmenter la capacité de l'évacuateur. L'utilisation des hausses fusibles permet d'augmenter la capacité d'un évacuateur de crues à seuil libre, de manière économique et sûre, sans réduire la capacité de stockage de l'ouvrage. Ceci est réalisé en abaissant le niveau initial du seuil et en installant des hausses fusibles qui permettent de récupérer un niveau de retenue normale supérieur ou égal au niveau initial. Pour une crue exceptionnelle, ces hausses basculent l'une après l'autre et libèrent ainsi la section nécessaire pour évacuer la crue.

Hydroplus a réalisé plusieurs opérations de ce type, dont on peut citer notamment l'augmentation de la capacité de l'évacuateur de crues du barrage de SHONGWENI en Afrique du Sud, de 1500 à 5000 m³/s

L'augmentation des besoins en eau conduit souvent des propriétaires d'ouvrages (essentiellement de faibles dimensions) à essayer d'augmenter la capacité de stockage de la retenue.

L'augmentation de la capacité de stockage et l'accroissement de la capacité de l'évacuateur de crue peuvent être combinées dans une même application.

2. Barrages nouveaux

Pour des barrages nouveaux, l'utilisation des hausses fusibles permet de concilier l'optimisation de la capacité de stockage et la sécurité du barrage. Elle offre une sécurité de fonctionnement proche de celle des évacuateurs à seuil libre (fonctionnement sans

énergie et sans présence de personnel lors des crues). En outre, par rapport à un seuil libre, elle permet de concevoir des évacuateurs de crues deux à trois fois plus courts et donc beaucoup plus économiques et faciles à implanter.

Pour les très grands barrages où une régulation très fine de la retenue est nécessaire, une association de vannes (correspondant à environ 1/3 de la capacité de l'évacuateur) et de hausses fusibles ne basculant que pour des crues de très faible probabilité est très attrayante. Elle permet de concilier sécurité, optimisation de la gestion de la retenue et économies dans la construction. Les vannes permettent l'évacuation des crues moyennes et la gestion du niveau de la retenue. Les hausses sont dimensionnées pour basculer pour des crues très importantes (à partir de la crue de 100 ans par exemple). Elles peuvent aussi pallier une non ouverture éventuelle des vannes.

Les hausses fusibles droites non déversantes peuvent être utilisées sur des évacuateurs de crues au lieu des digues fusibles, en offrant plusieurs avantages :

- Déclenchement sûr et précis ;
- Basculement progressif ;
- Grande sécurité (stabilité) avant la cote de déclenchement.

IX. Méthode de dimensionnement

1. Performances hydrauliques des hausses fusibles

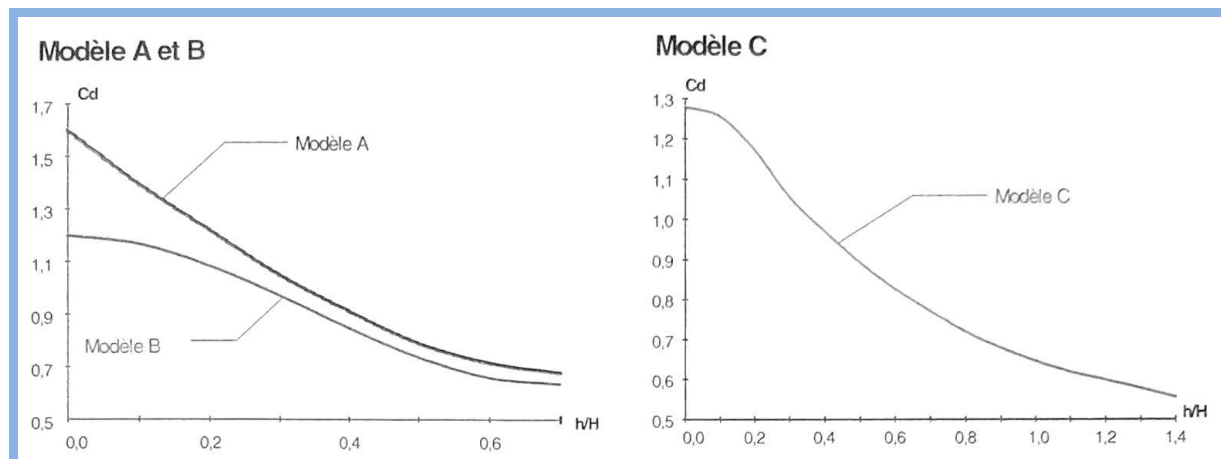


Figure (2.9.1) : coefficient de débit pour les trois types de hausse labyrinth.

Des essais sur modèles réduits hydrauliques ont permis de déterminer les caractéristiques hydrauliques des hausses à crête labyrinth.

Le coefficient de débit dépend du type de hausse et du rapport de la lame déversante h sur la hauteur des hausses.

La forme labyrinth permet d'évacuer les débits sous des faibles hauteurs car la longueur développée par la crête est supérieure à celle du seuil. Mais cette propriété est perdue lorsque la lame déversante devient importante et que la forme labyrinth devient comparable à un seuil rectiligne.

Mais pour les hausses rectilignes destinées à supporter de très fortes lames le coefficient d'écoulement est optimal lorsque la face amont est profilée de manière à épouser l'écoulement. Le profile de la face contribue à éviter la création de zones cavitation sur le seuil déversant.

Le débit évacué par un seuil équipé de hausses labyrinthe est :

$$Q = C_d L (2g)^{1/2} h^{3/2}$$

avec :

C_d : Coefficient de débit.

Celui-ci dépend du type des hausses et du rapport de la lame déversante **h** à la hauteur des hausses **H**.

h : Lamme déversante par rapport à la crête des hausses (en m).

L : Longueur rectiligne du seuil (en m), la longueur développée de la crête des hausses labyrinthe étant environ 3 à 4 fois supérieure.

g : Accélération de la pesanteur (m/s²).

Les deux graphes ci-dessus représentent la variation du coefficient de débit **C_d** en fonction du rapport **h/H**, pour différents types de hausses labyrinthe.

2. Augmentation de la capacité d'un barrage existant

L'augmentation de la capacité de stockage par installation de hausses fusibles sur le seuil libre d'un barrage existant constitue une solution simple, économique et sûre, pour répondre à un besoin en eau.

Les hausses à crête labyrinthe sont généralement utilisées pour ce type d'application. Elles permettent d'évacuer les crues modérées sous une hauteur de lame déversante réduite.

La possibilité de surélévation du niveau de la retenue normale d'un barrage existant dépend du taux d'écrêtement de la crue de projet par celui-ci (rapport entre les débits de pointe de la crue sortante et de la crue entrante).

Cette surélévation est maximale quand le barrage est peu excréteur.

Les principaux paramètres dont dispose le concepteur pour le dimensionnement du projet de surélévation sont :

- le type et la hauteur de la hausse,
- la hauteur de déroasement du seuil,

- le débit de la crue entraînant le premier basculement et la période de retour correspondante,
- l'échelonnement des basculements.

La surélévation du niveau de la retenue normale est égale à la hauteur de la hausse diminuée de celle du dérasement du seuil.

EXEMPLE D'APPLICATION : LUSSAS (Ardèche en France) 1991

La crue de projet de ce barrage peu excréteur est de 550 m³/s, le seuil a une longueur L de 42 m et évacue cette crue sous une lame déversante de l'ordre de 3,3 m.

Dérasement du seuil

Le dérasement du seuil est déterminé de manière à évacuer la crue de projet, une fois toutes les hausses basculées, sans augmenter le niveau des plus hautes eaux.

La hauteur de dérasement H_d , pour un barrage peu excréteur, est d'environ 6 à 8% de la lame déversante maximale sur le seuil avant installation des hausses.

	Rapport dérasement/ h_{max}
Etroite entonnoir bas (NLH)	10-12%
Large entonnoir bas (LLH)	6-8%
Large entonnoir élevé (LHH)	15-18%

Tableau (2.9.1) : Rapport dérasement/lame déversante maximale en fonction du type de hausse.

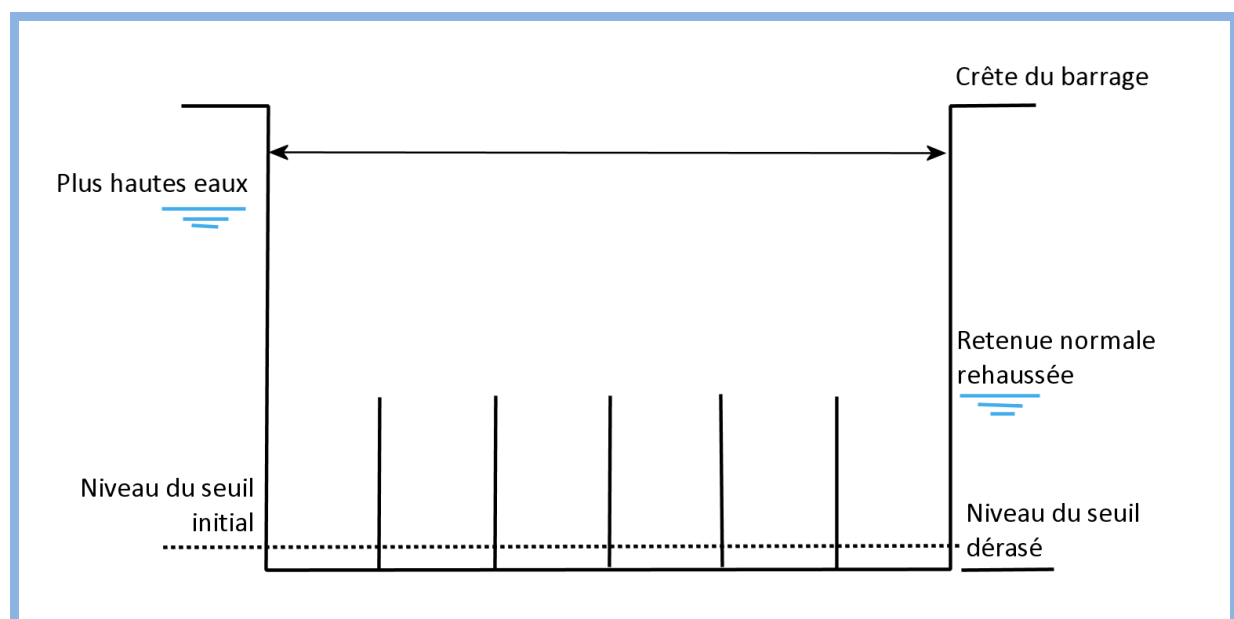


Figure (2.9.2) : l'impacte des hausses fusibles.

Dans le cas présent : $H_d = 0,2$ m.

Echelonnement des basculements

La différence entre les niveaux du premier et du dernier basculement est en général supérieure à 10% de la hauteur de la hausse.

Les paramètres restant à définir sont la hauteur de la hausse H , son type et le débit de la crue Q_1 entraînant le premier basculement.

Plus le gain de stockage est Important, moins la période de retour du premier basculement est grande.

