

RAPPORT D'ÉTUDE
N°DRA-13-126129-01017C

25 / 10 / 2013

**DRA-91 (2012) - Maîtrise des Risques
Accidentels sur les ouvrages hydrauliques :
Opération B.2**

**Valorisation des dispositifs d'auscultation dans
les études de dangers de barrages**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

DRA-91 (2012) - Maîtrise des Risques Accidentels sur les ouvrages hydrauliques : Opération B.2

Valorisation des dispositifs d'auscultation dans les études de dangers de barrages

Direction des Risques Accidentels

Liste des personnes ayant participé à l'étude : François MASSE, Anabel LAHOZ, Damien FABRE

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

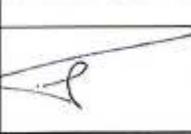
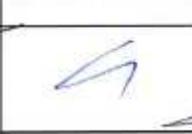
	Rédaction	Relecture	Vérification		Approbation
NOM	François MASSÉ Anabel LAHOZ	Thibault BALOUIN	Frédéric MERLIER	Guillaume CHANTELAUVE	Sylvain CHAUMETTE
Qualité	Ingénieur Unité 2E2S Ingénieur Unité DIAG Direction des Risques Accidentels	Ingénieur Unité DIAG Direction des Risques Accidentels	Responsable Unité DIAG Direction des Risques Accidentels	Délégué appui à l'administration Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle AGIR Direction des Risques Accidentels
Visa					

TABLE DES MATIÈRES

1. GLOSSAIRE ET DEFINITIONS.....	5
2. INTRODUCTION	7
2.1 Contexte et Objet de l'étude.....	7
2.2 Déroulement de l'étude	8
2.3 Structure du rapport	9
3. PRESENTATION GENERALE DES DISPOSITIFS D'AUSCULTATION.....	11
3.1 Contexte.....	11
3.1.1 L'auscultation dans la maitrise de la sécurité des ouvrages	11
3.1.2 Réglementation.....	12
3.2 Objectifs de l'auscultation.....	14
3.2.1 Types d'auscultation.....	14
3.2.2 Phénomènes mesurés.....	16
3.3 Description des systèmes d'auscultation.....	21
3.3.1 Description fonctionnelle.....	21
3.3.2 Grandeurs physiques mesurées.....	21
3.3.3 Les appareils de mesure	22
3.3.4 Réalisation et transmission des mesures	23
3.3.5 Les traitements de 1 ^{er} et 2 ^{eme} niveaux	24
3.3.6 Analyse des données	25
3.3.7 Interprétation et exploitation des résultats	26
4. EVALUATION DES PERFORMANCES DES DISPOSITIFS D'AUSCULTATION DANS LE CADRE D'UNE ETUDE DE DANGERS.....	29
4.1 Introduction	29
4.2 L'étude de dangers et les barrières de sécurité	29
4.2.1 L'étude de dangers.....	29
4.2.2 Présentation de l'approche barrière.....	30
4.2.3 Les spécificités des systèmes d'auscultation.....	32
4.3 Critères adaptés aux systèmes d'auscultation long terme	33
4.3.1 Critères de définition.....	33
4.3.2 Efficacité	34
4.3.3 Temps de réponse.....	35

4.3.4 Pérennité des mesures	35
4.3.5 Intégration dans l'étude de dangers : 3 approches envisagées	36
4.3.6 Discussion sur ces trois approches.....	40
4.4 Critères adaptés aux systèmes d'auscultation court terme	41
4.4.1 Critères minimaux	41
4.4.2 Critère d'efficacité	42
4.4.3 Critère de temps de réponse	43
4.4.4 Niveau de confiance	44
4.4.4.1 Niveau de confiance des sous-systèmes techniques	44
4.4.4.2 Niveau de confiance des sous-systèmes humains	45
4.4.5 Maintien des performances dans le temps	47
4.4.6 Synthèse de l'évaluation	48
5. CRITERES D'APPRECIATION DE DISPOSITIFS PARTICULIERS	51
5.1 Critères d'appréciation des appareils de mesures.....	51
5.2 Mesure des mouvements et déformations.....	52
5.2.1 Pendules directs et inverses	52
5.2.2 Planimétrie et nivellement.....	53
5.2.3 Extensométrie	54
5.2.4 Contrôle de joints et fissures.....	55
5.3 Mesure des infiltrations et pressions	56
5.3.1 Piézomètre.....	56
5.3.2 Débits de fuite ou de drainage	57
5.3.3 Fibre optique.....	58
5.4 Synthèse des performances de dispositifs d'auscultation particuliers	59
6. CONCLUSION	61
7. BIBLIOGRAPHIE.....	63
7.1 Référentiels d'évaluation des systèmes de sécurité	63
7.2 Bulletins CIGB	63

1. GLOSSAIRE ET DEFINITIONS

Barrière technique de sécurité (BTS) : Ensemble d'éléments techniques nécessaires et suffisants pour assurer une fonction de sécurité. On les appelle aussi des Mesures de Maîtrise des Risques (MMR).

Dispositif de sécurité : Elément unitaire, autonome, ayant pour objectif de remplir une fonction de sécurité, dans sa globalité. On distingue des dispositifs actifs et des dispositifs passifs.

Efficacité ou capacité de réalisation : Capacité d'une barrière à remplir la mission/fonction de sécurité qui lui est confiée pendant une durée donnée et dans son contexte d'utilisation. En général, cette efficacité s'exprime en pourcentage d'accomplissement de la fonction définie. Ce pourcentage peut varier pendant la durée de sollicitation de la barrière de sécurité.

Fonction de sécurité : Fonction ayant pour but la réduction de la probabilité d'occurrence et potentiellement les effets et conséquences d'un événement non souhaité dans un système. Les fonctions de sécurité peuvent être assurées par des barrières techniques de sécurité, des barrières humaines (activités humaines), ou plus généralement par la combinaison des deux. Une même fonction peut être assurée par plusieurs barrières de sécurité.

Niveau de confiance (NC) : Le niveau de confiance est la classe de probabilité pour qu'une barrière, dans son environnement d'utilisation, n'assure pas la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie. Cette classe de probabilité est déterminée pour une efficacité et un temps de réponse donnés. Ce niveau de confiance est issu des SIL (Safety Integrated Level) définis dans les normes NF EN 61508 et NF EN 61511.

Phénomène Dangereux : Manifestation physique concrète d'un potentiel de dangers pouvant se traduire par exemple par un incendie, une explosion ou une libération importante d'eau ou de sédiments. On parle d'accident majeur lorsque ce phénomène peut avoir des conséquences importantes sur des enjeux.

Performance des barrières : L'évaluation de la performance des barrières consiste en l'évaluation de leur efficacité, de leur temps de réponse et de leur niveau de confiance. Il est tenu compte des critères maintenabilité et testabilité permettant de garantir le niveau de performances dans le temps.

Principe de concept éprouvé : Un équipement ou un composant est dit de conception éprouvée lorsqu'il est utilisé depuis plusieurs années sur des sites industriels et que le retour d'expérience sur son application est bon, ou qu'il a subi des tests de « qualification » par l'utilisateur ou d'autres organismes. Ce principe doit être utilisé avec précaution, car il n'inclut pas les facteurs autres que la conception (contexte et historique d'utilisation sur un site donné, maintenance, organisation, taux de sollicitation, etc.).

Redondance : Existence, dans un composant, de plus d'un moyen pour accomplir une fonction requise (CEI 6271-1974)

Système instrumenté de sécurité (SIS) : système instrumenté utilisé pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité. Un SIS se compose de n'importe quelle combinaison de capteur(s), d'unité(s) logique(s) et d'élément(s) terminal(aux)

Temps de réponse : Intervalle de temps entre la sollicitation et l'exécution dans son intégralité de la mission/fonction de sécurité. Ce temps de réponse est inclus dans la cinétique de mise en œuvre d'une fonction de sécurité, cette dernière devant être en adéquation [significativement plus courte] avec la cinétique du phénomène qu'elle doit maîtriser.

Liste des autres abréviations utilisées dans ce rapport :

API	Automate Programmable Industriel
CFBR	Comité Français des Barrages et Réservoirs
CIGB	Commission Internationale des Grands Barrages
CTPBOH	Comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques
DTG	Direction Technique Générale
EDD	Etude de dangers
EI	Evénement Initiateur
ERC	Evénement Redouté Central
IC	Installation classée
INERIS	Institut National de l'Environnement industriel et des RISques
RTC	Réseau Téléphonique Commuté

2. INTRODUCTION

2.1 CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE

Les risques liés à l'exploitation d'un ouvrage hydraulique peuvent avoir pour origine des défaillances intrinsèques (vieillessement du corps de l'ouvrage, défaillance d'un organe de contrôle), des agressions externes ou un niveau anormalement élevé de la retenue.

La surveillance d'un barrage vise à détecter les dérives et les évolutions de l'ouvrage susceptibles d'être à l'origine d'un phénomène dangereux. Elle vise à réduire le risque d'accidents potentiels liés à des défaillances intrinsèques. La surveillance recouvre différentes activités : les inspections visuelles, le contrôle des organes d'évacuation et de sécurité et l'auscultation.

Le système d'auscultation est donc une composante de la surveillance de l'ouvrage. Il s'agit d'un **système technique et organisationnel** visant à obtenir des mesures précises de paramètres physiques représentatifs de l'état de l'ouvrage et de son évolution. Ces mesures sont exploitées pour évaluer périodiquement la sécurité de l'ouvrage et mettre en œuvre le cas échéant des opérations de confortement.

Le décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages définit des études et actions à mettre en place suivant les classes des ouvrages. Parmi celles-ci, les études de dangers (EDD), les rapports d'auscultation et les revues de sûreté.

Les études de dangers correspondent à une évaluation à un instant donné du niveau de risque que l'ouvrage fait peser sur son environnement. Les systèmes d'auscultation donnent lieu à un rapport d'auscultation et sont également valorisés dans les études de dangers comme éléments contribuant à la maîtrise des risques.

Cette étude a pour objectif d'améliorer la prise en compte des systèmes d'auscultation dans les études de dangers. Elle s'attache à répondre à différentes questions : comment évaluer les performances des systèmes d'auscultation ? Les systèmes d'auscultation peuvent-ils être considérés comme des barrières de sécurité au sens réglementation IC ? Comment intégrer les systèmes d'auscultation dans les scénarios d'accident ?

