

EXAMENS ET DIAGNOSTIC DES PAREMENTS AMONT EMERGES ET IMMERGES SUR DE GRANDS LINEAIRES DE BARRAGES LATERAUX - VALORISATION DANS LE DIAGNOSTIC EXHAUSTIF ET L'ETUDE DE DANGER DE L'OUVRAGE

Examinations and diagnosis of emerged and submerged upstream slope of linear embankment dams – valorization of the results in the hazard study of the canal

Maxime DARBOT, Mathieu BARILONE, Christophe PICAULT, Fabrice CRAMPETTE

Compagnie Nationale du Rhône, 4, Rue de Chalon-sur-Saône, 69007 Lyon

m.darbot@cnr.tm.fr ; m.barilone@cnr.tm.fr ; c.picault@cnr.tm.fr ; f.crampette@cnr.tm.fr

MOTS CLEFS

Barrages latéraux, digues, inspection, diagnostic, enrochements

KEY WORDS

Embankment dams, dikes, inspection, diagnosis, riprap

RÉSUMÉ

L'objectif des examens et du diagnostic des parements amont des barrages latéraux de CNR est de procéder à une évaluation complète de l'état physique du parement de l'ouvrage en identifiant et en caractérisant, le cas échéant, les anomalies observées. CNR, en tant que concessionnaire, est particulièrement concerné par ces examens qui portent sur environ 400 km de barrages latéraux le long du Rhône. Ils impliquent à la fois un examen visuel (géométrie) et un diagnostic des protections en enrochements (blocométrie) des parties émergées des parements amont, ainsi qu'un examen subaquatique des parties immergées des ouvrages.

Les parements amont émergés sont inspectés par voie d'eau avec une embarcation équipée d'une caméra autonome, permettant la capture d'images géo-référencées des ouvrages. Les données collectées servent à identifier la nature des protections sur les parements, surveiller l'état général des ouvrages, et cartographier la végétation ainsi que les désordres observés. L'analyse et la classification des anomalies sont réalisées par un ingénieur spécialisé en surveillance des ouvrages hydrauliques.

Parallèlement à l'examen visuel des parements émergés, un diagnostic des protections en enrochements est réalisé par un ingénieur spécialisé en ingénierie des matériaux. La méthodologie inclut la détermination de la blocométrie nécessaire pour répondre aux sollicitations hydrauliques du Rhône (courant naturel, batillage, vagues dues au vent), et la mesure de la blocométrie in situ. Le couplage du recalcul et des essais blocométriques in situ permet de vérifier l'adéquation des enrochements en place.

Les examens subaquatiques, rendus nécessaires par l'impossibilité de vidanger complètement les ouvrages, utilisent des technologies avancées comme les systèmes de sondeurs multifaisceaux (SMF). Ces examens sont contraints par des problématiques de visibilité, d'accessibilité et de courantologie aux abords des ouvrages. La détection des désordres subaquatiques est réalisée par un trinôme composé d'un hydrographe, d'un ingénieur en génie civil et d'un cartographe. L'identification des anomalies repose sur une analyse visuelle des parements amont des barrages latéraux à partir de modèles 3D issus du traitement des données du multifaisceau.

À l'issue des examens et diagnostics, une cartographie des désordres détectés est établie. Une première analyse de leur impact potentiel sur la sûreté des ouvrages est réalisée, suivie, si nécessaire, de recommandations de maintenance et de surveillance. Ce processus rigoureux permet à CNR d'assurer la sécurité et la performance des protections amont des barrages latéraux, garantissant ainsi leur durabilité et leur efficacité face aux sollicitations hydrauliques.

ABSTRACT

The objective of the examinations and diagnosis of the upstream facings of CNR's lateral dams is to conduct a comprehensive assessment of the physical condition of the dam's facing by identifying and characterizing any observed anomalies. CNR, as the concessionaire, is particularly concerned with these examinations, which cover approximately 400 km of lateral dams along the Rhône. These examinations involve both a visual inspection (geometry) and a diagnosis of the rockfill protections (blockometry) of the emerged parts of the upstream facings, as well as an underwater inspection of the submerged parts of the structures.

The emerged upstream facings are inspected via water using a boat equipped with an autonomous camera, allowing the capture of geo-referenced images of the structures. The collected data is used to identify the nature of the protections on the facings, monitor the general condition of the structures, and map the vegetation and observed disorders. The analysis and classification of anomalies are carried out by an engineer specialized in hydraulic structure monitoring.

In parallel with the visual examination of the emerged facings, a diagnosis of the rockfill protections is conducted by an engineer specialized in materials engineering. The methodology includes determining the necessary blockometry to withstand the hydraulic stresses of the Rhône (natural current, wave action, wind-driven waves), and measuring the in-situ blockometry. The combination of recalculations and in-situ blockometry tests allows verification of the adequacy of the existing rockfill.

Underwater examinations, necessitated by the impossibility of completely draining the structures, use advanced technologies such as multibeam sonar systems (MSS). These examinations are constrained by issues of visibility, accessibility, and currents near the structures. The detection of underwater disorders is carried out by a team composed of a hydrographer, a civil engineer, and a cartographer. The identification of anomalies is based on a visual analysis of the upstream facings of the lateral dams from 3D models generated from the multibeam data.