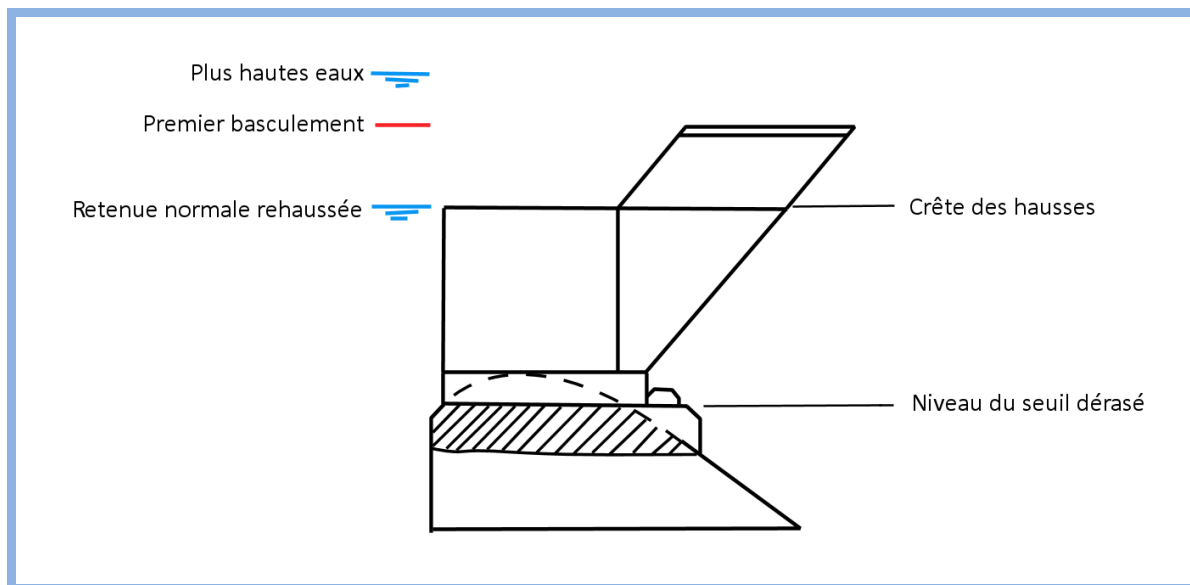


Figure (2.9.3) : les principaux niveaux d'eau après l'installation des hausses fusible.

Le concepteur choisit comme débit de la crue entraînant le premier basculement :

$$Q_1 = 150 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le coefficient de débit C_d est donné par le diagramme de la figure (2.9.1).

Une solution consiste à utiliser des hausses du type A :

Hauteur $H = 2,15 \text{ m}$

Lame déversante avant le premier basculement $h = 1,05 \text{ m}$

$$h/H = 0,5$$

$$C_d = 0,76$$

$$Q = C_d L (2g)^{1/2} h^{3/2} = 152 \text{ m}^3/\text{s}$$

	Rapport largeur/hauteur
Etroite entonnoir bas (NLH)	1.0 (+/- 5%)
Large entonnoir bas (LLH)	1.5 (+/- 5%)
Large entonnoir élevé (LHH)	1.8 (+/- 5%)

Tableau (2.9.2) : Rapport largeur/hauteur en fonction du type de hausse.

Le type et la hauteur des hausses permettent de les définir entièrement et de déterminer en particulier leur largeur et donc leur nombre.

Niveaux des basculements mesurés par rapport à la base des hausses :

Premier basculement H_{b1}

$$H_{b1} = 2,15 + 1,05 = 3,2 \text{ m}$$

Dernier basculement (PHE) H_{bf}

$$H_{bf} = 3,3 + 0,2 = 3,5 \text{ m}$$

L'augmentation du niveau de la retenue normale est :

$$D_H = 2,15 - 0,2 = 1,95 \text{ m}$$

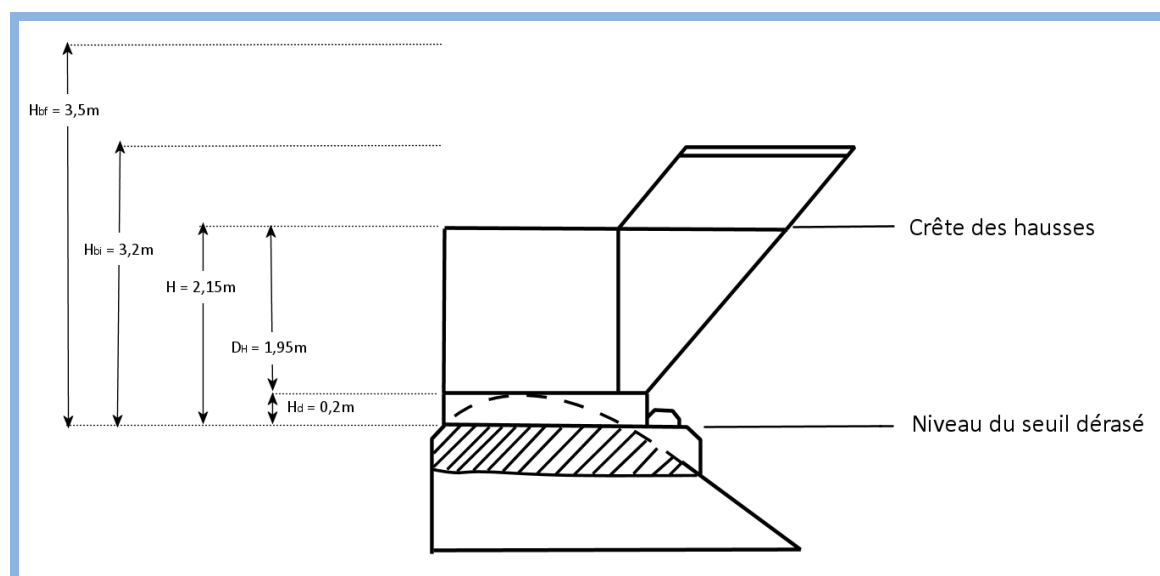


Figure (2.9.4) : les différentes hauteurs calculées des hausses du barrage de LUSSAS (Ardèche en France) 1991.

Celle-ci représente environ 60% de la tranche d'eau perdue avant installation des hausses.

La figure (2.9.5) montre l'évacuation de la crue de projet avec le seuil équipé des hausses.

Si le concepteur souhaite un gain de capacité de stockage supérieur, il peut utiliser des hausses de plus grande hauteur, le premier basculement se produisant alors pour une crue inférieure à $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

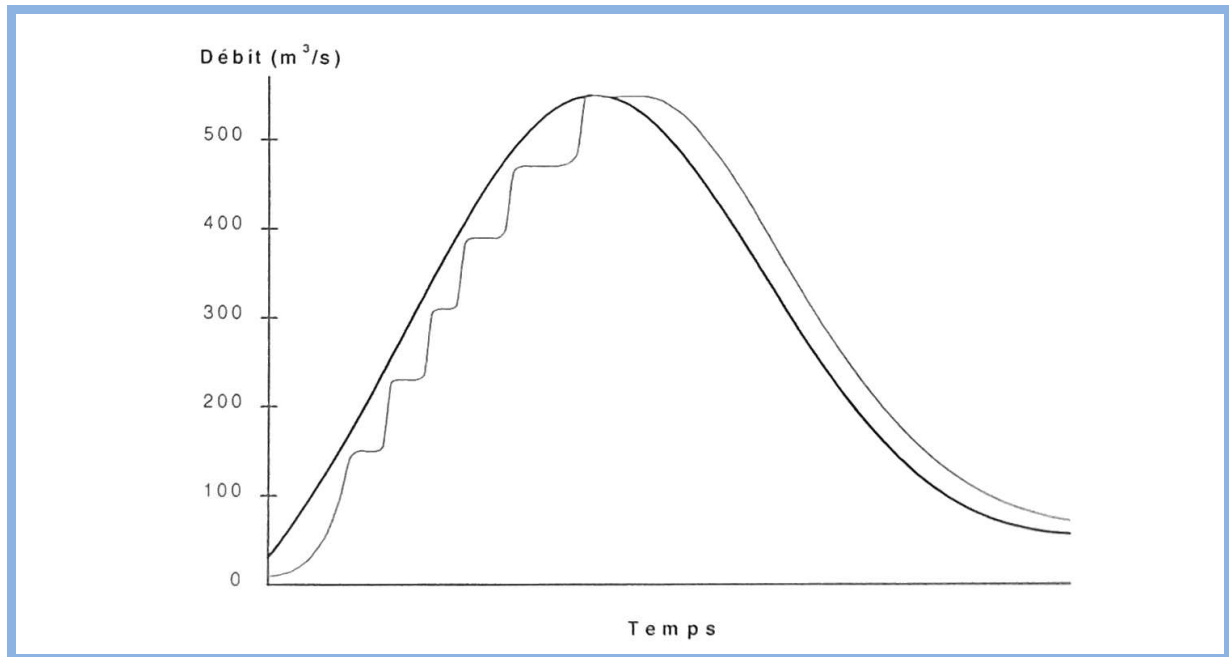


Figure (2.9.5) : hydrogramme du débit aval avec et sans hausses fusibles.

3. Amélioration de la sécurité d'un barrage existant

Le contrôle des crues est un élément essentiel de la sécurité des barrages

L'évolution des méthodes d'estimation de la crue de projet conduit dans beaucoup de cas à réévaluer la capacité nécessaire des évacuateurs.

L'utilisation des hausses fusibles permet de mettre en conformité les évacuateurs de crues initialement sous estimés, de manière économique, sans perte de capacité de stockage hormis en cas de crue provoquant le basculement d'au moins une hausse, et avec une sécurité de fonctionnement proche de celle des évacuateurs à seuils libres.

EXEMPLE D'APPLICATION : SHONGWENI (Afrique du sud) 1994

L'évacuateur de crues du barrage était initialement dimensionné pour un débit maximal de 1 500 m³/s.

Une révision de l'étude hydrologique a montré que la capacité nécessaire de l'évacuateur devait être de 5 000 m³/s.

Afin d'évacuer un tel débit pour un niveau amont maximal avec lequel la sécurité du barrage est satisfaisante (niveau fixé après une analyse de la stabilité de l'ouvrage), la crête du seuil devait être abaissée d'environ 6,5 m sur toute sa longueur.

La solution de base consistait à dégrader le seuil de 6,5 m et à l'équiper de hausses labyrinthe de la même hauteur.

Dans la solution retenue, le seuil a été abaissé de 7,9 m sur environ les 3/4 de sa longueur où le dérasement ne présentait pas d'inconvénient majeur. Il a été équipé sur cette zone de hausses labyrinthe du type A de 6,5 m de hauteur.

La perte de niveau de la retenue normale a été ainsi réduite à 1,4 m.

Le premier basculement est réglé pour se produire pour une crue de $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$, soit environ la crue de 200 ans.

Ceci représente une augmentation de 235% de la capacité d'évacuation, quelques années plus tard de meilleures performances ont vu le jour tel qu'une **augmentation de 1060% de la capacité d'évacuation** sur le barrage hydroélectrique « Black Rock » aux Etats-Unis.

4. Amélioration de la performance d'un barrage excréteur

Un grand nombre de barrages ont pour fonction principale l'écrêtement des crues.

Dans certaines régions, ils jouent un rôle clé dans la protection de l'environnement urbain.