L'étude repose sur les éléments suivants :

- l'organisation et les objectifs de l'auscultation des barrages chez différents exploitants ;
- la description des principaux dispositifs techniques et organisationnels mis en œuvre pour réaliser l'auscultation (de la détection à l'action) ;
- les critères d'évaluation des performances des systèmes d'auscultation ;
- l'intégration des systèmes d'auscultation aux séquences accidentelles dans le cadre d'étude de dangers.

2.2 DEROULEMENT DE L'ETUDE

La première partie de l'étude a été consacrée au recueil de données relatives à l'auscultation des barrages, via :

- des rencontres avec trois exploitants et des visites sur site,
- une étude bibliographique, notamment de bulletins de la commission internationale des grands barrages (CIGB).

Trois exploitants français ont été rencontrés au cours de cette étude et deux ouvrages de chaque exploitant ont été visités. Les 6 ouvrages visités sont de différents types :

- béton type poids ;
- béton type voûte ;
- barrage mobile en rivière ;
- remblai avec masque d'étanchéité amont ;
- remblai à noyau central.

Dans ce document les différents types sont agrégés en deux catégories : béton et remblai.

Cet échantillon a été sélectionné afin d'observer différents appareils de mesure et différentes configurations d'auscultation, fonctionnant par télémessure ou mesure manuelle. Le tableau ci-dessous récapitule les différents appareils observés et la configuration dans laquelle ils intervenaient :

Appareil de mesure	Barrage béton	Barrage remblai	Télémessure	Mesure manuelle
Pendules (directs et inversés)	X	X	X	X
Fils invariants	X		X	X
Piézomètre avec cellule	X	X	X	
Piézomètre sans cellule	X		X	X
Fissuromètre	X			X
Mesure de fuites instrumentée (cellule de pression)	X	X	X	X
Mesure de fuites manuelle (bac ou V déversant)	X	X		X
Mesures topographiques		X		X
Clinomètre		X	X	
Elongamètre (extensomètre)	X	X	X	X

Tableau 1: Appareils et configurations observés lors des visites sur site

L'étude bibliographique s'est principalement basée sur les bulletins CIGB relatifs à la surveillance, à l'auscultation et aux phénomènes de vieillissement des ouvrages et de leurs fondations. Ces bulletins sont listés dans la bibliographie présente en fin de rapport. L'INERIS a également participé au congrès du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) des 27 et 28 novembre 2012 sur l'auscultation des barrages et des digues.

Les données ainsi recueillies ont dans un second temps été analysées en s'appuyant sur les connaissances de l'INERIS en matière d'EDD d'ouvrages hydrauliques et d'Installations Classées (IC,) ainsi que sur les différentes méthodologies d'évaluation des risques et des systèmes de sécurité développées et appliquées au sein de l'institut. Les référentiels d'évaluation des barrières techniques de sécurité (Oméga 10) et des barrières humaines de sécurité (Oméga 20) ont notamment été exploités ainsi que des éléments issus des fiches BADORIS Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) et Automates programmables Industriels (API).

2.3 STRUCTURE DU RAPPORT

Le présent rapport est constitué de trois principaux chapitres.

Le premier chapitre présente l'auscultation des ouvrages hydrauliques de manière générale, ses objectifs, son contexte, les moyens et l'organisation mis en œuvre.

Le second chapitre place l'auscultation dans le cadre de l'étude de dangers. L'auscultation est un élément permettant de réduire le risque, différents moyens pour le prendre en compte dans une étude de dangers sont présentés et discutés. Des critères d'évaluation sont proposés.

La troisième partie donne des éléments pour évaluer les performances de différents dispositifs spécifiques constituant l'auscultation dans une optique de réduction des risques.

3. PRESENTATION GENERALE DES DISPOSITIFS D'AUSCULTATION

3.1 CONTEXTE

3.1.1 L'AUSCULTATION DANS LA MAITRISE DE LA SECURITE DES OUVRAGES

La dérive du comportement des barrages et de leurs ouvrages annexes est une problématique centrale de la vie des ouvrages, depuis leur construction jusqu'à leur abandon ou démolition. Afin de maîtriser les risques liés aux ouvrages, il est nécessaire de tenir compte de ces potentielles dérives.

Le processus de surveillance est un maillon essentiel de la maîtrise des risques liés aux ouvrages hydrauliques. Il vise à gérer les risques et réduire les probabilités d'occurrence des phénomènes dangereux en mettant en œuvre des moyens permettant de détecter de manière précoce des dérives susceptibles d'engendrer un éventuelle défaillance ou rupture de l'ouvrage.

Il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques de l'ouvrage et de ses fondations, la nature des terrains, les matériaux utilisés, les hypothèses de conception ou de dimensionnement afin de déterminer quels sont les événements initiateurs pouvant mener à un événement redouté, et quels sont les phénomènes précurseurs associés à ces événements initiateurs. Ces éléments permettront de mettre en place un programme de surveillance afin de connaître l'évolution du comportement de l'ouvrage à court et moyen termes.

La surveillance des barrages inclut trois types d'actions :

- les inspections visuelles ;
- les vérifications et essais des organes d'exploitation et de sécurité ;
- l'auscultation de l'ouvrage : du barrage en lui-même, mais aussi de sa fondation, de ses organes et de son environnement immédiat ; à l'aide de moyens topographiques ou d'instruments de mesure.

Ces activités sont complémentaires, et doivent être planifiées et coordonnées. Leur contenu doit être défini et justifié afin de couvrir au mieux les évolutions comportementales dues au vieillissement de l'ouvrage. Le processus de surveillance doit évoluer dans le temps en fonction des résultats d'analyse des données collectées.

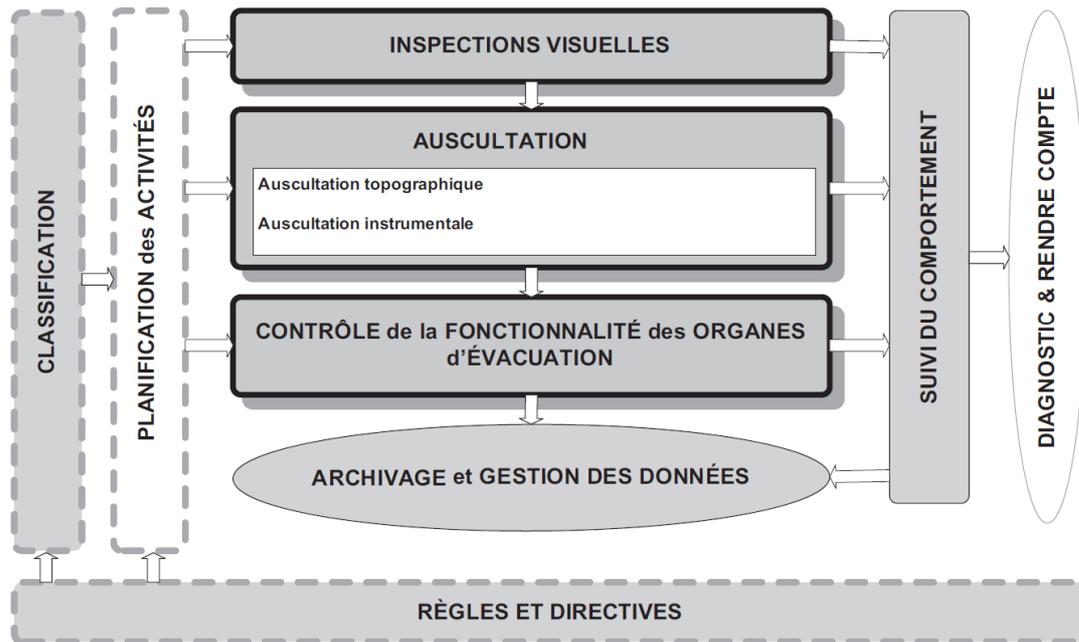


Figure 1 : La surveillance des barrages (source : CIGB)

L'activité d'auscultation regroupe donc les activités de surveillance des parties génie civil de l'ouvrage, basées sur des appareils de mesure. Dans cette étude, le terme « système d'auscultation » désignera donc les appareils de mesure et leur qualification, mais également :

- la procédure de réalisation des mesures ;
- la collecte et la vérification des données ;
- l'enregistrement des données ;
- l'analyse des données.

Le système d'auscultation ne se limite pas à un dispositif technique de mesure, il s'agit d'un processus complet de collecte et d'analyse de données.

Le système d'auscultation doit être complété par les inspections visuelles et les tests des organes hydromécaniques.

3.1.2 REGLEMENTATION

Le décret n° 2007-1735 du 11 septembre 2007 définit les obligations réglementaires des propriétaires, exploitants ou concessionnaires en fonction de la classe de l'ouvrage. Le **Tableau 2** récapitule les exigences relatives aux EDD et à l'auscultation.

	Barrages			
Classe	A	B	C	D
H en m V en million de m ³	H ≥ 20	H ² x √V ≥ 200 H ≥ 10 Pas en A	H ² x √V ≥ 20 et H ≥ 5 Pas A ou B	H ≥ 2 Pas A, B, C
Etude de dangers	Oui	Oui	Non	Non
Auscultation de l'ouvrage	Oui sauf dérogation	Oui sauf dérogation	Oui sauf dérogation	Non Sauf demande particulière
Fréquence des rapports d'auscultation	2 ans Transmis au préfet	≤ 5 ans Transmis au préfet	≤ 5 ans Transmis au préfet	/
Revue de sûreté	5 ans après la mise en service et Tous les 10 ans	Non	Non	Non

Tableau 2: Obligations relatives aux EDD et à l'auscultation au titre du Décret 2007-1735 (Adapté de l'Institut des risques majeurs, 2008)

La réglementation ne spécifie pas de critères techniques minimaux pour l'auscultation. Les exigences portent sur la fréquence des rapports et l'agrément du bureau d'études chargé de réaliser ce rapport. Les projets neufs ou les modifications importantes sont examinés par le CTPBOH¹ qui se positionne par rapport aux règles de l'art (guides, bulletins CIGB) en parallèle de l'instruction par la DREAL.