At the end of the inspections and diagnoses, a mapping of the disorders is established. An initial analysis of the potential impact on the safety of the structures is conducted, followed by maintenance and monitoring recommendations. This rigorous process allows CNR to ensure the safety and performance of the upstream protections of the lateral dams, thereby guaranteeing their durability and effectiveness in facing hydraulic stresses.

1. INTRODUCTION

Les 400 km de barrages latéraux de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) sont de classe B [1]. Les Etudes De Dangers (EDD) réalisées pour l'ensemble des aménagements de CNR détaillent la constitution des barrages ainsi que les caractéristiques des composants (protection, étanchéité, drainage, ...) nécessaires à leur bon fonctionnement. Il est important de noter que les barrages latéraux de CNR canalisent le Rhône et sont constamment en charge et que, du fait de leur constitution, ils ne sont pas étanches. Les eaux de percolations sont drainées dans le corps de l'ouvrage et sont récupérées dans un contre-canal situé à l'aval des ouvrages.

Le Diagnostic Exhaustif des Ouvrages (DEO), à réaliser tous les 15 ans sur ces ouvrages s'appuie sur la surveillance courante des ouvrages et la complète par des observations visuelles des parties d'ouvrages difficilement accessibles ou nécessitant des moyens spéciaux pour être observées.

Le Centre d'Essais, de Surveillance, d'Analyses et de Mesures pour l'Exploitation (CESAME) de CNR a mené une étude afin d'identifier les informations pertinentes à intégrer dans le DEO.

La démarche d'analyse passe en revue l'ensemble des modes de défaillance susceptibles d'intervenir sur les barrages latéraux. Elle identifie, pour chaque mode de défaillance, tous les facteurs initiateurs ou aggravants, puis toutes les dégradations susceptibles d'être engendrées. Dans un second temps, l'étude associe à ces facteurs et dégradations une cinétique de développement et des actions de surveillance permettant leur détection.

Aussi, en complément des actions de surveillance courante, l'étude recommande de réaliser, dans le cadre du DEO des barrages latéraux :

- Un examen visuel de la totalité des parements amont émergés (cf. paragraphe 2.1) ;
- Un examen des parements amont immergés dans les secteurs identifiés comme nécessitant une inspection (cf. paragraphe 2.2) ;
- Un diagnostic des protections en enrochements par échantillonnage (cf. paragraphe 2.3).



Figure 1 : Photographie du parement amont du barrage latéral rive droite de l'aménagement de Vaugris à plan d'eau bas

2. INVESTIGATIONS SUR LES PAREMENTS AMONT DANS LE CADRE DES DEO

Après avoir déterminé la nature et la localisation des investigations à mener sur le parement amont, l'étude a consisté à évaluer de manière générique, l'impact sur le niveau de sûreté de l'ouvrage de différents désordres théoriques en parement amont. Ainsi, une centaine de calculs de stabilité ont été réalisés en considérant différentes importances de dégradations de parements amonts (de quelques m^3 à plusieurs 10^{aines} de m^3) et diverses géométries d'ouvrages. Le cas 1 (EE) correspond à une érosion externe superficielle (de l'ordre de 50 cm), le cas 2 (EEM) correspond à une érosion externe impactant le corps du parement amont (de l'ordre de 2 m de profondeur). Les calculs ont été poussés jusqu'à une configuration majeure d'un glissement amont emportant la totalité du talus ainsi qu'une partie de la piste (cas 3 GAMP).

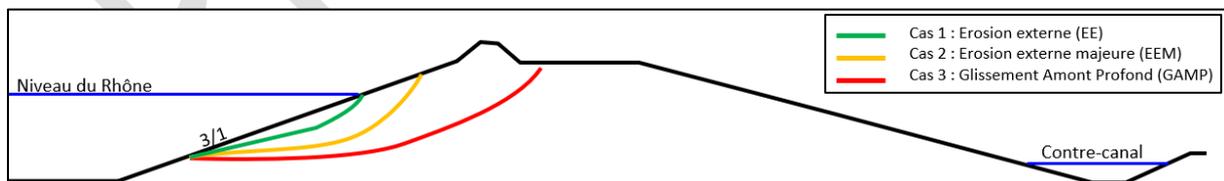


Figure 2 : Profils d'études pour le glissement amont

Dans chaque configuration, il a été analysé :

- L'impact sur la stabilité au glissement en talus amont (étude de glissement sur une géométrie modifiée).
- L'impact sur la stabilité au glissement du talus aval (notamment par modification du gradient interne de l'ouvrage, le désordre venant dégrader le colmatage du parement amont).

- L'impact vis-à-vis des risques d'érosion interne (notamment par modification du gradient interne de l'ouvrage, le désordre venant dégrader le colmatage du parement amont, et également par création d'écoulements concentrés au travers de l'ouvrage).

Les calculs de stabilité réalisés sur les géométries des digues CNR ont démontré qu'aucune des 3 configurations de désordres n'aboutit à obtenir un coefficient de sécurité globale pour l'ouvrage inférieur à 1. Ainsi, aucune de ces 3 configurations de désordres ne conduirait à une rupture de l'ouvrage.