Pour la plupart de ces barrages, le niveau de la retenue est généralement maintenue nettement plus bas que celui du seuil déversant, afin de stocker les crues les plus fréquentes sans déversement. Pour ces barrages, l'utilisation de hausses est un moyen sûr et économique d'améliorer l'écrêtement des crues moyennes, sans modifier de manière significative celui des crues exceptionnelles. Le seuil est surélevé avec des hausses fusibles peu déversantes (à crête rectiligne).

Incidence sur les crues de différentes importances

Etant donné le même niveau de la retenue au début de la crue, on récapitule ci-après les résultats qui seraient obtenus pour les crues de différentes périodes de retour.

- **Crue de 10 ans**

Dans beaucoup de sites, cette crue serait stockée sans déversement avec ou sans des hausses.

- **Crue de 100 ans**

Grâce à la capacité de stockage supplémentaire que permet l'utilisation des hausses, cette crue serait entièrement stockée sans aucun déversement, contrairement à la situation initiale où une bonne partie de celle-ci est restituée en aval.

- **Crue de projet**

Pour la crue de projet, le barrage a été optimisé, après une première phase de stockage de la crue entrante, les hausses basculeraient une par une, augmentant ainsi progressivement le débit aval.

Le débit aval de pointe, ainsi que le niveau maximal de la retenue seraient légèrement augmentés. Cependant, la différence par rapport aux conditions d'exploitation initiales n'est pas significative (elle correspond à un faible pourcentage du débit aval).

Cet inconvénient est à apprécier en considérant les avantages offerts pour les crues moyennes.

5. Optimisation de l'évacuateur de crues pour un barrage neuf

En moyenne, le coût de l'évacuateur de crues représente environ le tiers du coût total d'un barrage. L'utilisation des hausses fusibles peut être un facteur décisif dans la conception d'un barrage nouveau. Elle permet de concevoir des évacuateurs de crues économiques, sûrs et faciles à implanter.

CHAPITRE III

DIMENSIONNEMENT DES HAUSSES DU BARRAGE DE AIN ZADA

I. Présentation du barrage (AIN ZADA)

SITUATION

LE barrage de Ain Zada est situé dans la wilaya de Setif au nord de l'Algérie, à 23 km à l'ouest de la ville de Setif et à 37 km au nord-est de la ville voisine de Bordj-Bou-Argeridj.

OBJECTIF

L'objectif de ce projet de barrage est d'augmenter la quantité d'eau disponible pour l'alimentation de ces villes par l'intermédiaire de la station de traitement qui est construite en aval du barrage. En attendant que la demande en eau de Setif et Bordj-Bou-Argeridj égale le rendement de la retenue, ce qui d'après les prévisions se produira à l'horizon 2010 c.à.d. l'année prochaine, il sera possible de lâcher le surplus d'eau dans l'oued Bou Sellam pour répondre aux besoins d'irrigation en aval.

1. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

- Retenue

Bassin versant	2 080 km ²
Surface au niveau maximum normal	1300 ha
Surface aux PHEE :	1919 ha
Capacité initiale (avant envasement) :	125 Mm ³
Envasement (en % de la capacité initiale) :	2,9 %
Capacité perdue du fait de l'envasement :	3,63 Mm ³
Capacité résiduelle (dernier levé) :	121,37 Mm ³
Crue maximum (élévation 864,2)	240 Mm ³
Tranche morte (838)	15 Mm ³
Capacité utile	110 Mm ³
Rendement annuel	50 Mm ³
Apport moyen annuel :	90 Mm ³

- Barrage

Date de mise en eau :	1986
Côte du couronnement de l'ouvrage	865 m
Hauteur de crête au-dessus du Niveau du lit de l'oued	55 m
Revanche	10 m
Largeur de la crête	7 m
Longueur de la crête	688 m

Talus de remblai

- amont 2,5 H : 1 V
- aval 1,8 H : 1 V

- Evacuateur de crues

Type de déversoir :	libre (Creager)
Débit de crue	4 320 m ³ /s
Niveau de Retenue Normale (RN) :	855m
Côte des Plus Hautes Eaux Exceptionnelles (PHEE) :	864,20m
Longueur du déversoir	75 m
Longueur du coursier	170 m
Élévation du dissipateur à auge	829,63 m

- Ouvrages de prise

Hauteur de la tour	37,5 m
Diamètre de la tour (intérieur)	5 m
Longueur de la galerie	185 m
Diamètre de la galerie	4,6 m
Élévation de la prise	
• prise supérieure	847,5 m
• Prise inférieure	837,5 m

Diamètre de la tuyauterie de prise	1,2 m
Élévation de la vidange de fond	327,5 m
Diamètre de la vidange de fond	1,6 m
Capacité de la vidange de fond	25 m ³ /s

2. LE BARRAGE

- Remblai

Le remblai se compose de recharges en enrochement compacté supportant un noyau en argile incliné, les deux matériaux étant séparés par un filtre à deux zones. Le talus amont du remblai est protégé contre le batillage par un riprap. Le barrage, qui est courbé en plan pour tirer la meilleur parti de la topographie et des conditions du terrain de fondation est muni de tous les appareils d'auscultation nécessaires pour pouvoir contrôler ses performances pendant et après la construction.

- Terrain de fondation du barrage

Le barrage est fondé sur de la roche saine, le matériau de couverture ayant été excavé sur une profondeur de jusqu'à 15 m. En vue de restreindre la percolation à travers les fondations, un rideau d'injection, composé de trois rangées de trous forés et injectés le long de l'axe de la fondation du noyau, a été exécuté en partant du cavalier d'injection. La rangée centrale du rideau d'injection descend à une profondeur approximativement égale à la hauteur d'eau à laquelle le terrain de fondation pourrait être soumis, c'est-à-dire 55 m.

En plus du rideau d'injection, le traitement du terrain de fondation du noyau a inclus des injections de consolidation et le remplissage des cavités avec du béton, coulis superficiel ou gunité selon le cas.

3. EVACUATEUR DE CRUES

L'évacuateur de crues est situé à distance du barrage dans un ravin naturel qui a été élargi en procédant à des excavations.

L'évacuateur, comprend un déversoir de surface (Creager), de 75 m de large au niveau de la crête, se déversant dans un coursier rectangulaire de gradient constant (8,4%) dont la largeur passe de 75 m en amont à 45 m en aval.

Le coursier fait quelque 180 m de long et se termine par un saut-de-ski.

Le saut-de-ski est étudié pour projeter le jet à grande vitesse loin de l'ouvrage, de façon à dissiper l'énergie dans un bassin de tranquillisation qui se formera de lui-même dans le chenal d'évacuation.

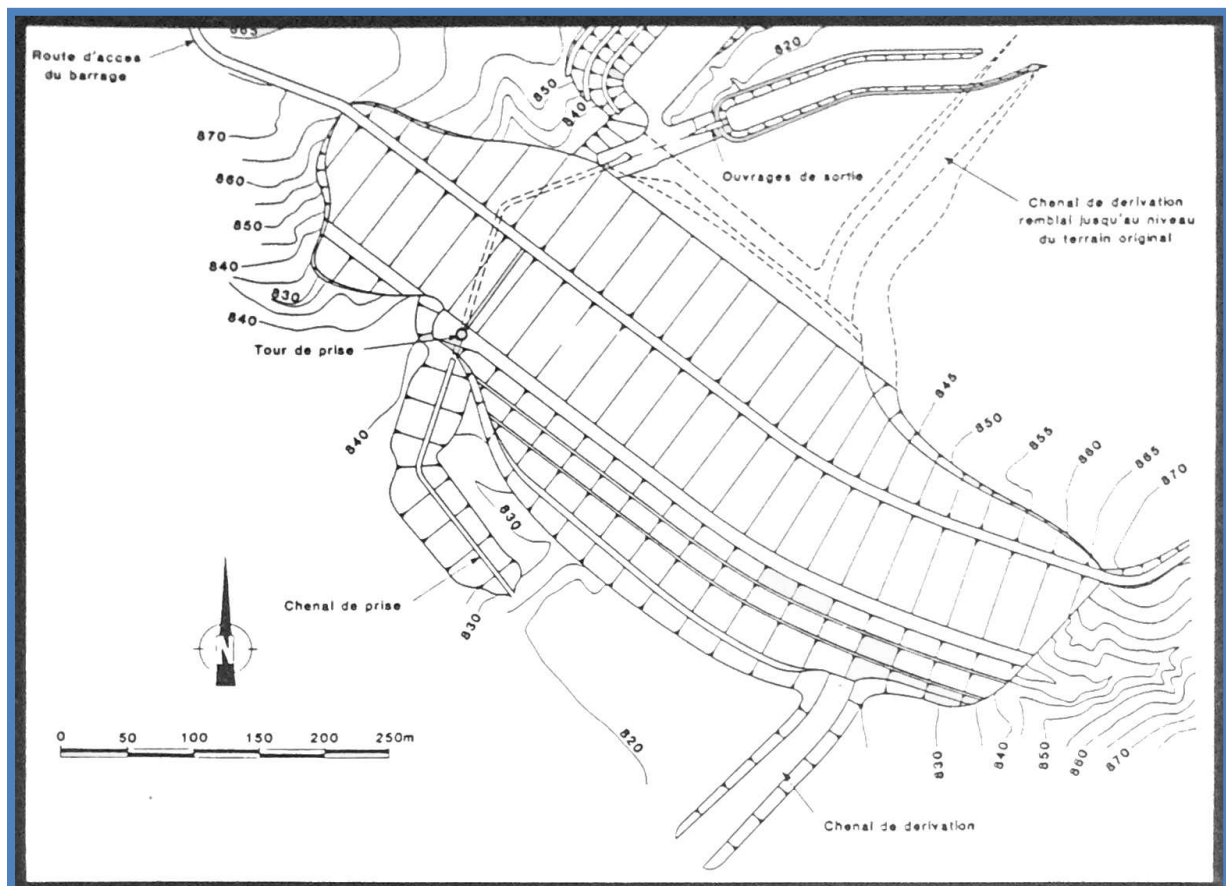


Figure (3.1.1) : Plan du barrage.

II. Hydrologie

1. Données hydrométriques

En l'absence de toutes données de débit de l'oued Bou Sellam ou de toutes données pluviométriques horaires, le rendement de la retenue et les caractéristiques des débite de crue de l'oued Bou Sellam ont été évalués par Bechtel de manière nécessairement approximative, en comparant les caractéristiques du bassin versant avec celles des bassins versants environnants pour lesquels des données étaient disponibles.

2. Rendement de la retenue

- Débit entrant

Le débit entrent annuel moyen dans la retenue est estimé à 93 Mm^3 :

– débit moyen dans le Bou Sellam	79 Mm^3
– débit moyen de la station d'épuration de Setif	14 Mm^3
Total	93 Mm^3

- Volume de la retenue

Les études d'exploitation de la retenue effectuées par Bechtel pour une gamme de volumes de retenue ont conduit à adopter un volume total de retenue de 125 Mm^3 et une capacité utile de 110 Mm^3 . La courbe hauteur-capacité de la retenue est donnée à la figure 3.2.1.