Les agréments des rédacteurs d'études sont délivrés sur la base de dossiers déjà réalisés. Les champs et les portées des agréments sont définis dans l'arrêté du 18 février 2010. Les différents domaines couverts sont :

- études (dont EDD), et diagnostics ;
- études, diagnostics et suivi des travaux ;
- auscultation.

L'agrément peut porter sur les grands barrages (classes A et B) ou les petits barrages (classes C et D). Les bureaux d'études agréés sont également force de proposition pour les moyens d'auscultation.

¹ CTPBOH : Comité Technique Permanent des Barrages et des Ouvrages Hydrauliques

D'un point de vue réglementaire, les exigences portant sur l'auscultation sont indépendantes des obligations portant sur la réalisation d'études de dangers pour les barrages de classes A et B. La surveillance et l'auscultation sont néanmoins des données d'entrée pour ces études.

3.2 OBJECTIFS DE L'AUSCULTATION

3.2.1 TYPES D'AUSCULTATION

L'auscultation est basée sur la mesure de paramètres physiques et le suivi de leur évolution. Les mesures physiques sont réalisées sur l'ouvrage, ses fondations, ou son environnement (bassin versant par exemple).

L'auscultation permet de mesurer :

- le comportement hydraulique (débits, pressions),
- le comportement mécanique (déplacement, déformations).

On peut distinguer deux types d'auscultation, réalisées à des fréquences et par des intervenants différents :

- l'auscultation générale au moyen d'équipements fixes installés dans le barrage ou d'appareils de mesure mobiles. Elle est réalisée à des fréquences de l'ordre de la semaine ;
- l'auscultation topographique (topométrie, nivellement, etc.) nécessitant des points de repères fixes. Sa fréquence est généralement annuelle.

Par ailleurs, l'auscultation peut viser deux objectifs différents :

- l'auscultation à court terme permet de détecter des évolutions à court terme du comportement ou de l'état de l'ouvrage et de mettre en œuvre des mesures appropriées en cas de dérive dangereuse. Ce type d'auscultation se matérialise par la surveillance du franchissement d'un seuil prédéfini sur un paramètre mesuré. Le franchissement du seuil doit être signalé dans des délais suffisamment brefs par l'intermédiaire d'une alarme ou par une fréquence de mesure et de traitement de premier niveau élevée ;
- l'auscultation à long terme vise à détecter les évolutions lentes de l'état de l'ouvrage en vue de maintenir la sécurité dans le temps et éventuellement d'initier des analyses approfondies et des travaux de confortement.

Un même dispositif d'auscultation peut éventuellement être utilisé pour des objectifs court terme et long terme. Cependant, les critères d'évaluation de la performance de l'auscultation ne seront pas les mêmes. Les dispositifs doivent donc être évalués en fonction du ou des usages prévus.

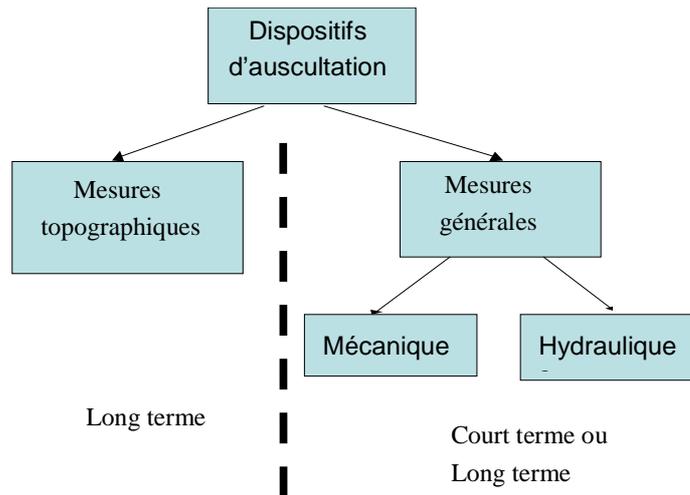


Figure 2 : Typologie des dispositifs d'auscultation

L'auscultation peut intervenir dans différentes phases du cycle de vie d'un barrage :

- lors de la construction ou de travaux ;
- lors du premier remplissage ;
- en phase de jeunesse de l'ouvrage ;
- en phase de vie utile qui correspond à l'exploitation en régime normal de l'ouvrage. Au cours de cette phase, des phénomènes de vieillissement peuvent dégrader l'ouvrage ou ses appuis ;
- suite à un événement externe particulier ou au cours de cet événement (séisme, crue, gel important) ;
- lors de travaux ou de vidanges décennales.

Lors des phases transitoires, l'auscultation et la surveillance doivent être renforcées afin de pallier aux risques particuliers liés à une mauvaise conception ou à des défauts dans la réalisation des travaux. Ce renforcement passe par exemple par l'augmentation de la fréquence des mesures. Il peut aussi être fixé des seuils d'alerte sur les mesures effectuées pendant cette période d'auscultation renforcée. Une augmentation de la fréquence des mesures peut également être décidée afin d'engranger plus d'informations sur le comportement d'un ouvrage dans des conditions d'exploitation plus rarement observées (suivi d'un ouvrage hors d'eau, par exemple).

Cette étude porte principalement sur l'auscultation des phénomènes de vieillissement en phase de vie utile : on considère en général que les détériorations survenant après les 5 premières années de l'ouvrage sont liées au vieillissement. Les détériorations qui se produisent avant cette période sont jugées comme étant des phénomènes de jeunesse dus à des insuffisances dans les études, la construction ou la mise en service de l'ouvrage.

Par ailleurs, il est admis qu'un délai de l'ordre de 5 ans² est nécessaire pour obtenir une quantité de données suffisante à l'analyse statistique de l'évolution du comportement d'un ouvrage.

3.2.2 PHENOMENES MESURES

Le vieillissement est défini comme une catégorie de détérioration associée aux altérations au cours du temps des propriétés des matériaux et des structures. Dans des conditions normales d'exploitation, le vieillissement pourra affecter l'exploitation de l'ouvrage, puis se répercuter sur la sécurité si des mesures correctives ne sont pas prises.

Les paramètres mesurés sur le corps du barrage et ses fondations doivent être représentatifs et adaptés aux particularités de l'ouvrage (type, matériaux, hauteur, fondations, environnement) afin de pouvoir juger de son évolution dans le temps. Les paramètres mesurés et les points de mesures doivent être définis en fonction des phénomènes évolutifs mesurables susceptibles d'être à l'origine d'un scénario d'accident. Les mesures doivent prendre en compte l'historique de l'ouvrage.

Les tableaux 3 et 4 synthétisent le bulletin CIGB sur le vieillissement des barrages [7]. Ils proposent des phénomènes de vieillissement typiques pour des ouvrages béton et remblai (tous types confondus) et des mesures d'auscultation réalisables.

Les phénomènes et mesures d'auscultations présentés dans ces tableaux ne sont pas exhaustifs. Ils doivent être adaptés au type d'ouvrage, à la nature des fondations, à l'environnement et aux observations réalisées.

Pour rappel, l'auscultation telle qu'elle a été définie dans le cadre de ce rapport n'inclut pas la surveillance et maintenance des organes hydromécaniques.

² Le bulletin CIGB n°87 donne comme ordre de grandeur une période de 5 à 10 ans pour connaître le comportement d'un ouvrage.

BARRAGES EN BETON OU EN MAÇONNERIE			
Localisation	Phénomène	Mesure d'auscultation possible	Traitements possibles
Fondation (massif rocheux)	Actions prolongées ou répétées	Mesures de fuites de la fondation et nature des eaux Mesures des sous-pressions Mesures de déplacement de la fondation (topographie ou pendule inversé)	Renforcement des rideaux d'injection Renforcement des tapis étanches
	Erosion et dissolution	Débits de fuites Présence de particules dans les fuites	Intervention d'un expert Dispositifs de décantation pour retenir les matériaux
	Vieillessement des rideaux d'injection et des réseaux de drainage	Mesures de fuites Extensomètres (ouverture contact béton-rocher) Mesures des sous-pressions	Entretien des drains
Corps du barrage	Réaction chimique conduisant à un gonflement	Mesures de déplacement Mesures extensométriques	Analyse permettant de définir la nature et la vitesse du processus en fonction des zones du barrage Evaluation des effets en fonction de la singularité du barrage et de sa fondation et définition d'actions appropriées Surveillance du jeu et du fonctionnement des vannes et évacuateurs de crues
	Retrait fluage ou réaction conduisant à une contraction	Mesures de déplacement (topographiques ou pendules) Déformation des fondations (extensomètres) Mesures des sous-pressions Débits de drains	Renforcement du traitement de la fondation Adaptation du réseau de drainage
	Dégradation due à une réaction entre les composants et le milieu	Inspections visuelles Mesures de débits d'eau Carottages et essais en laboratoire Analyses des eaux de la retenue et des fuites	Restauration de l'étanchéité de l'ouvrage (injections derrière le parement, enduit, masque bitumeux, murs en béton, revêtement métallique, géomembranes)

BARRAGES EN BETON OU EN MAÇONNERIE			
Localisation	Phénomène	Mesure d'auscultation possible	Traitements possibles
	Faiblesse de la structure vis-à-vis des actions prolongées ou répétées	Inspections visuelles Mesures de l'ouverture des fissures (vinchons, analyse numériques) Mesures de contraintes Caractérisation du béton des joints et fissures en laboratoire	Renforcement des ouvrages (adjonctions de contreforts ou de remblais, remplissage des alvéoles) Construction d'écrans thermiques Injection de ciments ou de résines dans les fissures Amélioration du drainage Calcul de la stabilité et des conditions de fonctionnement de l'ouvrage
	Faible résistance au gel ou dégel	Inspections visuelles Essais de laboratoires sur carottes Sondages destructifs ou non destructifs Mesures de débits de fuites	Choix initial du béton Protection thermique (remblai ou parois isolantes) Reconstitution du parement
Autres	Vieillessement des joints de structure	Inspections visuelles principalement Mesures de débits de fuite	Réparation des joints et couvre-joints
	Vieillessement des revêtements amont	Inspections visuelles Mesures de fuite	
	Vieillessement des organes précontraints	Inspections Mesures de tension des tirants Mesures de déformation (topographie, pendules, extensomètres)	Installation de tirants ou vérins supplémentaires Remplacement ou réparation de tirants et vérins endommagés