Cependant, pour éviter une détérioration significative de l'ouvrage qui entraînerait des travaux de maintenance importants, trois catégories de constats ont été établies : constat non significatif (à ne pas faire figurer dans le DEO), constat mineur (à intégrer dans le DEO pour en conserver la trace et en suivre l'évolution) et constat significatif (à intégrer dans le DEO et à analyser en termes d'impact sûreté dans l'EDD).

2.1. Examen des parements amont émergés

Pour obtenir une vision de l'état des barrages latéraux, CNR intègre au diagnostic exhaustif de ses ouvrages un examen visuel des parements amont émergés. Celui-ci est réalisé sur la totalité des parements et est effectué idéalement au moment où les plans d'eau sont bas de manière à inspecter au mieux la zone de marnage, zone habituellement la plus sollicitée par la houle et le batillage.

L'examen est effectué à l'aide d'un Système de prise de vue des Parements AMont (SysPAAM) développé par CNR. Le système SysPAAM, installé sur un bateau, utilise un appareil photo reflex pour capturer à intervalle régulier des photos géo-positionnées du parement amont, offrant ainsi un état des lieux exhaustif des ouvrages. SysPAAM fonctionne en programmant l'appareil photo pour prendre automatiquement des photos à des intervalles déterminés (généralement toutes les 1 à 2 secondes), à une distance donnée de la berge (habituellement 60 mètres), et à une vitesse de bateau pouvant atteindre environ 30 km/h. Pour compenser les mouvements de roulis et de tangage, le système d'acquisition est monté sur un stabilisateur à trois axes.



Figure 3 : Illustration de l'outil SysPAAM

Les constats relevés lors de l'examen visuel des parements amont émergés sont les désordres constatés sur l'état de la protection (affaissement, désimbrication des enrochements, etc...), les secteurs où sont présents des arbres de gros diamètre et les ouvrages implantés en talus amont (tête d'aqueduc, balise de navigation, quai, duc d'Albe ...).

L'examen permet de détecter les désordres ponctuels qui sont susceptibles d'avoir un impact sur la sûreté.

Enfin, pour avoir une vision globale des parements, sont recherchés les secteurs qui présenteraient un nombre important de désordres mineurs ou significatifs. Il sera recherché sur ces secteurs la cause de ces dégradations multiples et notamment l'état de la protection en enrochements.



Figure 4 : Exemple de désordre observé

Ci-dessous un logigramme récapitulatif de la classification des désordres observables lors de l'examen visuel.

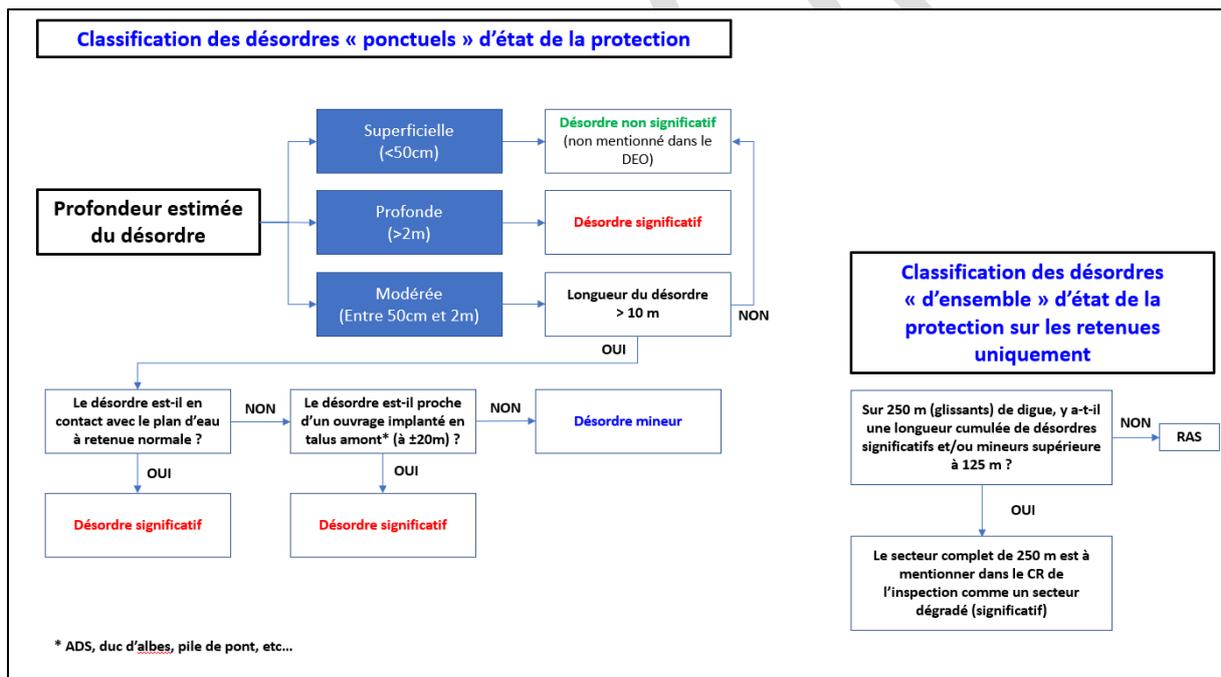


Figure 5 : Classification des désordres d'état de la protection

2.2. Examen des parements amont immergés

Afin de concentrer les efforts des examens subaquatiques sur des secteurs qui le nécessitent, une approche par cotation de risque a été déterminée pour discriminer les tronçons des barrages latéraux.