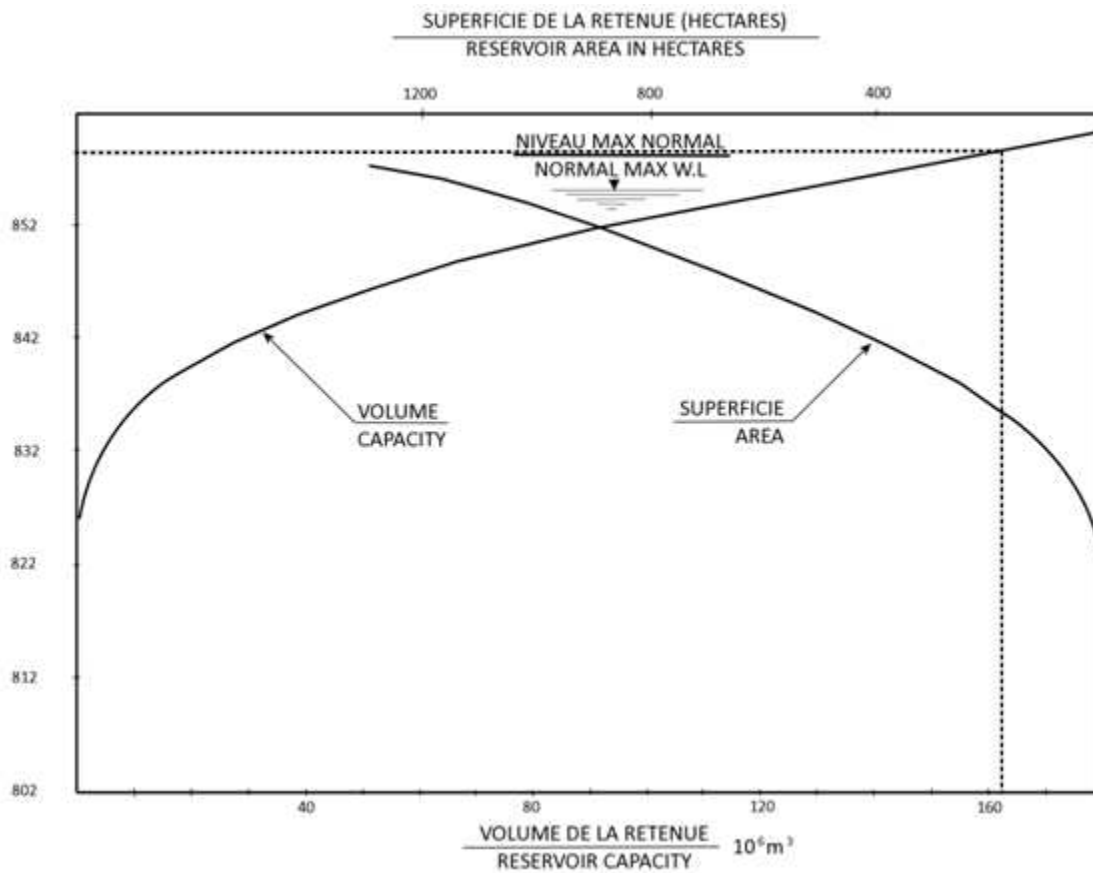


Figure (3.2.1) : courbe hauteur-capacité.

- Pertes

Les pertes totales annuelles de la retenue sont évaluées comme suit :

Evaporation	10 Mm ³
Percolation	6 Mm ³
Débordements	27 Mm ³
Total	43 Mm ³

- Rendement

Le rendement d'une fiabilité de 95% (19 ans sur 20) de la retenue de Ain Zada correspond au débit entrant moins les pertes, soit 50 Mm³/an.

3. Crues

- Introduction

Deux crues d'étude ont été prises en compte pour l'étude de l'évacuateur. Il s'agit de la crue standard (CSP) probable et de la crue maximum probable (CMP).

Crue	Débits de pointe		Niveau maximum (m)
	Débit entrant (m ³ /s)	Débit sortant (m ³ /s)	
CMP	6300	4370	864,2
CSP	3780	2580	861,4

Tableau (3.2.1) : Laminage des crues.

La CMP est la crue qui résulterait d'une précipitation maximale probable ayant lieu sur toute l'étendue du bassin et avec des conditions telles à l'intérieur du bassin que l'écoulement en soit maximal. La CSP résulterait des conditions entre l'étendue des précipitations et la durée de celles-ci, les plus défavorables parmi celles observées dans la région du projet. Dû au manque de données, la CSP a été obtenue en multipliant la CMP par le coefficient (0,6), méthode recommandée par le Corps du Génie de l'Armée Américaine.

- Précipitation maximale probable (PMP)

La PMP est la précipitation la plus importante qui puisse survenir dans le bassin. Une durée de 24 heures a été utilisée pour cette étude. Le calcul de la PMP a été basé sur une maximisation de l'humidité et sur les techniques de transportation des orages recommandées par l'Organisation Météorologique Mondiale.

La méthode consiste à repérer, sur les relevés de la région, les orages principaux enregistrés, à maximiser le volume des précipitations, et à transposer les orages dans la région de Sétif. Les orages principaux pour le Plateau Central ont été choisis à partir des données disponibles à Setif, Bordj-Bou-Argeridj, El Eulma et Ain Azel. Les orages principaux le long de la côte algérienne, directement au nord de la zone du Projet de Sétif entre Alger et Skikda, ont également été retenus. Afin de vérifier l'ordre de grandeur, trois autres méthodes ont été utilisées pour l'estimation de la PMP : premièrement, une étude des orages tunisiens qui sont survenus en septembre et octobre 1969 ; deuxièmement, la méthode de Hershfield (Réf.3), une méthode statistique comportant l'analyse des précipitations maximales enregistrées ; et troisièmement une comparaison avec des régions météorologiquement similaires.

Sur la base des résultats de cette analyse, la précipitation localisée maximale probable de 24 heures qui a été utilisée pour le choix de la CMP pour Ain Zada était de 240 mm. La CMP de 24 heures moyenne pour la zone du bassin a été obtenue par la multiplication de la précipitation localisée maximale probable, par un coefficient donné dans la référence.

- **Crue Maximale Probable et Crue Nominale du Projet**

Bien qu'il existe deux stations de jaugeage des cours d'eau situées l'une dans le bassin d'Ain Zada, l'autre dans celui de Fermatou, aucune des données n'a été disponible pour une éventuelle analyse des hydrogrammes. En conséquence, des hydrogrammes unitaires fictifs basés sur la méthode du Service de Conservation des sols (SCS) Américain ont été établis. Du fait des caractéristiques variables des bassins tributaires du bassin hydrographique d'Ain Zada, le bassin a été divisé en trois bassins secondaires :

- l'oued Ftaissa, comprenant l'oued Guellal
- l'oued Bou Sellam au-dessus d'Hammam
- la zone entre Hammam et le site du barrage d'Ain Zada.

Un hydrogramme unitaire a été établi pour chaque bassin secondaire. La série de gros orages qui a eu lieu en Tunisie en septembre et octobre 1969 a mis en évidence qu'il est

raisonnable de prévoir, pour la région de Sétif, qu'une précipitation survienne juste avant l'averse nominale.

La précipitation antécédente considérée était soit un orage de 6 heures à période de récurrence de 100 ans ayant lieu un jour avant l'orage principal, soit l'orage non généralisé de 24 heures à période de récurrence de 100 ans ayant lieu cinq jours avant l'orage principal, suivant la combinaison qui a créé le niveau de retenue le plus élevé. Lors du calcul de la propagation des crues, la retenue a été supposée être au niveau du seuil de l'évacuateur avant la précipitation antécédente, et on a pris comme hypothèse que les ouvrages de prise n'étaient pas en service. Un numéro de courbe de 80, ainsi que des conditions AMC III (SCS Soil Complex Method) ont été également supposés.

Les chutes de pluie de l'averse précédente et celles de la PMP ont été réparties en incréments choisis à partir de la courbe centennale intensité - durée - fréquence établie pour la région de Setif. Comme on ne disposait d'aucun relevé de précipitation pour des périodes inférieures à 24 heures, la forme des courbes intensité - durée - fréquence a été établie par comparaison avec des courbes établies pour des régions des Etats-Unis météorologiquement similaires. Les incréments de précipitation ont été associés en série de façon à maximiser le débit de ruissellement, ainsi que recommandé par le Corps du Génie Américain (Réf.4).

- **Laminage des crues**

Les deux hydrogrammes de crue entrante ont été laminés pour l'ensemble de la retenue pour obtenir les hydrogrammes de sortie et la réponse en termes de niveau de la retenue.

4. Protection du talus amont

- Revanche

La revanche du barrage au-dessus du niveau normal de retenue de 855 m a été fixée à 10 m avec un niveau nominal de crête de 865m. Ce niveau fournit la revanche nécessaire pour laisser passer la CMP avec une marge de 0,8 m estimée être égale à la somme hauteur de vague nominale/poussée du vent associée à une vitesse du vent de 64 km/h.

III. Synthèse du dimensionnement des hausses fusibles au barrage de Ain Zada

1. Solution hausses fusibles

- Augmentation de stockage de 42 000 000 m³

Le seuil actuel est dérasé de 1,50 m (de 855,00 m à 853,50 m). Il est également élargi de manière à former une plate-forme de 5,65 m de largeur. Cette extension peut à priori se faire à l'aval du seuil actuel sans nécessiter d'importants travaux.

Les caractéristiques des Hausses Fusibles sont les suivantes :

- Cote de la crête : 858,00 m
- Cote du seuil : 853,50 m
- modèle : Labyrinthe large, fortes lames
- nombre : 9
- Hauteur de la hausse : 4,50 m
- Largeur unitaire : 8,33 m
- Largeur totale équipée : 74,97 m

Les Hausses Fusibles sont installées sur le seuil de manière à former un voile étanche et ainsi rehausser la RN au niveau de leur crête (858,00 m). Ceci se traduit par un gain de stockage de 42 000 000 m³. Ce volume supplémentaire est très supérieur au volume perdu du fait de l'envasement depuis la mise en eau du barrage.

Lorsque l'amplitude de la crue est telle que le niveau du réservoir atteint le niveau du premier puits, les hausses commencent à s'effacer individuellement. L'incrément de débit du fait d'un basculement est faible au regard du débit sortant total. Au fur et à mesure de la montée des eaux, les modules s'effacent ainsi les uns après les autres.

La crue qui provoque le premier basculement peut avoir un débit maximum sortant de 2550 m³/s. Ce calage permet de s'assurer que la fréquence des basculements est très faible.

2. Spécifications techniques

- **Préambule**

Le choix des matériaux de construction des hausses résulte des aspects économiques (coût de fabrication et de maintenance). Dans le contexte de Ain-Zada, il a été anticipé que des hausses en béton armé fabriquées in situ offrent le meilleur compromis économique tout en garantissant la longévité de la structure.

- **Fabrication béton des labyrinthes**

La superstructure des hausses sera réalisée en béton armé à même le seuil par sous-traitant dûment approuvé par l'ANBT. Cette technique de fabrication a été utilisée sur de nombreux ouvrages à l'étranger et en Algérie, notamment sur le barrage du Ghrib (Wilaya de Ain Défla).