Tableau 3 : Principaux scénarios de vieillissement des barrages en béton ou en maçonnerie [7]

BARRAGES EN REMBLAI			
Localisation	Phénomène	Mesure d'auscultation possible	Traitements possibles
Fondation (massif rocheux)	Déformations,	Mesure de niveaux sur la fondation ou dans les galeries	Choix de conception (matériaux auto-réparateurs) Recoupage du réseau de fissures par un mur ou une paroi moulée
	Perte de résistance, augmentation des sous-pressions et modification de l'état de contrainte	Inclinomètres Cellules piézométriques	Coupure étanche Drainage Injections
	Erosion interne	Inspections visuelles Mesures de fuites Piézomètre Mesures de turbidité et analyse chimique	Injections, drains de pied, filtres, puits de décharge, butées de pied aval
	Dégradation de la fondation	Prélèvements et analyse chimiques	Analyse des phénomènes physiques et chimiques de la fondation
Corps du barrage	Déformation	Mesures de déplacements horizontaux et verticaux	
	Perte de résistance	Visites périodiques Mesures de déplacement	Conception initiale et mise en place et compactage du remblais corrects
	Augmentation des pressions interstitielles	Inspections visuelles Mesures de fuites Mesures piézométriques	Conception dans les règles de l'art Drainage Injections, paroi moulées
	Erosion interne	Inspections visuelles Mesures de fuites Mesures piézométriques Mesure de turbidité	Injection du renard Parafouille étanche Drain de pied Adjonction de recharges drainantes amont et aval Remplacement d'une partie du noyau
	Dégradation du remblai	Prélèvement et analyse des percolations Contrôle de la stabilité des recharges	Conception et construction dans les règles de l'art
	Erosion superficielle	Inspections visuelles Mesures de déplacement	Réfection de la couche superficielle Amélioration du drainage Protection par enrochement

BARRAGES EN REMBLAI			
Localisation	Phénomène	Mesure d'auscultation possible	Traitements possibles
Autres	Fuites à travers des barrages en enrochement à masque amont d'étanchéité en béton	Inspection visuelle Mesures de débits de fuite Mesures des déplacements des masques et des joints	Réparation des joints et masque Adjonction d'une membrane
	Modification de la perméabilité	Mesures de fuites Inspections visuelles Pressions interstitielles Analyse de l'eau	
	Dégradation du raccordement entre remblai et ouvrage en béton	Inspections visuelles Sondages Mesures de déplacements verticaux	Reconstruction du remblai Injection de la fondation Construction d'une butée aval

Tableau 4 : Principaux scénarios de vieillissement des barrages en remblai [7]

Barrage en béton	Barrage en remblai	Fondations
Déformations de la structure	Déformations du corps du barrage	Déformations Mouvements des appuis
Mouvements particuliers (fissures, joints)	Mouvements particuliers (liaison avec une structure béton)	Mouvement particuliers (fissures, diaclase)
Température dans le corps du barrage pour détecter les percolations	Température dans le corps du barrage pour détecter les percolations	Température dans la fondation pour détecter les percolations
Sous-pressions (au contact béton-fondation et dans le rocher)	Pressions interstitielles dans le corps du barrage en remblai et niveau piézométrique	Pressions interstitielles Sous-pression en profondeur Niveaux piézométriques Niveau de la nappe phréatique
Débits d'infiltration et de drainage	Débits d'infiltration et de drainage	Débits d'infiltration, de drainage et de résurgences (sources)
Analyse chimique des eaux de percolation	Analyse chimique des eaux de percolation Turbidité	Analyse chimique des eaux de percolation Turbidité

Tableau 5 : Paramètres significatifs pour le suivi des ouvrages et de leurs fondations [7]

3.3 DESCRIPTION DES SYSTEMES D'AUSCULTATION

3.3.1 DESCRIPTION FONCTIONNELLE

Un dispositif d'auscultation nécessite pour être efficace la mise en place d'une organisation adéquate et un personnel compétent pour effectuer les mesures et analyser les résultats.

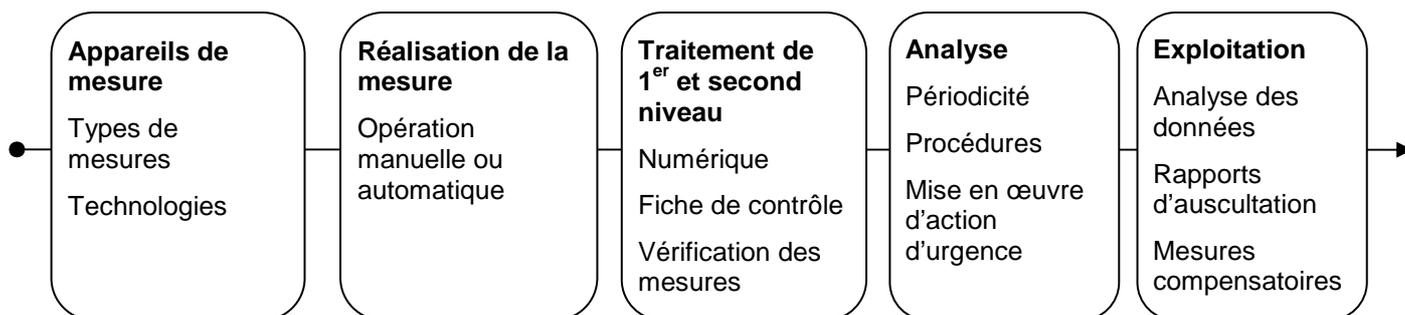


Figure 3 : Diagramme d'un système d'auscultation

L'auscultation est un système **technique** et **organisationnel**. Il ne se limite pas à un appareil de mesure mais intègre la réalisation des mesures (manuelle ou automatique), la qualification, l'installation et la maintenance des appareils de mesure, l'enregistrement et le traitement des données, l'analyse des résultats et la prise de décision. Les dispositifs techniques et humains sont interdépendants et impliqués dans chacun des éléments constituant le système d'auscultation.

3.3.2 GRANDEURS PHYSIQUES MESUREES

L'auscultation mise en place par les exploitants est partielle. En effet, il n'est pas possible d'instrumenter chaque point du barrage et de sa fondation. Par ailleurs, seuls quelques paramètres sont accessibles à la mesure et représentatifs du fonctionnement de l'ouvrage.

L'implantation d'un dispositif de mesure doit correspondre à la surveillance d'une grandeur physique déterminée. Le choix de l'appareil et sa localisation doivent donc être justifiés en fonction d'un objectif d'auscultation.

Différents types de grandeurs sont mesurés :

- **des paramètres géométriques :**
 - o déformations locales,
 - o déplacements relatifs d'un point par rapport à un autre,
 - o déplacements "absolus" (en réalité, relatifs par rapport à un référentiel plus large) ;

- **des paramètres hydrauliques :**
 - o hauteurs d'eau (cote de retenue, pluviométrie),
 - o pressions d'eau,
 - o débits ;
- **d'autres paramètres** tels que:
 - o températures,
 - o concentrations, turbidité.

La mesure peut être locale (par exemple une pression interstitielle) ou globale (débit de fuite mesuré en sortie de galerie). Dans le deuxième cas, la mesure intègre le comportement du barrage sur une partie importante, voire sur la totalité de l'ouvrage. Ceci permet d'avoir une vue synthétique de ce comportement.

3.3.3 LES APPAREILS DE MESURE

Les appareils utilisés pour réaliser l'auscultation sont des appareils de mesures et non de détection : bien que certains d'entre eux puissent déclencher une alarme sur franchissement de seuil, leur fonction première est de réaliser des mesures précises d'une grandeur physique.

Deux types de phénomènes sont auscultés : les mouvements et déformations d'une part et les infiltrations et pressions d'autre part. Les appareils de mesure ci-dessous sont fréquemment utilisés :

- **Paramètres géométriques**
 - o Pendules directs et inverses,
 - o Extensomètres,
 - o Clinomètres,
 - o Fils invariants,
 - o Fissuromètres,
 - o Repères de planimétrie et nivellement.
- **Paramètres hydrauliques**
 - o Piézomètres,
 - o Débits de fuite,
 - o Fibre optique.

Différentes activités doivent permettre de garantir l'adéquation des appareils de mesures et leur pérennité dans le temps :

❖ *Spécification des appareils de mesure*

Les appareils des mesures doivent être adaptés au phénomène ausculté et à l'environnement. Les principaux paramètres à prendre en compte sont :

- la métrologie (incertitude maximale acceptable),
- la gamme de mesure adaptée aux valeurs minimum et maximum prévues,
- la robustesse et la durée de vie,
- l'adaptation aux conditions environnementales,
- la maintenabilité,
- la compatibilité avec l'existant.

❖ *Qualification des appareils de mesure*

Les spécifications des appareils de mesure doivent être vérifiées en qualification. La qualification d'appareils peut reposer sur des essais en laboratoire. Certains dispositifs peuvent être considérés comme éprouvés par l'usage s'il existe un retour d'expérience suffisant chez l'exploitant ou dans la profession. C'est le cas par exemple pour les pendules et les tables de visée qui sont des dispositifs simples, précis et éprouvés.

❖ *Procédures d'installation*

Lors de l'installation, les constantes du phénomène mesuré doivent être relevées afin de pouvoir calibrer le traitement des données et l'interprétation des résultats.

❖ *Contrôles périodiques*

Des contrôles périodiques doivent être planifiés en fonction de la technologie de l'appareil, de sa sensibilité à des agressions et de la probabilité de dérives. Les tests réalisés doivent être fonctionnels et métrologiques afin de s'assurer que la précision de mesure reste constante dans le temps ou de caractériser les dérives.

En particulier, la métrologie in situ permet d'estimer l'incertitude globale de la mesure et de vérifier qu'elle est comprise dans les tolérances spécifiées.

3.3.4 REALISATION ET TRANSMISSION DES MESURES

❖ *Mesure manuelle*

Le programme de mesure et la fréquence des mesures sont adaptés à la nature et à l'évolution de l'ouvrage. En cas d'anomalie ou d'événement particulier, la fréquence des mesures sera plus élevée. Des mesures ponctuelles sont réalisées en cas de séisme, crue ou gel intense.