Pour les barrages latéraux, les facteurs de risques sont des données qui varient géographiquement selon le secteur considéré. Il est donc nécessaire de diviser les barrages latéraux en secteurs unitaires représentatifs. La maille doit être suffisamment fine pour permettre une évaluation objective du risque

et suffisamment large pour que l'analyse reste exploitable à l'échelle des 400 km d'ouvrage. En tenant compte de la finesse des informations disponibles et de l'objectif d'établir un plan d'actions basé sur une cotation de chaque secteur, les ouvrages ont alors été divisés en secteurs unitaires de 250 mètres linéaires. Les facteurs de risques, permettant d'attribuer cette cotation pour chacun des tronçons unitaires, sont les suivants :

- **Largeur du barrage** : Définie pour chaque tronçon de structure et de géométrie homogène.
- **Sollicitation hydraulique** : La sollicitation hydraulique prépondérante sur le parement amont immergé est la vitesse du courant. Elle est calculée à partir d'un profil tous les 100 m au moyen d'un modèle hydrodynamique unidimensionnel d'écoulement sur le linéaire du Rhône. La vitesse obtenue est considérée comme représentative sur une longueur de 50 m en amont et 50 m en aval de ce profil. La vitesse retenue pour chaque secteur unitaire de 250 m est la vitesse maximale des différents profils inclus dans ce tronçon.
- **État des protections en enrochements** : Historiquement et ponctuellement, des diagnostics ont été réalisés sur les enrochements. Ces diagnostics ont identifié des sections en bon état et d'autres, a priori, dégradées. Si tout ou partie d'un secteur unitaire de 250 m présente des enrochements dégradés ou un manque d'information, l'entièreté du secteur est considérée par défaut comme dégradé.
- **Présence d'ouvrage implanté en talus amont** : Ces ouvrages (balise de navigation, duc d'Albe, pile de pont, etc...) sont susceptibles d'engendrer des courants perturbés en parement amont et donc d'en faciliter la dégradation. Si au moins un ouvrage est présent en talus amont sur le secteur unitaire, l'entièreté du secteur unitaire est considérée comme présentant des ouvrages en talus amont.
- **Présence d'ouvrage traversant** : Ces ouvrages traversant le corps du barrage latéral peuvent être impactant en cas de rupture ou dégradation. Ces ouvrages constituent potentiellement un chemin préférentiel pour les écoulements internes. Ils sont donc susceptibles de favoriser un phénomène d'érosion le long de l'ouvrage et/ou à son débouché. Ils présentent systématiquement une partie d'ouvrage en parement amont pouvant être le siège de dégradations ou, à l'instar des ouvrages implantés en talus amont, présenter un risque de dégradations et/ou de perturbation hydraulique. Si au moins un ouvrage est présent sur le secteur unitaire, l'entièreté du secteur unitaire est considérée comme présentant des ouvrages en talus amont.
- **Présence d'arbres** : Le recensement de la végétation a été fait à l'échelle des 400 km d'ouvrages sur la base de constats visuels d'ensemble (vues aériennes, inspections visuelles, etc...). Si une partie du secteur unitaire de 250 m présente des arbres importants (diamètre du tronc) en talus amont, on considère alors l'entièreté de secteur avec des arbres importants. Ces arbres sont susceptibles de désimbriquer la protection en parement amont et en cas de chablis, de la déstabiliser voire la supprimer.
- **Zone d'incident** : Si au moins une partie d'un incident (écoulement perchés, piézométrie haute, zone ayant historiquement présenté des fontis, etc...) est présent sur le secteur unitaire, toute la zone est considérée comme un incident.
- **Zone sensible à l'érosion interne** : Identifiée dans les EDD première version, si au moins une partie d'une zone sensible (gradient hydraulique élevé) est présente sur le secteur unitaire, toute la zone est considérée comme affectée d'érosion interne.

La cotation finale, calculée pour chaque portion élémentaire de barrage latéral de 250 mètres, permet de déterminer si le tronçon doit être inspecté ou non sur sa partie immergée.