- **Fabrication acier des puits et autres accessoires**

Les puits seront réalisés en acier (E24) d'épaisseur 8mm avec une protection anticorrosion utilisant le système suivant :

- Décapage SA 2.5
- Sandwich epoxy classique

Les autres accessoires métalliques seront réalisés en acier E24 peints.

- **Assemblage et installation des hausses**

L'assemblage des puits sur les superstructures en béton sera réalisé sur site. Les hausses seront coulées sur la plate-forme du seuil (préalablement préparé). Les organes d'étanchéité et les différents accessoires seront ensuite installés.

3. Etude du laminage des crues

Le ratio R débit de pointe sortant sur débit de pointe entrant peut être calculé.

$$R = 4370/6300 = 0,7$$

Ce ratio montre que le barrage atténue relativement fortement les crues.

A ce stade à l'aide de l'ANBT un hydrogramme théorique a été développé par Hydroplus à partir des pics de crues entrantes et sortantes. Cet hydrogramme théorique reproduit les conditions d'écrêtement du seuil existant utilisant comme base ce dimensionnement préliminaire du système de hausse fusible en terme de taille, de type de hausses, et de niveau de dérasement du seuil existant.

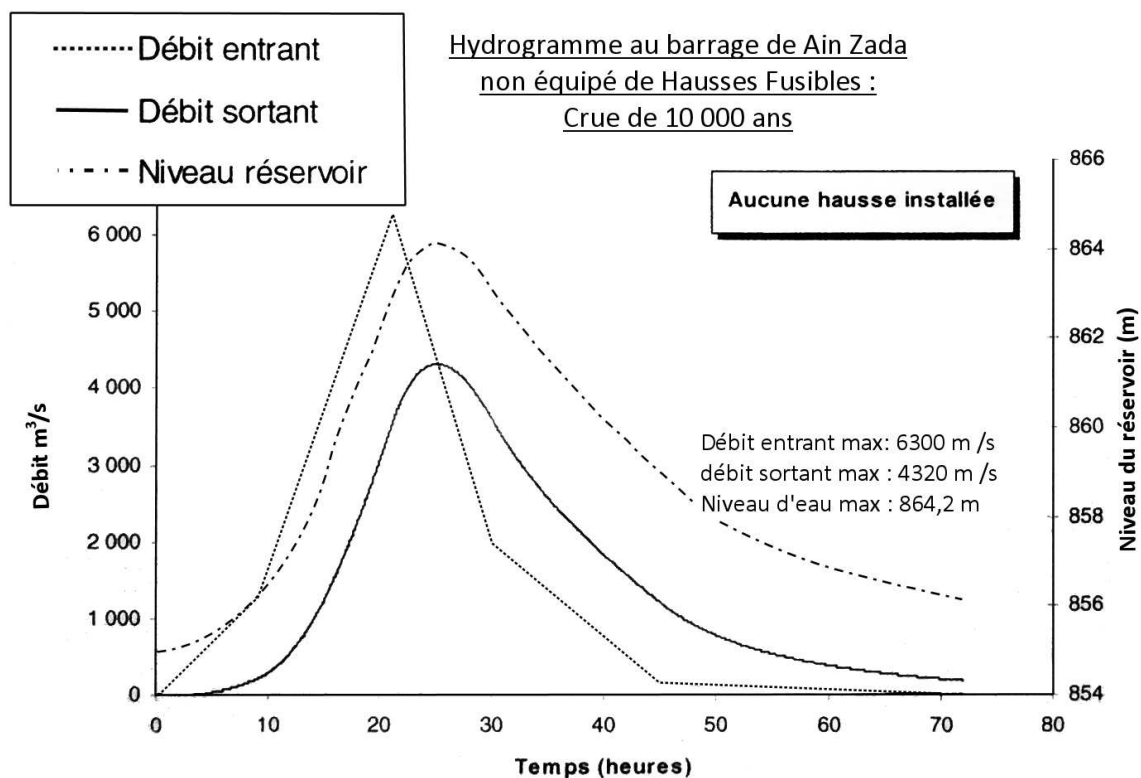


Figure (3.3.1) : Hydrogramme au barrage de Ain Zada non équipé de hausses fusibles.

Pour évaluer le niveau atteint par la crue de projet après installation des hausses fusibles, il est fait l'hypothèse conservatrice que le niveau de la retenue est égal au niveau de la crête des hausses.

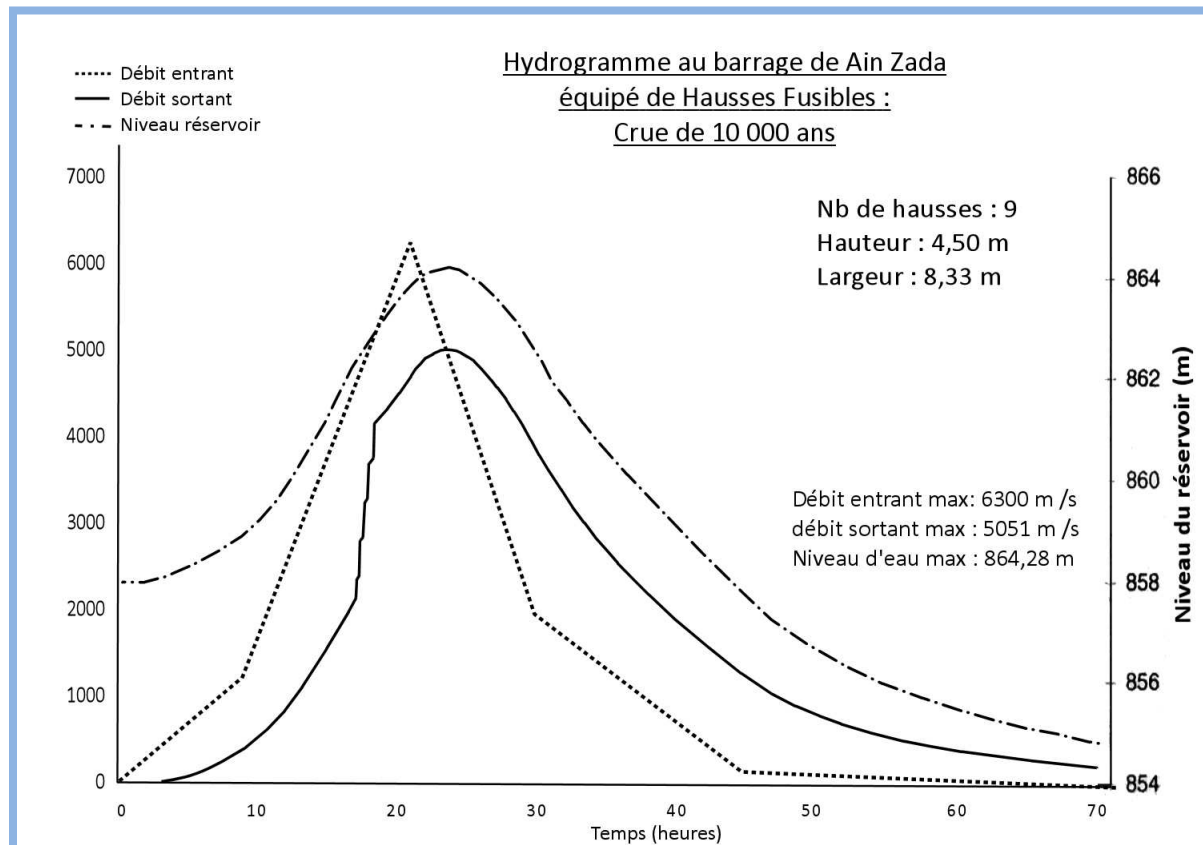


Figure (3.3.2) : Hydrogramme au barrage de Ain Zada équipé de hausses fusibles.

4. Programme délais

Le planning estimatif s'articule en trois phases :

- Phase 1 : Dossiers d'exécution et de fabrication des hausses5 mois
- Phase 2 : Fabrication des hausses et de leurs accessoires8 mois
- Phase 3 : Assemblage2 semaines

IV. Dimensionnement des hausses du barrage de AIN ZADA

1. Dimension de la hausse :

- **Rapport dérasement/ h_{\max}** utilisé = 16,5%

Ancien h_{\max} 9,2 m

Hauteur du dérasement = 16,5% h_{\max} \rightarrow $H_{\text{dérasement}} = 1,5$ m

Nouveau h_{\max} = ancienne revanche + $H_{\text{dérasement}} = 10,7$ m

- **Type de hausse** choisie Labyrinthe LHH (Large High Head)

- **Hauteur des hausses (H)**

$$h_{\max} = H_{\text{hausse}} + 140\% H_{\text{hausse}}$$

$$h_{\max} = 2,4 * H_{\text{hausse}} \rightarrow H_{\text{hausse}} = h_{\max} / 2,4$$

$$H_{\text{hausse}} = 10,7 / 2,4$$

$$H_{\text{hausse}} \approx 4,5 \text{ m}$$

- **Dimension de l'auge :**

Largeur amont de la base de la hausse (L_1)

$$L_1 = 1,8H \rightarrow L_1 = 1,8 * 4,5$$

$$L_1 = 8,1 \text{ m} \rightarrow \text{nombre de hausses installées sur le seuil} = L / L_1$$

$$n = 75 / 8,1 \rightarrow n = 9,259$$

Après une adaptation de la longueur des hausses par rapport à la longueur du seuil L_1 devient :

$$L_1 = 8,33 \text{ m} \rightarrow L_1 = 1,854H \quad (+2,8\% \text{ de } 1,8)$$

Longueur de la base (B_1)

$$B_1 = 1,2H (+/- 5\%) \rightarrow B_1 = 1,255H \quad (+ 4,6\% \text{ de } 1,2)$$

$$B_1 = 5,65 \text{ m}$$

Hauteur de la chambre de mise en pression (c)

$$c = 10\%H \sim 15\%H \rightarrow c = 11,11\%H$$

$$c = 0,5 \text{ m}$$

Angle d'inclinaison de la paroi aval de la hausse (α)

$$\alpha = 47^\circ (+/- 5^\circ)$$

$$\alpha = 42^\circ$$

Longueur horizontal projeté de la paroi aval profilé de la hausse (a)

$$a = (H-c)/\text{tg}(\alpha) \rightarrow a = 4,00/\text{tg}(42^\circ)$$

$$a = 4,442 \text{ m}$$

Longueur réelle de la paroi aval profilé de la hausse (e)

$$e^2 = a^2 + (H-c)^2$$

$$e = 5,977 \text{ m}$$

Largeur de la paroi aval de la hausse (L_2)

$$L_1 = 2,5 L_2 \rightarrow L_2 = L_1/2,5$$

$$L_2 = 3,33 \text{ m}$$

Longueur total de la hausse (B_2)

$$B_2 = B_1 + a \rightarrow B_2 = 5,65 + 4,44$$

$$B_2 = 10,09 \text{ m}$$

Longueur réelle de la paroi latérale de la hausse (L_3)

$$L_3 = B_2^2 + [(L_1 - 2L_2)/2]^2 \rightarrow L_3 = 101,808 + 0,697$$

$$L_3 = 10,124 \text{ m}$$

Calcul de a_1

$$a/B_2 = a_1/L_3 \rightarrow a_1 = L_3 \cdot a/B_2$$

$$a_1 = 4,457 \text{ m}$$

Calcul de a_2

$$a_2 = L_3 - a_1 \rightarrow a_2 = 10,124 - 4,457$$

$$a_2 = 5,667 \text{ m}$$

Larguer aval de la base (L_4)

$$L_4 = L_2 + 2 \cdot x$$

$$a_1/x = L_3/(L_1 - 2L_2) \rightarrow x = a_1 \cdot (L_1 - 2L_2)/L_3$$

$$x = 0,7352$$

$$L_4 = 4,8 \text{ m}$$

2. Calculs de stabilité

a) Stabilité au renversement :