Afin de mettre en évidence le plus rapidement possible les anomalies, les mesures avec les fréquences les plus élevées (hebdomadaires ou bimensuelles) sont celles représentatives du comportement global de l'ouvrage (déformations) ou de points critiques identifiés (piézométrie).

Certains outils, tels que des terminaux portables ou des fiches de contrôle permettent de s'assurer de la cohérence des mesures au moment où elles sont réalisées.

Les mesures sont effectuées par le personnel d'exploitation, à l'exception des mesures nécessitant un savoir-faire particulier comme les mesures topométriques.

❖ *Télémesure*

La télémesure est en général réalisée par des automates et réseaux standards, généralement RTC, qui ne sont pas conçus à des fins de sécurité.

Les mesures ne sont pas réalisées en continu : les acquisitions de mesure sont normalement planifiées et peuvent être commandées manuellement.

La télémesure nécessite une instrumentation des dispositifs de mesures. Elle nécessite donc la mise en œuvre de technologies complexes au sens des référentiels d'évaluation des barrières techniques de sécurité (Oméga 10) et des normes de sécurité fonctionnelle (CEI 61508, CEI 61511).

Des visites régulières doivent être réalisées sur les appareils télémésurés afin de réaliser des mesures manuelles comparatives et de prévenir une dérive éventuelle des capteurs télémésurés.

3.3.5 LES TRAITEMENTS DE 1^{ER} ET 2^{EME} NIVEAUX

Le traitement de premier niveau doit être réalisé immédiatement après la tournée de mesure afin de détecter les mesures anormales et valider les mesures avant transmission. En cas de mesure jugée anormale, elle peut être vérifiée sur site.

Après validation, certaines grandeurs mesurées sont intégrées directement par le maître d'ouvrage au travers du rapport d'exploitation. Il s'agit d'un examen brut des résultats de l'auscultation et ne reprend qu'une partie des mesures :

- anomalies, interventions sur le dispositif de mesure ;
- cote, et données météorologiques ;
- mesures représentatives d'un comportement d'ensemble (ex : débit cumulées de certains drains) ;
- mesures sélectionnées pour un comportement particulier visible par simple lecture des mesures brutes.

On peut considérer qu'il s'agit du traitement de second niveau.

Le rapport d'auscultation, dont la rédaction doit obligatoirement être faite par un organisme agréé, intègre lui l'analyse statistique des mesures d'auscultation pour chaque appareil et constitue l'aboutissement du traitement des mesures. On peut considérer qu'il s'agit d'un traitement de troisième niveau. Ce dernier rapport constitue un catalogue complet des résultats d'auscultation sur une longue période et intègre l'analyse et l'interprétation du comportement de l'ouvrage, par un spécialiste.

La définition de plages de variation attendues des mesures permet d'améliorer et de faciliter les traitements de 1^{er} et 2nd niveaux. Ces plages peuvent être évaluées à partir de l'historique de l'ouvrage.

3.3.6 ANALYSE DES DONNEES

Une fois relevées, les mesures physiques réalisées doivent être converties en grandeurs représentatives de l'état de l'ouvrage. Par exemple, une fréquence mesurée sur une cellule électrique doit être convertie en niveau piézométrique. C'est l'objectif de l'analyse des données et de la réalisation du rapport d'auscultation.

Par ailleurs, les mesures brutes obtenues par le biais de ce premier traitement doivent être converties en mesures corrigées, en tenant compte des paramètres extérieurs influençant la mesure. Les variations des mesures d'auscultation sont en effet corrélées à des facteurs climatiques ou liées à l'exploitation de l'ouvrage. Ces phénomènes doivent être mesurés pour affiner le traitement des données d'auscultation en estimant la part de variation des mesures d'auscultation due à des facteurs exogènes (variations réversibles) et la part due aux facteurs endogènes tels que le vieillissement et la dégradation de l'ouvrage (irréversibles).

Ainsi, parmi les phénomènes à prendre en compte, on trouve notamment :

- le niveau de la retenue au moment de la mesure,
- la date de la mesure,
- la température extérieure,
- la pluviométrie,
- la température de l'eau,
- la cote de la retenue au cours des mois précédents,
- l'ensoleillement,
- les erreurs de mesures.

Les traitements statistiques existants prennent souvent en compte les deux premiers paramètres, plus rarement la température. Les trois paramètres sont corrélés (saison et T° ou saison et niveau de la retenue), leur prise en compte simultanée peut donc introduire des biais statistiques.

Certains paramètres physiques (par exemple la pression interstitielle au sein d'un noyau en terre) ne dépendent pas de la valeur instantanée de la cote de retenue mais de l'histoire des variations de cote au cours des jours ou semaines précédant la mesure. La méthode des effets retards permet de prendre en compte les variations de la cote dans les jours ou les semaines précédant la mesure et de les intégrer dans le calcul de la mesure corrigée.

L'historique des données doit être disponible et le traitement des données doit permettre de distinguer les variations réversibles et les variations irréversibles. Les

causes des variations irréversibles doivent être analysées afin de déterminer la cinétique du phénomène sous-jacent et les risques qui y sont liés. L'historique des différents appareils de mesure est également fondamental, puisqu'un réétalonnage ou un changement de capteur aura son influence sur la série de données.

Remarque : Des phénomènes externes exceptionnels peuvent provoquer des variations irréversibles (séisme, crue ou gel importants).

3.3.7 INTERPRETATION ET EXPLOITATION DES RESULTATS

❖ *Interprétation des résultats*

Une bonne interprétation des résultats d'auscultation nécessite :

- une connaissance précise des caractéristiques du barrage et de sa fondation (emplacement du voile d'étanchéité, du voile de drainage, du zonage du remblai...),
- une bonne perception du mode de fonctionnement de l'ouvrage,
- un dispositif d'auscultation adapté et suffisant,
- un choix des grandeurs caractéristiques et significatives du comportement,
- un examen des courbes d'effets réversibles et des courbes à conditions identiques,
- une liaison entre grandeurs mesurées et observations visuelles.

Toute évolution anormale d'une des grandeurs mesurées doit se traduire par une réaction de l'exploitant. Il n'existe que très rarement un seuil de déclenchement d'alarme (à l'exception de l'indicateur de niveau de la retenue). Pour chaque grandeur mesurée, c'est en général le bureau d'étude chargé de la surveillance qui, au vu de l'historique de l'ouvrage, après analyse et consultation d'experts compétents, décide de la conduite à tenir.

Pour pouvoir être analysées, les mesures effectuées sur un barrage doivent être rattachées à un ou plusieurs phénomènes physiques définis. Par exemple, les mesures ci-dessous peuvent correspondre à différents phénomènes :

- déplacements :
 - o déformation globale du barrage et de ses fondations sous la poussée hydrostatique de la retenue,
 - o tassements de construction pour les remblais meubles,
 - o glissement de la structure sur sa fondation,
 - o dilatation thermique de la structure,
 - o ouverture de joints ou de fissures,
- déformations internes :
 - o contraintes fortes dans la structure,
 - o gonflement du béton,

- débits de fuite :
 - o détérioration d'un joint d'étanchéité ou d'un point singulier de l'étanchéité,
 - o perméabilité de l'écran d'étanchéité,
 - o milieu poreux ou fissuré,
- pressions :
 - o effets du voile d'étanchéité, évolution des perméabilités,
 - o migration des matériaux dans un barrage en terre,
 - o imperméabilisation du fond de la retenue par les sédiments.

❖ *Exploitation des résultats de l'auscultation long terme*

Les conclusions des analyses ont synthétisées dans les rapports d'auscultation dont la fréquence dépend de la classe de l'ouvrage (2 ans pour la classe A, 5 ans pour les classes B et C). Lorsqu'une dérive est constatée, l'objectif sera de déterminer la cause précise afin de proposer des actions correctives.

Dans un premier temps, il faut déterminer la criticité et la cinétique de la dérive. Suivant les phénomènes observés, la mise en place d'action corrective doit être réalisée dans un délai pouvant aller de quelques jours (remplacement d'un appareil de mesure) à plusieurs années. Un renforcement de l'auscultation, au moyen d'appareils supplémentaires ou du resserrement des intervalles de mesures peut être nécessaire afin de maintenir un niveau de risque acceptable dans un mode dégradé par rapport aux hypothèses initiales.

Une analyse plus approfondie peut être nécessaire afin de déterminer les causes premières de la dérive et de concevoir des actions curatives. Cette analyse peut reposer sur des mesures supplémentaires ou des analyses en laboratoires de la qualité du béton ou des eaux de percolation par exemple.

Enfin, les mesures correctives devront être déterminées en fonction des résultats obtenus. Il peut s'agir par exemple de confortement de l'ouvrage, d'amélioration de l'étanchéité, du renforcement du voile d'injection, de modification de paramètres de contrôle (baisse de la cote maximale de la retenue) ou, dans les cas extrêmes, de l'abandon de l'ouvrage.

❖ *Exploitation des résultats de l'auscultation court terme*

Les systèmes d'auscultation court-terme doivent permettre de détecter rapidement des dérives potentiellement dangereuses, de réaliser un diagnostic et si nécessaire de mettre en œuvre rapidement les actions adéquates.

Pour ce type d'auscultation, le traitement de premier niveau réalisé par l'exploitant doit permettre de détecter une dérive dangereuse. L'exploitant doit prendre une décision en fonction de l'évolution :

- resserrer les mesures,
- faire intervenir rapidement un bureau d'étude ou une cellule de crise,
- faire intervenir une entreprise pour mettre fin au désordre.

Par exemple, sur un barrage remblai, on peut détecter l'arrivée d'eau chargée dans les drains. On cherchera à identifier la source et la cinétique en première

analyse. En fonction des résultats, un confortement pourra être réalisé pour stopper l'entraînement de matériau.

4. EVALUATION DES PERFORMANCES DES DISPOSITIFS D'AUSCULTATION DANS LE CADRE D'UNE ETUDE DE DANGERS

4.1 INTRODUCTION

L'objectif de l'étude est d'estimer suivant quels principes et quels critères les systèmes d'auscultation peuvent être valorisés dans les études de dangers. Le principe initialement retenu était de les valoriser comme barrière de sécurité et de leur attribuer un niveau de confiance. Il apparaît que cette approche n'est applicable qu'à des systèmes particuliers (auscultation court-terme).