Le tableau ci-après synthétise cette approche :

Tronçon homogène EDD	700 m						450 m					
	250 m		250 m		200 m		250 m		200 m			
Secteur unitaires de l'étude	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
Vitesse (tous les 100 m)												
Enrochements dégradés (Pk à Pk)	■					■		■				■
Présence ouvrages talus amont (Pk)							x					x
Présence ouvrages traversants (Pk)	x		x	x	x				x			
Largeur (liée au tronçon EDD)	faible largeur						forte largeur					
Présence de végétation (Pk à Pk)			■				■	■		■		
Zone d'incident (Pk à Pk)							■	■	■			■
Erosion Interne (Pk à Pk)							■	■	■			
Critères retenus pour le secteur unitaire considéré dans le cadre de l'étude	Vitesse retenue : max(V1;V2) Enrochements dégradés : OUI Ouvrage Talus Amont : NON Ouvrage traversant : OUI Largeur : Faible Végétation : NON Incident : NON Erosion Interne : NON		Vitesse retenue : max(V3;V4;V5) Enrochements dégradés : NON Ouvrage Talus Amont : NON Ouvrage traversant : OUI Largeur : Faible Végétation : OUI Incident : NON Erosion Interne : NON		Vitesse retenue : max(V6;V7) Enrochements dégradés : OUI Ouvrage Talus Amont : OUI Ouvrage traversant : NON Largeur : Faible Végétation : OUI Incident : OUI Erosion Interne : OUI		Vitesse retenue : max(V8;V9;V10) Enrochements dégradés : OUI Ouvrage Talus Amont : NON Ouvrage traversant : OUI Largeur : Forte Végétation : OUI Incident : OUI Erosion Interne : OUI		Vitesse retenue : max(V11;V12) Enrochements dégradés : OUI Ouvrage Talus Amont : NON Ouvrage traversant : NON Largeur : Forte Végétation : OUI Incident : OUI Erosion Interne : NON			

Tableau 1 : Principe de notation par secteur unitaire de barrage latéral

Les secteurs de barrages latéraux dont les parements amont immergés sont à examiner, sont les secteurs ayant une cotation supérieure à 80. Le tableau 2 explicite les huit critères de cotation et la notation associée.

Hormis pour l'érosion interne et les incidents, la valeur des notes correspond à l'importance potentielle de chacun des critères dans l'occurrence de processus de dégradation sur les barrages latéraux. Cette valeur est fixée pour chacun des critères sur la base du retour d'expérience de la CNR dans le suivi de ses ouvrages et dans l'analyse des scénarios de dégradation qui ont affectés les ouvrages par le passé. La logique du cumul des notes est recherchée devant l'importance relative de chaque critère pris individuellement. On notera pour le détail que l'encodage du chiffre des unités pour certains critères permet d'identifier certains critères dans la note finale (par exemple, si le chiffre des unités est supérieur ou égal à 5, on notera l'existence d'une sollicitation hydraulique significative, une note supérieure à 2000 permet d'identifier un secteur sensible à l'érosion interne, etc...).

Tableau 2 : Notation des critères

Critère	Commentaires	Note
Sollicitation hydraulique	Vitesse du courant < 2.5 m/s	0
	Vitesse du courant comprise entre 2.5 et 3.5 m/s	5
	Vitesse du courant > 3.5 m/s	25
Etat des protections amont	Protection en bon état	0
	Protection dégradée en retenue (ou pas d'information sur l'état de la protection en retenue)	42
	Protection dégradée en canal d'amenée (ou pas d'information sur l'état des protections en canal d'amenée)	10
Présence d'ouvrages implantés dans le talus amont	Présent	20
	Absent	0
Ouvrage traversant le corps du barrage	Présent	31
	Absent	0
Largeur du barrage	Largeur < 32 m	40
	Largeur comprise entre 32 et 45 m	20
	Largeur > 45 m	0
Présence d'arbres de gros diamètre	Présent	10
	Absent	0
Zone d'incident	Zone d'incident	1000
	Zone en cours de clôture	20
	Hors zone d'incident	0
Zone sensible à l'érosion interne	Zone sensible à l'érosion interne	2000
	Zone non sensible à l'érosion interne	0

L'examen des parements amont immergés des secteurs identifiés est réalisé par bateau équipé de sondeurs multifaisceaux. La recherche des potentiels désordres est ensuite effectuée à l'aide du logiciel FLEDERMAUS (logiciel d'analyse géospatiale 3D).

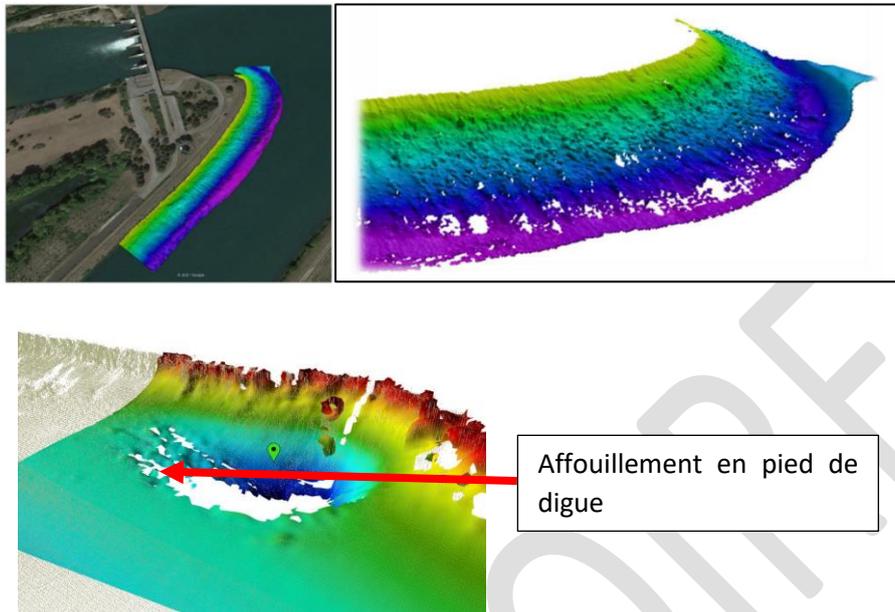


Figure 6 : Modèle 3D issue d'un levé bathymétrique sur l'aménagement de Saint-Vallier (vue des enrochements)