- Surfaces et Volumes des parois de la hausse

Epaisseur des parois composant la hausse

D'après le constructeur une épaisseur de $d = 30 \text{ cm}$, $d_2 = 25 \text{ cm}$ de béton armé est suffisante respectivement pour la construction des parois et la dalle de la hausse

Paroi G

$$S_G = e.(L_2+L_4)/2 \rightarrow S_G = 5,977.(3,33+4,8)/2$$

$$S_G = 24,2965 \text{ m}^2$$

$$V_G = S_G.0,3 \rightarrow V_G = 24,2965.0,3$$

$$V_G = 7,288951 \text{ m}^3$$

Parois J1, J2

$$S_J = 2x [(L_3+a_2).(H-c)/2] \rightarrow S_J = 2x [(10,124+5,667).(4,5-0,5)/2]$$

$$S_J = 2x 31,582 \text{ m}^2 \rightarrow S_J = 63,164 \text{ m}^2$$

$$V_J = S_J.0,3 \rightarrow V_J = 63,1632.0,3$$

$$V_J = 18,9492 \text{ m}^3$$

Paroi K

$$S_K = 2x [(H-c).L_2/2] \rightarrow S_K = 2x [(4,5-0,5).(3,33/2)]$$

$$S_K = 2x 6,66 \text{ m}^2 \rightarrow S_K = 13,32 \text{ m}^2$$

$$V_K = S_K.0,3 \rightarrow V_K = 13,32.0,3$$

$$V_K = 3,996 \text{ m}^3$$

Poids de la base M

$$P_{\text{base}} = P_M + P_{\text{appuis}}$$

La dalle M

$$S_{\text{Purge}} = 0,25 \times 0,25 \rightarrow S_{\text{Purge}} = 0,0625 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{Puit/Chambre}} \approx 20 \times S_{\text{Purge}} \rightarrow S_{\text{Puit/Chambre}} = 20 \cdot 0,0625$$

$$S_{\text{Puit/Chambre}} = 1,25 \text{ m}^2$$

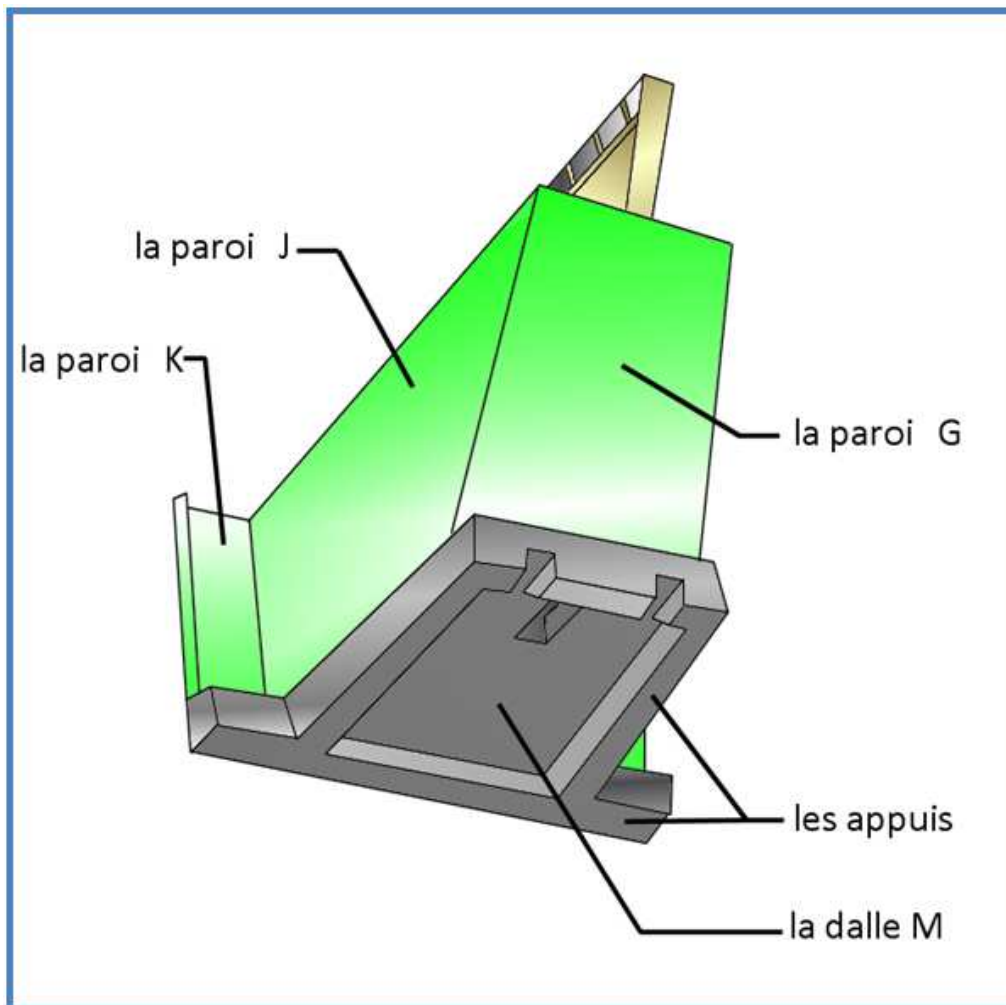


Figure (3.4.1) : vue aval des différentes parois de la hausse labyrinthe.

Comme la largeur du puits est de 0,70m $\rightarrow S_{\text{Puit/Chambre (rectifié)}} \approx 1,8 \times 0,7 \text{ m}^2 = 1,26 \text{ m}^2$

$$S_M = [(L_1 - L_2) + 0,6 + L_4 + 0,6] \cdot (B_1 + 0,6) / 2 + (L_2 - 0,6) \times d - S_{\text{Puit/Chambre}}$$

$$\rightarrow S_M = (8,33 - 3,33 + 4,8 + 1,2) \cdot (5,65 + 0,6) / 2 + (3,33 - 0,6) \times 0,3 - 1,26$$

tel que 0,6 représente l'épaisseur du béton de part et d'autre.

$$S_M = 33,934 \text{ m}^2$$

$$V_M = S_M \cdot d_2 \rightarrow V_M = 33,934 \cdot 0,25$$

$$V_M = 8,4835 \text{ m}^3$$

Les appuis

$$L_{\text{purge}} = 0,25\text{m}$$

$$H_{\text{appuis}} = c-d_2 \rightarrow H_{\text{appuis}} = 0,5-0,25$$

$$H_{\text{appuis}} = 0,25\text{m}$$

$$V_{\text{appuis}} = (L_1 + 2 \cdot a_2 + L_4 - L_{\text{purge}}) \times 0,25 \times 0,3 \rightarrow V_{\text{appuis}} = (8,33 + 2 \cdot 5,667 + 4,8 - 0,25) \times 0,25 \times 0,3$$

$$V_{\text{appuis}} = 1,81605 \text{ m}^3$$

Volume total de béton utilisé

$$V_{\text{total}} = V_{\text{appuis}} + V_M + V_K + V_J + V_G \rightarrow V_{\text{total}} = 1,81605 + 8,4835 + 3,996 + 18,9492 + 7,288951$$

$$V_{\text{total}} = 40,533701 \text{ m}^3$$

Poids de la hausse

$$P_{\text{armature}} = 0,65 \text{ t/m}^3$$

$$P_{\text{hausse}} = (\rho_{\text{béton}} + P_{\text{armature}}) \times V_{\text{total}} \rightarrow P_{\text{hausse}} = (2,4 + 0,68) \times 40,533701$$

$$P_{\text{hausse}} = 124,8438 \text{ t}$$

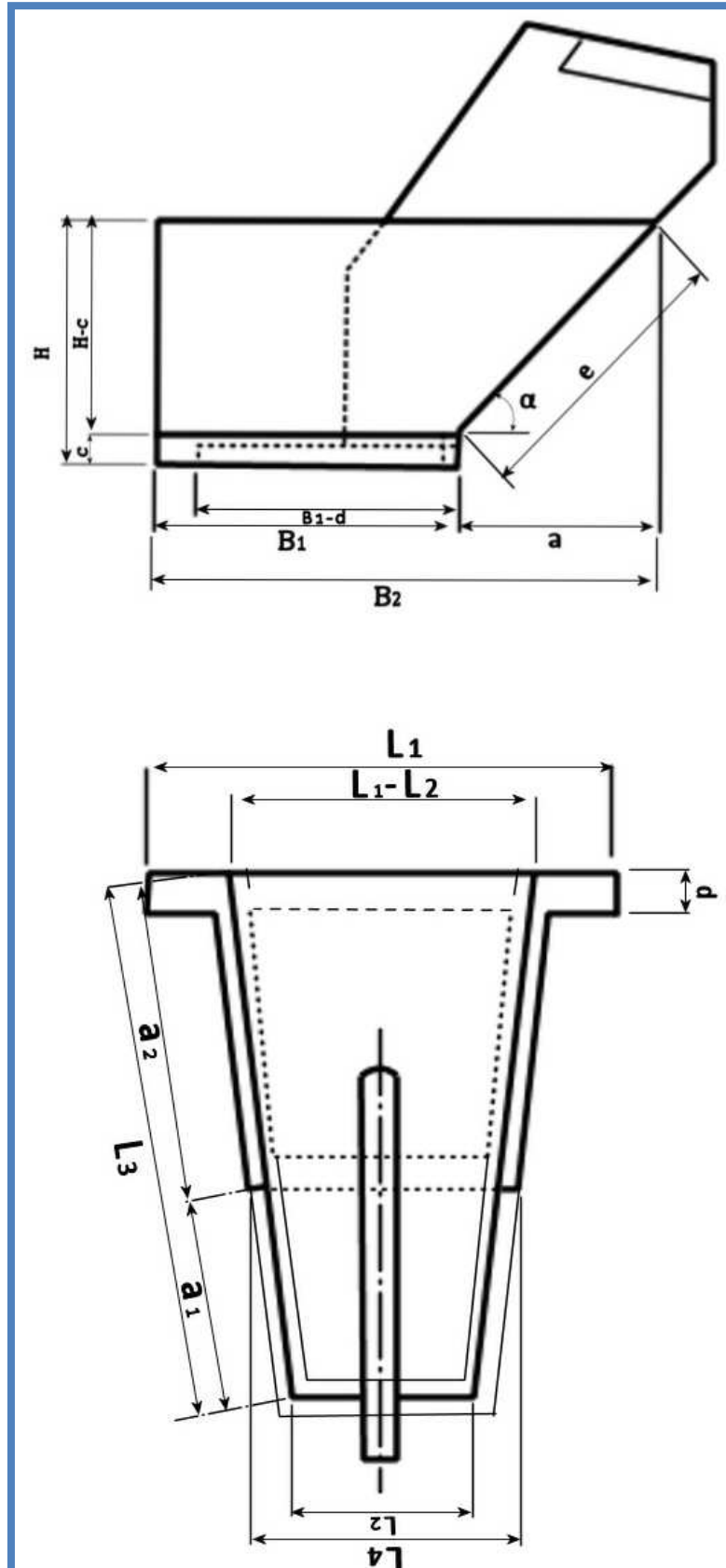


Figure (3.4.2) : schémas des différentes longueurs des parois de la hausse labyrinthe.