Le paragraphe 4.2 présente succinctement les objectifs et principes des études de dangers et de l'approche barrière. Les spécificités d'un système d'auscultation par rapport à une barrière technique de sécurité y sont développées.

Les paragraphes 4.3 et 4.4 proposent et discutent des principes de valorisation et des critères d'évaluation adaptés respectivement aux systèmes d'auscultation court terme et long terme.

4.2 L'ETUDE DE DANGERS ET LES BARRIERES DE SECURITE

4.2.1 L'ETUDE DE DANGERS

L'étude de dangers fait partie du processus de gestion des risques autour d'un ouvrage hydraulique en apportant la démonstration du niveau de maîtrise du risque à la source par l'exploitant. Le décret n°20 07-1735 du 11 décembre 2007 prévoit la réalisation d'une étude de dangers pour les barrages de classe A ou B.

Lors de la réalisation d'une étude de dangers, l'analyse de risques permet de déterminer les phénomènes dangereux susceptibles de se produire sur le site étudié. Ces phénomènes sont causés par des événements redoutés que l'on cherche à caractériser en termes de probabilité d'occurrence, de cinétique et d'intensité des effets.

Les événements initiateurs, à l'origine de l'événement redouté, marquent le début d'une séquence accidentelle sur laquelle peuvent entrer en jeu différents systèmes permettant de réduire la probabilité d'occurrence et/ou les effets et conséquences du phénomène dangereux associé à l'événement redouté. Un tel système, technique, humain ou combinaison des deux, est appelé une barrière de sécurité.

La détermination de la probabilité d'occurrence des événements redoutés passe en général par la connaissance de la fréquence d'occurrence des événements initiateurs associés, et par la détermination de la probabilité de fonctionnement des barrières de sécurité intervenant sur la séquence accidentelle.

4.2.2 PRESENTATION DE L'APPROCHE BARRIERE

L'évaluation d'une barrière de sécurité est réalisée suivant trois types de critères :

- les critères minimaux permettant de retenir un système comme barrière de sécurité,
- les critères qualitatifs, visant à déterminer l'efficacité et le temps de réponse de la barrière,
- les critères quantitatifs, visant à évaluer les probabilités de défaillance de la fonction de sécurité et le facteur de réduction de risque associé. Ils sont caractérisés par le niveau de confiance (NC).

Ces critères sont complémentaires et doivent tous être évalués.

Les méthodes Omega 10 et Omega 20 développées par l'INERIS permettent d'évaluer ces critères pour des dispositifs respectivement matériels et humains.

La typologie des barrières techniques de sécurité présentées dans le rapport Omega 10 est reprise dans la figure ci-dessous :

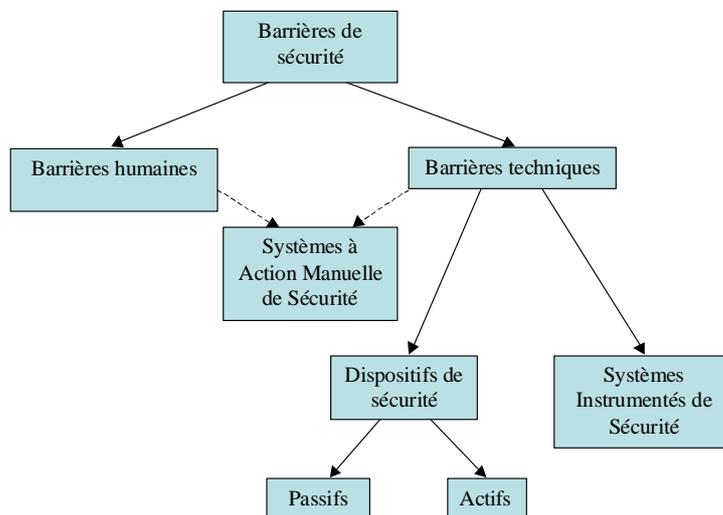


Figure 4 : Typologie des Barrières Techniques de Sécurité

Les critères d'évaluation des barrières techniques de sécurité sont les suivants :

- l'indépendance avec la cause de l'événement redouté,
- l'efficacité liée à la conception, au dimensionnement et aux technologies utilisées,
- le temps de réponse (de la détection jusqu'à l'action associée) adapté à la cinétique du scénario,
- le niveau de confiance (NC) qui est un niveau discret (de 1 à 4) caractérisant le facteur de réduction de risque apporté par la barrière (de 10 à 10 000). Il est lié à la tolérance aux défaillances, au comportement sur défaut, au taux de diagnostic des défaillances, à la complexité technologique, à la qualification pour les contraintes environnementales,
- le maintien des performances de la barrière dans le temps.

La satisfaction des trois premiers critères permet de retenir la barrière dans l'évaluation des scénarios d'accident. Le quatrième critère permet de lui affecter un facteur de réduction de risque. Il est également nécessaire de prendre en compte le maintien des performances dans le temps par des opérations de test, de maintenance, la mise en place d'une organisation adéquate, la formation des opérateurs et la collecte de données de retour d'expérience.

Ces critères s'appliquent à l'ensemble de la barrière de sécurité et non uniquement à l'appareil de mesure ou de détection.

Tous ces critères ne sont pas transposables directement aux systèmes d'auscultation, les technologies mises en jeu, les temps de traitement et les modes de traitement étant différents. Les dispositifs d'auscultation, télémésurés ou non, diffèrent des barrières de sécurité telles que définies dans l'approche Oméga 10 de l'INERIS. Les SIS peuvent être pris comme référence pour la comparaison du fait de leur chaîne fonctionnelle similaire : acquisition de données suivie d'un traitement, puis d'une action. Le tableau ci-dessous présente les principales différences fonctionnelles entre une barrière technique de sécurité et un système d'auscultation :

Système instrumenté de Sécurité	Système d'auscultation
Temps réel	Non Temps réel
Temps de réponse critique	Délai de réponse accepté
Mesures fréquentes	Mesures peu fréquentes
Fonctionnement permanent (solicitations aléatoires)	Fonctionnement planifié
Déclenchement généralement à un seuil intégrant une marge de sécurité (systèmes de détection)	Précision de mesure critique (systèmes de mesure) Analyse des mesures a posteriori
Arrêt interdit	Défaut occasionnels acceptables
Action automatique	Action sur demande de l'exploitant
Doit être conçu de manière à assurer la sécurité des personnes et des biens, y compris en cas de défaillance du système	Doit être conçu de manière à assurer l'intégrité et la précision des données

Tableau 6 : Comparaison SIS et dispositif d'auscultation

D'une manière générale, une barrière de sécurité est conçue et mise en œuvre pour répondre à un objectif précis de sécurité en fonction d'un scénario dont la cinétique et le dimensionnement sont connus. Un système d'auscultation est conçu pour suivre sur le long terme l'évolution de grandeurs physiques représentatives de l'état du barrage.

L'enjeu de l'évaluation du dispositif d'auscultation est de définir :

- dans quelle mesure le système répond à son objectif de suivi de paramètres physiques,
- dans quelle mesure le suivi de ces paramètres physiques contribue à la réduction des risques liés à l'ouvrage.

4.2.3 LES SPECIFICITES DES SYSTEMES D'AUSCULTATION

Les systèmes d'auscultation bénéficient d'un vaste retour d'expérience et d'un état de l'art approfondi. Cependant, leur développement a été réalisé indépendamment des prescriptions des études de dangers.

Il apparaît que ces systèmes contribuent à la réduction du risque associé à un ouvrage. C'est pourquoi leur prise en compte doit être possible dans le cadre d'une étude de dangers et dans celui plus large de la caractérisation des risques.

Le retour d'expérience sur les accidents touchant des ouvrages hydrauliques dissocie rarement un ouvrage et son auscultation : il est difficile de déterminer l'apport spécifique de l'auscultation dans la réduction du risque à la source. C'est pourquoi, souvent, l'apport de l'auscultation est directement inclus dans la fréquence d'occurrence affichée d'un événement initiateur de séquence accidentelle.

S'il est difficile d'assimiler directement les systèmes d'auscultation à des barrières de sécurité au sens Oméga 10, c'est que l'auscultation intervient sur des séquences accidentelles générées par des événements initiateurs qui sont la plupart du temps des phénomènes progressifs. **Les mesures d'auscultation permettent de détecter des dérives, et non de corriger des défaillances.** Une perte du dispositif d'auscultation sur une petite période de temps est souvent acceptée. C'est pourquoi la probabilité de non-fonctionnement de l'auscultation est un critère de performance peu pertinent : l'évaluation de ces systèmes se base essentiellement sur des critères qualitatifs.

Différentes approches pour la prise en compte des systèmes d'auscultation dans les études de dangers sont proposées et discutées dans ce document :

- l'adaptation de l'approche barrière telle que définie par les méthodes Omega 10 et Omega 20 aux spécificités de l'auscultation : cette adaptation est particulièrement adaptée aux dispositifs d'auscultation court terme ;
- la décote des fréquences d'événements initiateurs par une approche quantitative ou semi-quantitative : cette méthode suppose donc que la fréquence d'occurrence des événements initiateurs est connue, ou bien que le retour d'expérience sans auscultation est suffisant ;
- la prise en compte de l'auscultation comme un moyen de vérifier que les hypothèses de base de l'évaluation des risques sont maintenues dans le temps, ces hypothèses étant le pré-requis à une caractérisation générique et consensuelle des probabilités d'occurrence des événements redoutés liés au vieillissement des ouvrages.

4.3 CRITERES ADAPTES AUX SYSTEMES D'AUSCULTATION LONG TERME

Par analogie avec l'approche barrière, quatre critères d'évaluation communs peuvent être retenus :

- critère de définition,
- critère d'efficacité,
- critère de temps de réponse,
- critère de pérennité des mesures.

Ces critères représentent des conditions nécessaires pour considérer le dispositif d'auscultation comme un facteur de réduction du risque.