Les désordres relevés lors de l'examen des parements amont immergés sont des défauts de géométrie. Ces défauts peuvent inclure des irrégularités de surface et des écarts par rapport aux plans de conception.

Les désordres observés ont été classifiés en fonction de leurs dimensions. Chaque catégorie représente un niveau différent d'impact potentiel :

- Les désordres de moins de 0.5 m de profondeur indiquent une suspicion de dégradation superficielle de la protection. Ces désordres sont considérés comme non significatif et ne nécessitent pas d'être cherchés dans le cadre du DEO.
- Les désordres ayant une profondeur comprise entre 0.5 m et 2.0 m de profondeur indiquent une suspicion de dégradation de la protection et éventuellement de la recharge amont sous-jacente. Ces désordres sont recherchés dans le cadre du DEO de manière à être suivi dans le temps.
- Enfin on considère que les désordres de plus de 2.0 m de profondeur représentent une suspicion de dégradation du corps de l'ouvrage ; ils sont également recherchés dans le cadre du DEO pour en évaluer l'impact sur la sûreté de l'ouvrage.

Comme indiqué ci-avant, aucun des désordres modélisés sur le parement amont ne conduit à une rupture de l'ouvrage. Pour autant il convient de détecter des désordres significatifs pour en identifier les causes et programmer, le cas échéant les opérations de maintenance nécessaires.

Ainsi on souhaite détecter les suspicions de dégradation de la protection amont pour en suivre l'évolution et, les suspicions de dégradation du corps de l'ouvrage pour en analyser l'impact sûreté et l'origine. A noter aussi qu'une dégradation même superficielle mais de grande dimension nécessitera une analyse sûreté pour déterminer l'origine de ces dégradations (sous-dimensionnement de la protection, particularité hydrauliques locales, etc...). Des seuils d'importance surfacique des défauts ont été déterminés de manière à exclure tous les petits désordres et se concentrer sur ce qui

pourrait impacter l’ouvrage sur le long terme. Ces seuils sont basés sur la géométrie des ouvrages et le retour d’expérience CNR.

Tableau 3 : Classification des désordres observés sur le parement immergé

Profondeur	Appréciation	Surface	Classement DEO
< 0.5 m	Non significatif	Toutes	Non mentionné
Entre 0.5 et 2.0 m	Dégradation de la protection	< 200 m ²	Non mentionné
		≥ 200 m ²	Désordre mineur
		≥ 2 000 m ²	Désordre significatif
> 2.0 m	Dégradation du barrage latéral	< 100 m ²	Désordre mineur
		≥ 100 m ²	Désordre significatif

2.3. Diagnostic des protections en enrochements

Afin de résister aux agressions du courant du fleuve et des vagues provoquées par le passage des bateaux et le vent, les parements amont des barrages latéraux CNR ont été protégés lors de la construction.

Sur les secteurs protégés par des enrochements, la blocométrie est homogène sur un même tronçon : entre 10/100 kg pour les zones normalement exposées et 100/400 kg pour les zones fortement exposées aux contraintes hydrauliques (courbes du Rhône, confluences, ...) [2]. La perte de la protection du parement amont constituerait un précurseur à une dégradation significative de l’ouvrage. Il est ainsi nécessaire de s’assurer du bon état et du bon dimensionnement de cette protection.

Ces enrochements ont subi depuis leur mise en place des agressions d’origine hydraulique (courant, batillage et houle) et météorologique (gel, ensoleillement, ...) qui ont pu entraîner des dégradations et nécessiter des travaux d’entretien. La méthodologie consiste à vérifier que la protection en place (essais blocométriques [3]) est en adéquation avec la protection théorique suffisante pour résister aux sollicitations calculées et envisagées sur le Rhône [4]. Ces calculs de redimensionnement prennent notamment en compte les dernières mises à jour des modèles mathématiques CNR qui définissent, entre autres, les vitesses de courant et niveaux d’eau attendus jusqu’à la crue exceptionnelle définie par la réglementation (crue d’occurrence 1 500 ans) [5].



Figure 7 : Essais blocométriques réalisés à Saint-Vallier

Des surveillances régulières et des maintenances des ouvrages CNR sont organisées et efficaces. Ainsi la ruine du barrage par une dégradation de son parement amont ne pourrait se produire que si la sollicitation hydraulique générant cette dégradation s’établissait en continu, et que la cinétique de dégradation soit si rapide qu’elle ne permette pas à la surveillance courante de détecter ces désordres et mettre en œuvre des mesures de sauvegarde.