Calcul du centre de gravité de la hausse sur le plan horizontal par rapport à la butée

$$X_G = -2,80\text{m}$$

$$\cos(\alpha) = X_{G'}/X_G \rightarrow X_{G'} = X_G \cdot \cos(\alpha)$$

$$X_{G'} = -2.08\text{m}$$

$$X_J = 1,61\text{m}$$

$$X_K = 5,5\text{m}$$

$$X_M = 2,51\text{m}$$

$$X_{\text{appuis}} = 3,16\text{m}$$

$$X_{\text{hausse}} = (X_{G'} \cdot V_G + X_J \cdot V_J + X_K \cdot V_K + X_M \cdot V_M + X_{M'} \cdot V_{M'}) / V_{\text{total}}$$

$$X_{\text{hausse}} = 1,5877\text{m}$$

Calcul du volume de l'auge

$$V_{\text{auge}} = (H-c) \cdot [S_G \cdot \cos(\alpha) / 2 + (S_M - L_2 \cdot 0,3) - S_{\text{Puit/Chambre}}]$$

$$V_{\text{auge}} = 162,8116 \text{ m}^3$$

Calcul du centre de gravité de l'eau dans l'auge sur le plan horizontal par rapport à la butée

$$X_{\text{auge}} = 2,1363\text{m}$$

❖ Les moments mobilisant :

- Pression hydrostatique amont

$$\text{Si } h = H_{\text{hausse}}$$

$$F_{\text{am}} = 1/2 \rho_e g L h^2$$

$$F_{\text{am}} = 84,34 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$M_{am} = 1/6 \rho_e g L h^3$$

$$M_{am} = 126,51 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

$$\text{Si } h = h_{\max}$$

$$F_{amont} = 1/2 \rho_e g L H (2h - H)$$

$$F_{amont} = 316,74 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$M_{amont} = 1/6 \rho_e g L H^2 (3h - 2H)$$

$$M_{amont} = 649,42 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

- **Sous-pression dans la chambre et sous la base de la hausse**

$$F_{\text{Sous-pression max}} = \rho_e g 0,75 \cdot h_{\max} S_M$$

$$F_{\text{Sous-pression max}} = 272,32 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

$$M_{\text{Sous-pression max}} = F_{\text{Sous-pression max}} \cdot X_M$$

$$M_{\text{Sous-pression max}} = 683,52 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

❖ Les moments stabilisants :

- **Poids de l'auge**

$$\text{Si } h = H_{\text{hausse}}$$

$$F_{\text{auge}} = V_{\text{auge}} \cdot \rho_e g \rightarrow F_{\text{auge}} = 162,81 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$M_{\text{auge}} = F_{\text{auge}} \cdot X_{\text{auge}} \rightarrow M_{\text{auge}} = 162,81 \cdot 10^4 \cdot 2,1363$$

$$M_{\text{auge}} = 347,81 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

$$\text{Si } h = h_{\max}$$

$$F_{\text{auge}} = (V_{\text{auge}} + S_M (h_{\max} - H_{\text{hausse}})) \cdot \rho_e g$$

$$F_{\text{auge}} = 373,2 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$M_{\text{auge}} = 797,26 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

- **Contre pression de la lame déversante**

$$\text{Si } h = h_{\max}$$

$$h_{\text{aval}} = 0,2 h_{\text{amont}}$$

$$F_{\text{av}} = 1/2 \rho_e g L_{\text{aval}} h_{\text{aval}}^2$$

$$F_{\text{av}} = 19,07 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$M_{\text{aval}} = 1/6 \rho_e g L_{\text{aval}} h_{\text{aval}}^3$$

$$M_{\text{aval}} = 13,60 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

- **Moment du lest et de la hausse**

$$M_{\text{hausse}} = P_{\text{hausse}} X_{\text{hausse}}$$

$$M_{\text{hausse}} = 198,211 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

$$M_{\text{lest}} = P_{\text{lest}} X_{\text{lest}} \text{ (il sera déduit de la vérification de la stabilité au renversement)}$$

- **Vérification de stabilité au renversement :**

$$\text{Si } h = H_{\text{hausse}}$$

$$\Sigma M > 0 \rightarrow (M_{\text{hausse}} + M_{\text{auge}}) - M_{\text{amont}} > 0$$

$$\Sigma M = 419,51 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

le module reste stable : **Vérifié**

$$\text{Si } h = h_{\text{max}} \text{ (sans que l'eau ne pénètre dans le puits)}$$

$$\Sigma M > 0 \rightarrow (M_{\text{hausse}} + M_{\text{auge}} + M_{\text{aval}}) - M_{\text{amont}} > 0$$

$$\Sigma M = 359,65 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

le module reste stable : **Vérifié**

Remarque : Il ne sera pas nécessaire d'installer des lests

$$\text{Si } h = h_{\text{max}} \text{ (l'eau ne pénètre dans le puits)}$$

$$\Sigma M < 0 \rightarrow (M_{\text{hausse}} + M_{\text{auge}} + M_{\text{aval}}) - M_{\text{amont}} - M_{\text{sous-pression max}} > 0$$

$$\Sigma M = - 323,87 \cdot 10^4 \text{ N.m}$$

le module bascule: **Vérifié**

b) Stabilité au glissement

La butée sera construite en vérifiant le critère suivant :

$$\text{Pour } h = h_{\text{max}}$$

$$F_{\text{Butées}} = 1/6 \rho_e g L H^2 (3h-2H)$$

$$F_{\text{Butées}} = 6,49 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Calcul de la cote du premier basculement :

Le débit évacué par un seuil équipé de hausses labyrinthe est :

$$Q = C_d L (2g)^{1/2} h^{3/2}$$

Choix du premier débit de basculement (on choisi en général un débit de crue bi-centennale mais c'est au chef d'exploitation de décidé de la fréquence de basculement des hausses)

$$Q_1 = 2550 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H = 4,5 \text{ m}$$

$$h_{b1} = h_{\max} - 17,5\%H_{\text{hausse}} \rightarrow h_{b1} = 9,9125 \text{ m}$$

$$h/H = 1,2 \rightarrow C_d = 0,61 \text{ de la Figure (2.9.1)}$$

Vérification

$$Q = C_d L (2g)^{1/2} h^{3/2} = 2576 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vérifié

3. Impacte du rehaussement sur le volume de la retenue :

Ancien Niveau de Retenue Normale 855 m NGA

Nouveau Niveau de Retenue Normale 858 m NGA

Capacité résiduelle (dernier levé) 121,37 Mm³

Pour avoir le nouveau volume de la retenue il suffi de le lire directement de la courbe hauteur-capacité.

Donc le nouveau volume au niveau de la nouvelle retenue normale est de 163 Mm³, ce qui nous fait un gain de 42 Mm³.

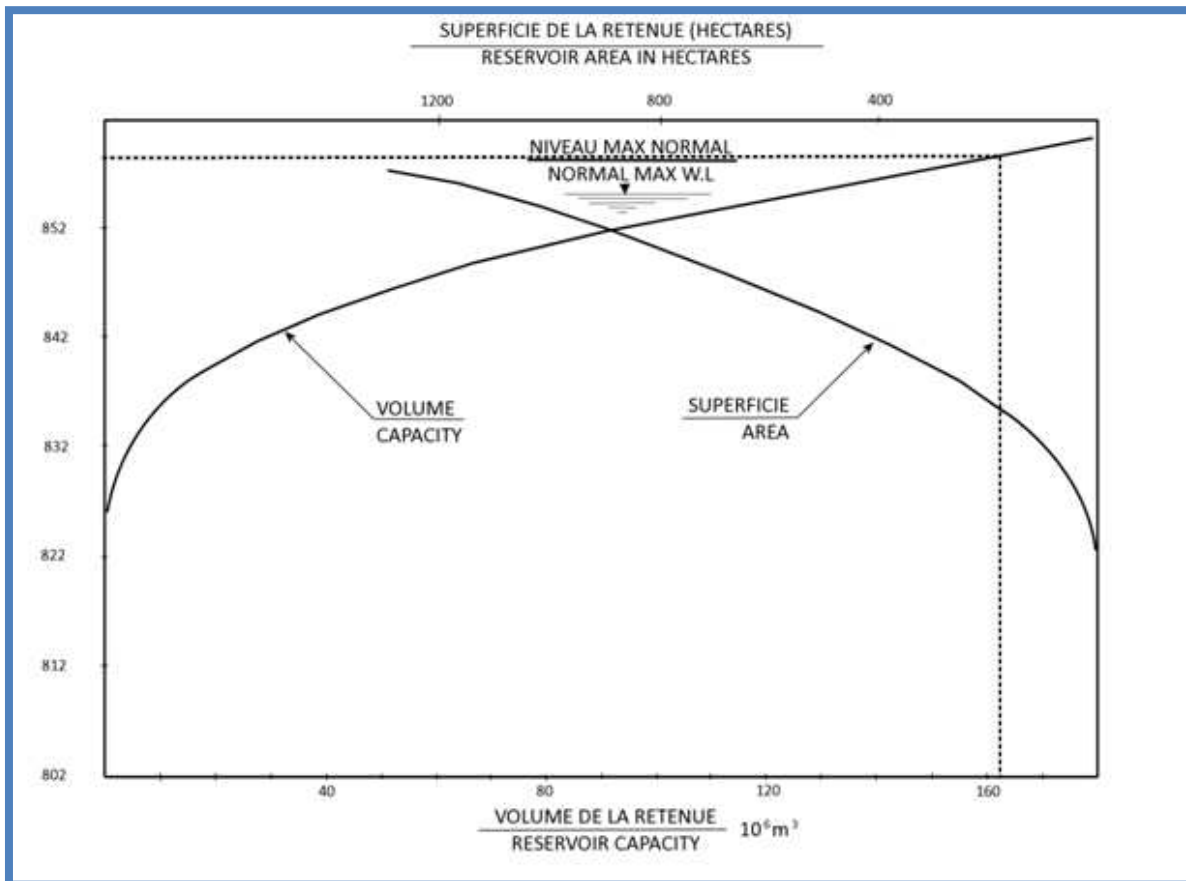


Figure (3.2.1) : courbe hauteur-capacité.

	la marge de basculement (en % de hauteur de la hausse)	Rapport dérasement/ h_{\max} (relative au PHEE)	Rapport du nouveau h_{\max} (relative au PHEE)/Hauteur de la hausse	Angle d'inclinaison (α) de la paroi aval	Rapport largeur/hauteur	Rapport longueur/hauteur	longueur développée L_c de la hausse en fonction de H
Etroite entonnoir bas (NLH)	entre 30% H et 70% H	entre 10% et 12%	entre 1,3H et 1,7H	58° (+/- 5°)	1.0 (+/- 5%)	1 (+/- 5%)	3,76H (+/- 5%)
Large entonnoir bas (LLH)	entre 30% H et 70% H	entre 6% et 8%	entre 1,3H et 1,7H	58° (+/- 5°)	1.5 (+/- 5%)	1 (+/- 5%)	4,09H (+/- 5%)
Large entonnoir élevé (LHH)	entre 70% H et 140% H	entre 15% et 18%	entre 1,7H et 2,4H	47° (+/- 5°)	1.8 (+/- 5%)	1,2 (+/- 5%)	6,22H (+/- 5%)

Tableau (3.3.1) : les différentes dimensions des trois types de hausse fusible.