4.3.1 CRITERES DE DEFINITION

L'auscultation à long terme permet de réduire la probabilité d'occurrence d'un scénario lié à une défaillance intrinsèque de l'ouvrage provoquée par des phénomènes de vieillissement. C'est une action de surveillance qui s'effectue en fonction de l'évolution attendue du barrage et des conditions externes (cote de la retenue, température, etc.) et permet d'assurer la sécurité de l'ouvrage.

Pour être pertinent, un système d'auscultation doit être correctement défini. Afin de retenir le dispositif d'auscultation long terme comme barrière de sécurité, sa conception doit suivre le processus suivant :

- définition des objectifs de l'auscultation : les objectifs sont définis en fonction des phénomènes dangereux identifiés (en général la rupture, mais aussi le blocage d'une vanne...) ayant pour origine une évolution irréversible de l'ouvrage. La cinétique des événements initiateurs associés doit être évaluée ;
- définition des paramètres mesurés : les paramètres représentatifs des phénomènes de vieillissement et le type de mesure correspondant sont établis ;
- définition des moyens mis en œuvre : les dispositifs de mesure adaptés doivent être spécifiés, ainsi que leur implantation. Ils doivent être conçus et qualifiés en suivant les bonnes pratiques d'ingénierie. La fréquence, l'organisation mise en place et les responsabilités pour les différentes tâches doivent être définies ;
- possibilité de mettre en œuvre des mesures compensatoires : la possibilité de pallier les dérives par la réalisation de travaux de confortement, la mise en œuvre de dispositifs supplémentaires ou la vidange de la retenue doit être confirmée pour le phénomène surveillé ;
- évaluation de la cinétique du phénomène: la pertinence du système d'auscultation en tant que barrière de sécurité est liée à la cinétique des phénomènes surveillés. En effet, lorsqu'une anomalie est détectée, un temps suffisant doit être disponible pour effectuer des analyses complémentaires et mettre en œuvre des mesures compensatoires.

4.3.2 EFFICACITE

L'efficacité doit être évaluée pour la réalisation des mesures et l'exploitation de ces mesures.

Dans un premier temps les phénomènes propres à l'ouvrage susceptibles d'être détectés et suivis par l'auscultation doivent être identifiés. Les causes possibles des différents scénarios doivent être déterminées et la possibilité de les surveiller par de l'auscultation confirmée.

Ainsi, les phénomènes de vieillissement présentés dans le Tableau 3 et le Tableau 4 peuvent être surveillés par de l'auscultation.

Les paramètres suivis en auscultation sont efficaces si :

- des mesures intégratrices sur l'ensemble de l'ouvrage ou sur une zone de l'ouvrage sont possibles ;
- le phénomène surveillé est très localisé, rendant alors l'auscultation réalisable par un dispositif de mesure ponctuel.

Le nombre et la localisation des points de mesure est déterminé en fonction de l'ouvrage et des phénomènes surveillés. L'ensemble doit être assez complet pour rechercher les causes des dérives observées. S'il n'est pas possible d'instrumenter suffisamment de points de mesures ou si les points de mesures ne sont pas assez représentatifs, l'auscultation devra être complétée par des actions complémentaires telles que des inspections visuelles.

L'efficacité des appareils de mesure est caractérisée par leur précision et de leur fiabilité. Les appareils doivent être qualifiés pour l'usage prévu et leur précision doit être adaptée à l'application. Il convient néanmoins de remarquer qu'au vu de la cinétique lente des phénomènes auscultés, les défaillances ponctuelles des systèmes d'auscultation ou les erreurs de mesures peuvent être compensées.

La pérennité des mesures doit être assurée afin de permettre un traitement pertinent au long de la vie de l'ouvrage. Pour cela les appareils doivent avoir une durée de vie suffisamment longue, être maintenables ou remplaçables et étalonnés régulièrement. L'intervalle maximal de perte de série de données doit être déterminé de façon à connaître les intervalles de tests périodiques des appareils de mesure. Cette évaluation doit prendre en compte le temps de remplacement de l'appareil ou de mise en place d'un nouveau point de mesure

L'exploitation des résultats d'auscultation est un facteur important de l'efficacité. Il est primordial que les traitements de 1^{er} niveau soient réalisés lors de la saisie des données afin de s'assurer de la cohérence des valeurs obtenues et si nécessaire de les vérifier puis les valider.

L'interprétation doit être réalisée peu de temps après l'exécution des mesures afin de détecter au plus tôt une anomalie de comportement de l'ouvrage. Elle doit tenir compte de paramètres d'exploitation qui ont un effet sur les mesures (charge hydrostatique) et des conditions extérieures (température, phénomènes météo exceptionnels).

4.3.3 TEMPS DE REPONSE

L'auscultation est un système de prévention des risques intervenant très en amont du phénomène dangereux. Son temps de réponse doit être évalué au regard de la cinétique du phénomène de vieillissement et non de la cinétique du scénario accidentel.

Dans le cas de l'auscultation long terme, le temps de réalisation de la mesure et du traitement de premier niveau est peu critique car ces systèmes interviennent sur des précurseurs très en amont du phénomène dangereux. Le temps de détection d'une dérive est dépendant de la fréquence d'analyse des données plutôt que de la fréquence de réalisation des mesures. Une dérive peut être détectée lors des traitements de 1^{er} et 2nd niveaux, si des seuils sont définis ou lors de l'analyse des données pour des dérives peu importantes. Le temps de réponse doit prendre en compte les fréquences de mesures, les fréquences d'analyse, le temps pour obtenir une série de données suffisante et du temps nécessaire pour mettre en œuvre des mesures compensatoires.

Le temps nécessaire pour détecter des évolutions est de l'ordre de 2 ans. L'auscultation est donc adaptée à la surveillance d'évolutions lentes et progressives de l'ouvrage ou de ses appuis.

4.3.4 PERENNITE DES MESURES

Les méthodes d'évaluation des barrières de sécurité préconise de vérifier la maîtrise des systèmes dans le temps. Ce facteur est un point essentiel de la performance d'un système d'auscultation long terme.

En effet, les analyses sont faites sur des séries de données importantes dont l'acquisition est coûteuse en temps. La perte d'un point de mesure entraîne souvent la perte de l'historique des données pour cette mesure : si un appareil est remplacé, il y aura un décalage entre la nouvelle mesure et les mesures précédentes. L'intégration des nouvelles données à la série de données existante pour analyse et exploitation ne sera plus pertinente.

Le temps nécessaire à obtenir un historique de données suffisant pour calibrer les modèles est de l'ordre de 5 ans pour certains appareils. Le remplacement de ces appareils demandera une nouvelle calibration du modèle.

Pour évaluer un dispositif de mesure, il convient de déterminer :

- si l'appareil est étalonnable et si les dérives sont détectables,
- si l'appareil est remplaçable en conservant les mêmes valeurs de mesure.

Les éléments susceptibles d'être endommagés par des chocs doivent être protégés ou situés dans des zones non passantes. Il s'agit notamment des points de visée pour la topométrie ou des scellements pour les pendules.

L'archivage des données est également un point clé de la pérennité. Afin de garantir la conservation des données, l'archivage doit au minimum être réalisé dans deux lieux différents.

4.3.5 INTEGRATION DANS L'ETUDE DE DANGERS : 3 APPROCHES ENVISAGEES

Les trois approches envisagées pour l'auscultation long terme sont discutées dans ce paragraphe.

❖ *Approche par niveau de confiance*

Cette approche consisterait à considérer le système d'auscultation comme une barrière de sécurité et à lui affecter un niveau de confiance.

Le niveau de confiance caractérise de manière semi-quantitative la probabilité de fonctionnement d'une barrière ou le facteur de réduction de risque qu'elle apporte. C'est l'une des données qui contribue à la détermination de la probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux.

Les paramètres quantifiés dans les évaluations probabilistes des barrières de sécurité sont la probabilité de défaillance à la demande ou la probabilité de défaillance par heure. Ces probabilités sont évaluées pour des systèmes qui doivent être fonctionnels lors d'une sollicitation ponctuelle (dans le temps) et qui doivent alors réagir dans un temps très bref.

Ces paramètres ne sont pas adaptés à l'évaluation des dispositifs d'auscultation long terme :

- les défaillances d'un appareil de mesure ou les erreurs dans la réalisation de la mesure sont détectables par traitement de premier et second niveaux, ce qui offre une possibilité de rattrapage,
- les cinétiques permettent de confirmer la mesure, de remplacer les matériels ou de mettre en place des mesures complémentaires,
- le temps de réponse – attendu et réalisé – ne peut pas être défini de manière précise,
- ces systèmes ne fonctionnent pas à la sollicitation mais doivent permettre de collecter des données de manière régulière et sur le long terme.

Des mesures probabilistes pertinentes doivent être représentatives de la capacité du système à réaliser tous les points de mesures prévus dans un délai acceptable et avec la précision nécessaire. Ces paramètres sont pris en compte par :

- le taux d'indisponibilité et les durées maximales d'indisponibilité,
- le taux de détection des erreurs de mesure.

Ces paramètres, représentatifs de la qualité de l'auscultation et de sa gestion, ne peuvent néanmoins pas être exploités pour définir un facteur de réduction de risque. Il n'est pas pertinent d'affecter un niveau de confiance à un système d'auscultation long terme.

La non-pertinence de cette approche pour l'auscultation long terme est renforcée par le fait que la fréquence d'occurrence des événements initiateurs que viendrait décodifier un éventuel niveau de confiance est difficilement caractérisable. Le retour d'expérience est rarement dissocié de l'auscultation qui apparaît comme une composante de l'ouvrage à part entière.

Au-delà du critère de niveau de confiance, l'évaluation d'une barrière de sécurité repose sur les critères d'efficacité, de temps de réponse et de maîtrise du dispositif dans le temps. Ces trois critères sont applicables à l'auscultation et pertinent pour l'évaluer de manière qualitative.

❖ *Sensibilité de la fréquence d'EI à l'auscultation*

Il existe peu de données sur les fréquences d'événements initiateurs dus à des phénomènes de vieillissement. Lorsqu'elles existent, il n'est pas possible de déterminer si ces données ont été estimées en absence ou en présence de dispositif d'auscultation. Il est donc a priori peu évident d'évaluer l'impact d'un dispositif d'auscultation sur une fréquence d'événement initiateur.