Des parties d'ouvrages CNR ont déjà été sollicitées par des épisodes hydrauliques ayant engendré de fortes vitesses de courant (notamment lors des grandes crues de 2003 avec des vitesses de courant de l'ordre de 4 à 5 m.s⁻¹). Il n'existe pas de surveillance efficace des parties d'ouvrages immergées qui puisse être mise en œuvre durant un épisode de crue. Par ailleurs, il y a déjà eu dans le monde des ruptures d'ouvrages liées à ces sollicitations (par exemple la rupture de la digue de l'Agly en 1999). Compte tenu de ces éléments, si la sollicitation hydraulique générée par les vitesses des courants excède la résistance de la protection, le risque de rupture ne peut pas être écarté. La protection en enrochement doit donc impérativement être capable de résister à ces sollicitations liées au courant naturel. En conséquence, si lors du diagnostic, la blocométrie en place est inférieure à la blocométrie théorique requise, une analyse devra être réalisée afin de préconiser des opérations d'investigations complémentaires, et/ou de maintenance.

La surveillance des parements amont émergés réalisée par CNR n'a, à ce jour, révélé aucun désordre significatif lié aux vagues (houle, batillage) ayant engendré un risque sûreté. Il n'est pas recensé non plus dans le monde de ruptures d'ouvrages similaires aux barrages latéraux CNR pour ces sollicitations (on notera le cas de dégradation par des vagues engendrées par du vent du barrage de Kingsley [6]). Ces sollicitations sont discontinues ou de courtes durées, la surveillance régulière est donc en capacité de détecter tout désordre avant qu'il n'impacte la sûreté de l'aménagement. Le risque de rupture pour ce type de sollicitation peut donc être écarté. Bien que ces processus de dégradation par les vagues ne puissent pas conduire seuls à la ruine de l'ouvrage, ils peuvent engendrer à terme des dégradations qui peuvent ponctuellement affaiblir la protection vis-à-vis du courant. Des secteurs dont les blocs n'auraient pas la taille requise pour résister à la houle ou au batillage, nécessitent donc d'être surveillés. En conséquence, si lors du diagnostic la blocométrie en place est inférieure à la blocométrie théorique requises pour ces 2 types de sollicitations, alors, le secteur devra nécessiter des opérations de surveillance spécifique. Etant donné les cinétiques lentes et l'absence de constat de dégradation de la protection liée au batillage sur les ouvrages CNR depuis leur mise en eau, une surveillance visuelle de la partie émergée tous les 5 ans sur ces secteurs sous dimensionnés est adaptée aux enjeux sûreté.

Pour les vents violents, Météo France assure une surveillance et déclenche depuis 2006 des bulletins de vigilance en fonction de l'intensité attendue de l'épisode. Le type d'événements comme la tempête de 1999 aurait été classé en vigilance rouge [7]. Comme expliqué ci-dessus, aucun des phénomènes « vents violents » n'a conduit à des dégradations sur les parements amont des barrages latéraux CNR susceptibles de remettre en cause la sûreté des ouvrages. On peut donc raisonnablement partir du principe que, sur les secteurs où la protection en place est inférieure à la blocométrie théorique nécessaire vis-à-vis des vagues dues au vent, une surveillance sera à déclencher après des épisodes de « vents violents » classés en alerte rouge Météo France, ou ayant conduit dans les environs proches des ouvrages CNR à des dégâts majeurs aux infrastructures indiquant un phénomène de forte intensité très local.

La classification des désordres et leurs préconisations de surveillance sont rappelées dans le schéma suivant :

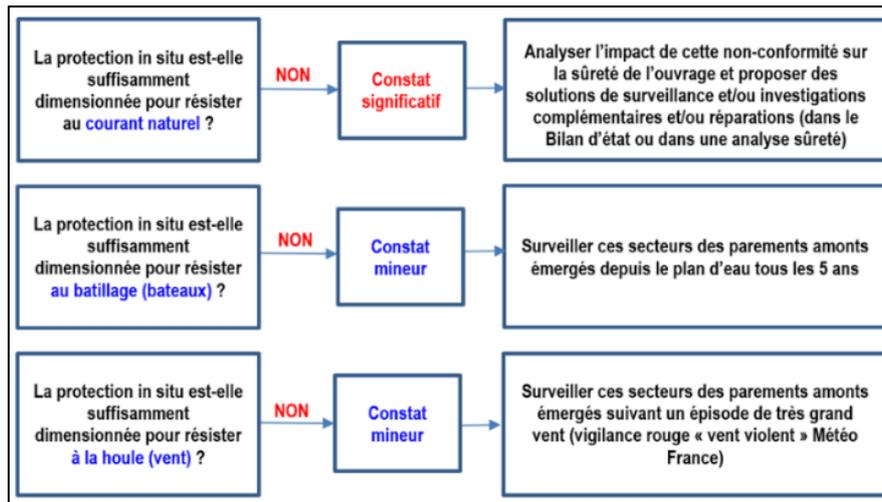


Figure 8 : Classification des constats issues du diagnostic des protections en enrochements

3. INTEGRATION DANS L'EDD

Les observations recueillies lors des inspections des parements amont des barrages latéraux, telles que mentionnées précédemment, sont mises en perspective avec les Visites Techniques Approfondies (VTA), les Inspections Détaillées Périodiques (IDP) des Aqueducs-Drains-Siphons (ADS) présents sur les ouvrages ainsi que la comparaison des altimétries des crêtes de barrages réelles avec les niveaux d'eau attendus.