V. Exemples de barrages en Algérie équipés de hausses fusibles

Barrage de Foug el Gueiss



Le barrage de Foug El Gueiss, réalisé par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts pour l'irrigation de la plaine agricole de Remila s'est totalement ensasé depuis sa mise en eau. L'installation de hausses fusibles a permis d'accroître la capacité de stockage de près de 500 000 m³ tout en augmentant le niveau de l'eau d'un mètre, hauteur nécessaire pour le dévasement de la retenue à l'aide de barge flottante. .

Localisation : Algérie

Fin de chantier : 2004

Objectif : Augmentation de la capacité de stockage

Type de hausse : Labyrinthe à forte lame déversante

Nombre : 48

Hauteur : 1,10 m

Largeur : 1,98 m

Gain de stockage : 430 000 m³

Barrage de Beni Amrane



Localisation : Algérie

Fin de chantier : 2003

Objectif : Augmentation de la capacité de stockage

Type de hausse : Droite

Nombre : 7

Hauteur : 3,75 m

Largeur : 14,60 m

Gain de stockage : 7 100 000 m³

Barrage du Ghrib



Le barrage du Ghrib, réalisé par l'Agence Nationale des Barrages et Transferts permet d'une part d'alimenter la ville d'Alger en eau potable et d'autre part d'irriguer les plaines du Haut et du Bas Chellif. L'installation de hausses fusibles permet d'accroître la capacité de stockage de la retenue de 70 hm³, restaurant ainsi la capacité initiale avant l'envasement du barrage. Les 20 hausses fusibles de 4,50 m de hauteur sont les plus imposantes construites à ce jour au Maghreb et sont associées à 2 clapets de 4,0 m de hauteur et 15 m de largeur.

Localisation : Algérie

Fin de chantier : 2007

Objectif : Augmentation de la capacité de stockage

Type de hausse : Labyrinthe à lame déversante modérée

Nombre : 20

Hauteur : 4,50 m

Largeur : 6,75 m

Gain de stockage : 70 000 000 m³

Conclusion globale

Cette technologie développée depuis 1989 comparée aux techniques de dragage, constitue une alternative fiable et économique aux systèmes conventionnels permettant le contrôle des déversoirs (tels que vannes). Les hausses fusibles permettent d'augmenter le volume de stockage d'un barrage et/ou d'améliorer la capacité d'évacuation de son déversoir. Les cinquante références de par le monde donnent désormais une vraie crédibilité à ce système.

Au-delà de leur caractère économique, ces solutions répondent favorablement aux préoccupations actuelles sur l'environnement et le changement climatique.

Dans notre cas pour faire face à la sédimentation du réservoir de Ain Zada et/ou pour augmenter sa capacité de stockage, on pourra adopter le procédé étudié en rehaussant la hauteur de la retenue normal de 4,5 m.

En faisant l'analogie du coût d'installation des hausses fusibles avec quelques barrages tels que Ghrib (en Algérie) et Kamuzu II (au Malawi) qui ont coûté respectivement 11 millions US\$(pour 20 hausses) et 8,1 millions US\$(pour 14 hausses), Ain Zada pourrait atteindre 5,5 millions US\$ (pour ses 9 hausses).

Comparé aux techniques de dragage, rehausser le barrage est beaucoup plus rapide à mettre en application et très rentable. Par exemple, l'estimation du coût du mètre cube d'eau récupéré dans notre cas est de l'ordre de 0.14 US\$. Le seul inconvénient principal de cette approche c'est qu'elle peut être mise en œuvre seulement une fois sur un projet donné.

Après le rehaussement du barrage de Beni Amerane, Foug EL Gueiss et de Ghrib, Ain Zada pourrait être le prochain barrage en Algérie à utiliser des hausses fusibles et ainsi pourra-il servir de référence pour des projets remèdes à de future sédimentation dans le monde entier.

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures :

1. Figure (1.2.1) : vanne levante verticale	10
2. Figure (1.2.2) : Schéma d'une vanne segment.....	11
3. Figure (1.2.3) : Schéma d'une vanne clapet.	11
4. Figure (1.2.4) : Fonctionnement d'un seuil gonflable.	13
5. Figure (1.2.5) : Principe d'un seuil gonflé à l'eau.	13
6. Figure (2.2.1) : vue amont d'une hausse labyrinthe.....	17
7. Figure (2.2.2) : vue aval d'une hausse labyrinthe.	18
8. Figure (2.2.3) : Hausse labyrinthe à faible lame déversante.	19
9. Figure (2.2.4) : Hausse labyrinthe à lame déversante modérée.	19
10. Figure (2.2.5) : Hausse labyrinthe à forte lame déversante.	20
11. Figure (2.2.6) : vue amont des hausses à crête rectiligne.	21
12. Figure (2.2.7) : vue aval des hausses grand froid.....	21
13. Figure (2.2.8) : type de hausses utilisées en fonction du rapport h/H.....	22
14. Figure (2.2.9) : photo et schémas représentatifs des hausses rabattables.....	23
15. Figure (2.2.10) : schémas de fonctionnement des hausses rabattables.....	23
16. Figure (2.2.11) : puits d'alimentation solidaire de la hausse (en acier).	24
17. Figure (2.2.12) : puits d'alimentation regroupés dans des chambres aménagées dans les bajoyers..	24
18. Figure (2.2.13) : deux hausses qui se partage le même puits.....	25
19. Figure (2.2.14) : hausses posées sur un seuil en marche d'escalier.	25
20. Figure (2.2.15) : hausses en corolle sur un déversoir en tulipe.....	26
21. Figure (2.2.16) : vue d'en bas d'une hausse labyrinthe.....	27
22. Figure (2.3.1)	28
23. Figure (2.3.2)	28
24. Figure (2.3.3)	29
25. Figure (2.3.4) : simulation de l'écoulement après un premier basculement.....	29
26. Figure (2.4.1) : système de forces agissant sur une hausse labyrinthe.	32
27. Figure (2.4.2) : les différents débits transitant par la chambre de mise en pression.	33

28. Figure (2.4.3) : les débits transitant par la chambre de mise en pression durant un soulèvement du bord amont.....	35
29. Figure (2.4.4) : les différentes sous-pressions dans le puits en fonction des conditions d'utilisations.	38
30. Figure (2.4.5) : courbes de stabilité caractéristiques (fonctionnement normal).	40
31. Figure (2.4.6) : courbes de stabilité caractéristiques (cotes de sécurité).....	41
32. Figure (2.4.7) : courbes de stabilité caractéristiques (Dysfonctionnement).	42
33. Figure (2.6.1) : l'effet des corps flottants sur le déversement.	51
34. Figure (2.6.2) : capture des corps flottants à l'aide d'une drome.	52
35. Figure (2.6.3) : hausses fusibles en Russie.	55
36. Figure (2.6.4) : Poussée thermique.....	56
37. Figure (2.6.5) : Variation du niveau dans la retenue, la glace étant adhérente aux hausses.	56
38. Figure (2.9.1) : coefficient de débit pour les trois types de hausse labyrinthe.....	64
39. Figure (2.9.2) : l'impacte des hausses fusibles.....	66
40. Figure (2.9.3) : les principaux niveaux d'eau après l'installation des hausses fusible.....	67
41. Figure (2.9.4) : les différentes hauteurs calculées des hausses du barrage de LUSSAS (Ardèche en France) 1991.....	68
42. Figure (2.9.5) : hydrogramme du débit aval avec et sans hausses fusibles.	69
43. Figure (3.1.1) : Plan du barrage.	75
44. Figure (3.2.1) : courbe hauteur-capacité.....	77
45. Figure (3.3.1) : Hydrogramme au barrage de Ain Zada non équipé de hausses fusibles.....	84
46. Figure (3.3.2) : Hydrogramme au barrage de Ain Zada équipé de hausses fusibles.....	85
47. Figure (3.4.1) : vue aval des différentes parois de la hausse labyrinthe.	90
48. Figure (3.4.2) : schémas des différentes longueurs des parois de la hausse labyrinthe.....	92

Liste des tableaux :

1. Tableau (1.1.1) : Capacité totale des barrages des pays du Maghreb.	3
2. Tableau (1.1.2) : Taux d'envasement annuel dans les pays du Maghreb	4
3. Tableau (1.1.3) : Envasement moyen annuel des barrages du Maghreb.....	5
4. Tableau (2.2.1) : la marge de basculement en fonction du rapport largeur/hauteur.....	19
5. Tableau (2.9.1) : Rapport dérasement/lame déversante maximale en fonction du type de hausse.	66
6. Tableau (2.9.2) : Rapport largeur/hauteur en fonction du type de hausse.....	68
7. Tableau (3.2.1) : Laminage des crues.....	78
8. Tableau (3.3.1) : les différentes dimensions des trois types de hausse fusible.....	98

Références bibliographiques

1. Agence Nationale des Barrages et des Transferts (1986). *Monographie du barrage de Ain Zada.*
2. Boualem REMINI (2006). *La sédimentation des barrages.*
3. BARCOUDA M., (EDF LNHE, France); CAZAILLET O., (Sogreah, France); COCHET P., (Sogreah, France); JONES B. A., (Snowy Hydro Limited, Australia), LACROIX S., (Hydroplus, France); LAUGIER F., (EDF CIH, France), ODEYER C., (Sogreah, France); VIGNY J. P.,(Hydrocoop, France) (2006). *COST EFFECTIVE INCREASE IN STORAGE AND SAFETY OF MOST DAMS USING FUSEGATES OR P.K. WEIRS1 (VINGT DEUXIEME CONGRÈS DES GRANDS BARRAGES Barcelona).*
4. Hasan T. Kocahan, Business Development Manager, Hydroplus, Inc. (2003) *THE BEHAVIOR OF FUSEGATES IN ICE AFFECTED ENVIRONMENTS; HYDRAULICS AND DESIGN OF FUSEGATES.*
5. Le Blanc M., Hydroplus, France (2006) *Raising a silted reservoir as an alternative to dredging: The example of Ghrib dam, Algeria.*
6. Sylvain Chevalier (2008). *OPTIMISATION DE BARRAGES A L'AIDE DU PROCEDE HYDROPLUS.*
7. Yziquel A. and Monclar J.M, Chirwa M J. travaux n° 765 (2000). *La surélévation du barrage de kamuzu II, mise en œuvre de hausses fusibles en béton de grandes dimensions.*