Les constats significatifs font l'objet d'une analyse approfondie. Ainsi, pour réaliser les analyses de risques, le DEO fournit une vision globale et détaillée de l'ouvrage, englobant à la fois les constats mineurs, qui nécessitent un suivi dans le temps, et les constats significatifs, intégrés dans le bilan d'état.

Dans l'Edd, le risque d'érosion externe du talus amont est abordé non pas sous l'angle de l'initiation de l'érosion, mais plutôt en termes du risque de glissement qu'un affouillement ou une érosion déjà observée pourrait engendrer. Les constats sont examinés individuellement en fonction des observations issues des inspections des talus : par exemple, en cas d'affouillement, on évalue si celui-ci pourrait provoquer un glissement suffisamment important pour entraîner une rupture totale de la digue.

Les préconisations de surveillance quant à elle renforcent ainsi la fiabilité de la barrière de sécurité combinant surveillance et action, en identifiant précisément les secteurs sensibles.

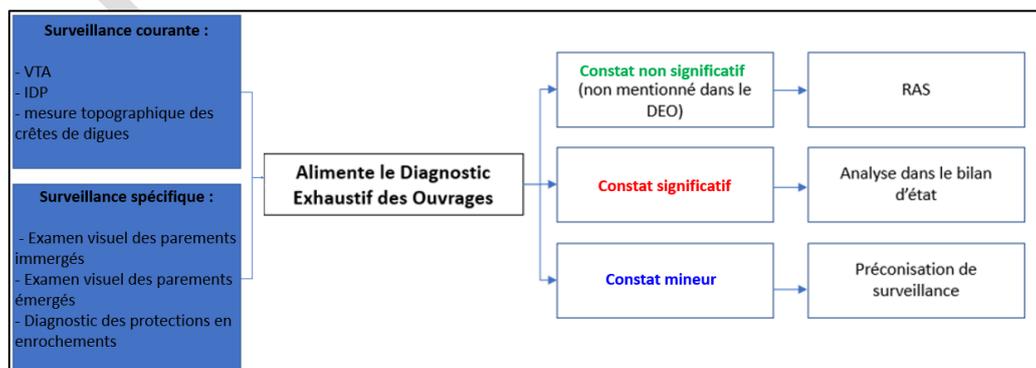


Figure 9 : Intégration des constats issus des examens du parement amont dans l'EDD

CONCLUSION

L'objectif principal des examens et diagnostics des parements amont des barrages latéraux de CNR est de mener une analyse approfondie de leur état structural, en identifiant et caractérisant les anomalies observées. Elles incluent des inspections des parements émergés, des parements immergés ainsi que le contrôle de la blocométrie des protections en enrochements.

Les inspections visuelles des parements émergés sont réalisées depuis une embarcation équipée d'un système de caméra autonome, permettant la capture d'images géolocalisées des structures. Ces données servent à caractériser les protections, surveiller l'état des ouvrages, et cartographier la végétation ainsi que les désordres détectés.

L'inspection des parements immergés, rendue complexe par l'impossibilité de vidanger totalement les structures, des technologies avancées telles que les sondeurs multifaisceaux sont utilisées.

Enfin, un diagnostic des protections en enrochements est conduit. Ce diagnostic inclut la détermination de la blocométrie en fonction des contraintes hydrauliques du Rhône et la vérification de la conformité des enrochements existants à travers des mesures réalisées sur site.

Les résultats des investigations sont intégrés dans le DEO de l'ouvrage et est analysé dans le bilan d'état de l'aménagement.

In fine, ces investigations constituent une donnée d'entrée clé dans l'argumentaire utilisé pour évaluer le risque des événements redoutés centraux (ERC), analysés dans l'EDD.

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers Mathieu BARILONE, ingénieur génie-civil et adjoint au responsable de division CESAME de CNR, Fabrice Crampette, ingénieur sûreté, et Christophe PICAULT, expert en surveillance génie civil, pour leur précieux soutien, leurs conseils avisés et leur disponibilité tout au long de la réalisation de cette étude et de cet article. Leurs connaissances et leurs expertises ont été essentielles pour mener à bien ce travail et ont grandement contribué à sa qualité et à sa pertinence.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (2018). Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu
- [2] MATHURIN, PERRIER (2004). Méthodes de diagnostic global de l'état des protections de digues du Rhône aménagé
- [3] AFNOR (2003). Enrochements. NF EN 13383
- [4] DARBOT, DUMAS, FUCHS (2024). Evaluation des protections en enrochements : inspection visuelle et diagnostic
- [5] MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (2018). Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages.
- [6] ASDSAO (2022). The 50-Year Anniversary of the Kingsley Dam Wave Erosion Incident. Baltimore, 11p.
- [7] METEO FRANCE (2019). Fiche Tempête. Tempête Lothar du 26 décembre 1999