Cependant, l'apport d'une auscultation adéquate en matière de réduction du risque à la source est indéniable : en précisant la compréhension du phénomène de vieillissement, une auscultation adéquate permet un affichage plus précis et donc moins majorant de la fréquence d'occurrence d'un événement. L'impact de l'auscultation sur la fréquence d'événement initiateur sera donc évalué en fonction de la qualité du système d'auscultation. Celle-ci devra être évaluée pour les dispositifs techniques (appareils de mesure, télémesures), et l'organisation (réalisation des mesures, traitement et analyse des données).

Si la fréquence de l'événement initiateur est connue

Cette approche consiste à évaluer de manière qualitative la fiabilité du dispositif d'auscultation afin d'intégrer une surcote ou une décote à la fréquence d'un événement initiateur par rapport à un état de référence, en général le plus fréquemment rencontré dans le retour d'expérience. On évalue la qualité du système d'auscultation a priori en fonction des technologies, de l'architecture et de l'organisation mises en œuvre.

La performance d'un système d'auscultation sera évaluée par rapport à un état de référence appareils de mesure – organisation moyens, pour des applications similaires. Un exemple de grille d'évaluation pour le sous-système « mesures » est donné ci-dessous. La même approche doit alors être appliquée à l'évaluation des sous-systèmes « organisation de l'analyse » et « diagnostic et actions ».

Atteinte du critère	Concept éprouvé	Redondance des mesures	Détection des erreurs et défauts	Simplicité d'utilisation	Maintenabilité	Tests et étalonnage	Qualification du matériel
Faible							
Moyenne							
Elevée							

Tableau 7 : Grille d'évaluation du sous-système « mesure »

La cotation du système sera réalisée suivant des critères de performance par comparaison avec l'état de l'art sur le même type de mesure. Cette évaluation doit être donc faite par rapport à la surveillance de phénomènes semblables sur des ouvrages similaires et non par rapport à la technologie de mesure.

Si le dispositif est évalué comme faible pour au moins un critère une surcote sera appliquée à la fréquence d'EI.

Si le dispositif n'est évalué comme faible pour aucun des critères et est évalué comme élevé pour la majorité des critères, une décote pourra être appliquée à la fréquence de l'événement initiateur.

Les niveaux considérés comme moyens et des décotes et surcotes appliquées devront être définis en fonction du retour d'expérience, des bonnes pratiques et d'avis d'experts sur le sujet. Ce travail pourrait être réalisé par exemple un groupe de travail multipartite ad hoc.

Si la fréquence de l'événement initiateur n'est pas connue

Cette approche visera à remplacer la fréquence de l'événement initiateur par une évaluation qualitative de la probabilité de non-fonctionnement de l'auscultation pour le scénario évalué, autrement dit de la non-détection d'une dérive de comportement de l'ouvrage.

La fréquence de l'événement initiateur sera donc majorée car on ne considérera pas la concomitance des événements « Présence d'un phénomène de vieillissement » et « non-fonctionnement du système d'auscultation » mais seulement la probabilité du second événement.

L'évaluation qualitative de la probabilité de non fonctionnement de l'auscultation pourra reprendre l'échelle de cotation issue de la réglementation sur les IC :

Echelle de probabilité	E	D	C	B	A
Qualitative (si le REX est suffisant)	« événement possible mais extrêmement peu probable » : <i>n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années installations</i>	« événement très improbable » : <i>s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité</i>	« événement improbable » : <i>un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité</i>	« événement probable » : <i>s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation</i>	« événement courant » : <i>s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation, malgré d'éventuelles mesures correctives</i>

Tableau 8 : Exemple d'échelle de cotation qualitative pour la probabilité d'occurrence (issue de la réglementation des IC)

Cette approche revient à estimer l'occurrence du phénomène de dégradation comme certaine. Elle suppose un retour d'expérience suffisant.

❖ *Contrôle des hypothèses de construction*

Cette approche consiste à intégrer les résultats d'auscultation a posteriori. Elle est donc valable sur un ouvrage pour lequel un historique de données analysées est disponible. Il ne s'agit pas d'évaluer un événement initiateur en fonction de la qualité de l'auscultation mais en fonction des résultats de l'auscultation. Ceci suppose de réaliser une interprétation des résultats orientée suivant cet objectif.

Lors de l'étude de dangers d'un ouvrage, les phénomènes de vieillissement susceptibles de provoquer un phénomène dangereux sont dans un premier temps identifiés. Si ces phénomènes sont effectivement auscultés, par des systèmes répondant à des critères minimaux, les résultats de l'auscultation seront analysés afin de déterminer la présence ou non du phénomène, son avancement et sa cinétique.

L'objectif sera de déterminer si ce phénomène est :

- possible car déjà rencontré sur ce type d'ouvrage, mais non observé sur l'ouvrage étudié,
- probable car des variations faibles des paramètres le mesurant sont observées,
- avéré car le début du phénomène de dégradation est mesurable sans ambiguïté sur l'ouvrage.

Le rapport d'auscultation et la revue de sûreté d'un ouvrage fournissent alors des données d'entrée de l'étude de dangers, au même titre qu'une étude de stabilité ou une étude hydrologique : l'étude de dangers n'a pas à faire doublon avec ces études mais les utilise dans le but d'en dégager une vision globale de la maîtrise du risque. A son tour, l'étude de dangers sera alors en mesure de nourrir la réflexion lors de l'élaboration d'autres documents clés de l'ouvrage, et notamment de la revue de sûreté.

La cotation de la fréquence de l'événement initiateur sera donc réalisée en fonction de l'état du barrage lors de la réalisation de l'étude de dangers, en intégrant l'auscultation et ses conséquences dans cette cotation. Le barrage et son auscultation forment un élément indistinct auquel sont attribuées des fréquences d'occurrence de dérives susceptibles de mener à un accident majeur.

Si les analyses montrent que le phénomène de vieillissement est probable ou avéré, une surcote devra être appliquée à la fréquence de l'événement initiateur. Les recommandations sur l'auscultation qui doivent alors logiquement avoir été formulées dans le rapport d'auscultation ou la revue de sûreté pourront également être reprises dans l'EDD afin de regrouper toutes les recommandations liées à l'ouvrage étudié.

Par ailleurs, les paramètres utilisés pour évaluer l'évolution du phénomène devront être surveillés et analysés régulièrement afin de vérifier que les conditions restent valables. Ceci nécessite en particulier d'orienter les analyses des données dans le sens de la surveillance de phénomènes de vieillissement particulier susceptibles d'être des événements initiateurs.

Comme pour l'approche précédente, cette méthodologie nécessite au préalable de dégager un consensus sur un dispositif minimal permettant le suivi d'une potentielle dérive, dans l'idéal par un groupe de travail multipartite ad hoc.

4.3.6 DISCUSSION SUR CES TROIS APPROCHES

Dans un premier temps, l'opportunité d'intégrer les systèmes d'auscultation en tant que barrières de sécurité dans l'évaluation des risques a été étudiée. Il apparaît que le fonctionnement et les objectifs de l'auscultation ne correspondent pas à la définition d'une barrière de sécurité. La notion de probabilité de défaillance à la sollicitation n'est pas représentative d'un système d'auscultation, celui-ci s'inscrivant dans des référentiels de temps et d'espace beaucoup plus larges qu'une barrière classique. Il n'est pas possible d'attribuer un facteur de réduction de risque et donc un niveau de confiance à de tels systèmes. De plus, le retour d'expérience disponible ne permet pas d'évaluer l'impact de l'auscultation sur les probabilités d'occurrence des événements redoutés. En effet l'auscultation joue sur les paramètres de conception et de maîtrise de l'ouvrage et donc sur la fréquence d'occurrence même des événements initiateurs. Certains critères d'évaluation des barrières sont toutefois à retenir pour la qualification d'un système d'auscultation : il s'agit de l'efficacité, du temps de réponse et de la maîtrise dans le temps.

La seconde approche, basée sur l'état de l'art de l'auscultation et son fonctionnement réel, cherche à identifier la sensibilité des fréquences d'événements initiateurs à l'auscultation mise en place. Ces données d'entrée ne sont toutefois pas toujours disponibles. De plus, la pondération des critères d'évaluation doit être établie et cette hiérarchisation générique des modes de défaillance de barrages de même type est loin d'être triviale.

L'approche basée sur les résultats de l'auscultation est plus conforme à la philosophie de l'auscultation, d'une part, qui a pour but d'améliorer la connaissance du comportement de l'ouvrage et de son évolution, mais également d'autre part de l'étude de dangers, qui constitue une démonstration de la maîtrise du risque global lié à un ouvrage par l'exploitant en faisant appel à des données d'entrée d'expertises diverses. Pour autant, cette approche nécessite un cadre de critères minimaux à définir. Ce cadre doit permettre de fournir des éléments d'évaluation d'un dispositif donné, associé à une dérive donnée, et ne peut être défini que par un groupe de travail rassemblant les compétences nécessaires.

Ces trois approches ont pour objectif de quantifier les fréquences d'occurrence des scénarios. Elles ne sont donc utilisables que si des données de fréquences d'événement initiateur sont disponibles. En l'absence de fréquences d'événements initiateurs ou hors du cadre des EDD, les critères de définition,

efficacité, temps de réponse et maintien des performances dans le temps sont toujours applicables. Ces critères peuvent servir de base pour valider les systèmes d'auscultation mis en place et garantir la pertinence des rapports d'auscultation.

4.4 CRITERES ADAPTES AUX SYSTEMES D'AUSCULTATION COURT TERME

4.4.1 CRITERES MINIMAUX

A la différence des systèmes d'auscultation long terme, les systèmes d'auscultation court terme ne reposent pas sur l'enregistrement et l'analyse d'une série de données. Il s'agit de systèmes d'alarme dont le déclenchement est activé par le franchissement d'un seuil défini pour une mesure identifiée.

Il n'existe pas de systèmes d'auscultation court terme entièrement automatisés. La réalisation de la mesure et le déclenchement de l'alarme peuvent certes être automatisés mais l'action est en général décidée après un diagnostic humain. Il s'agit donc de systèmes en boucle ouverte, c'est-à-dire intégrant l'intervention d'au moins un opérateur dans la prise de décision.

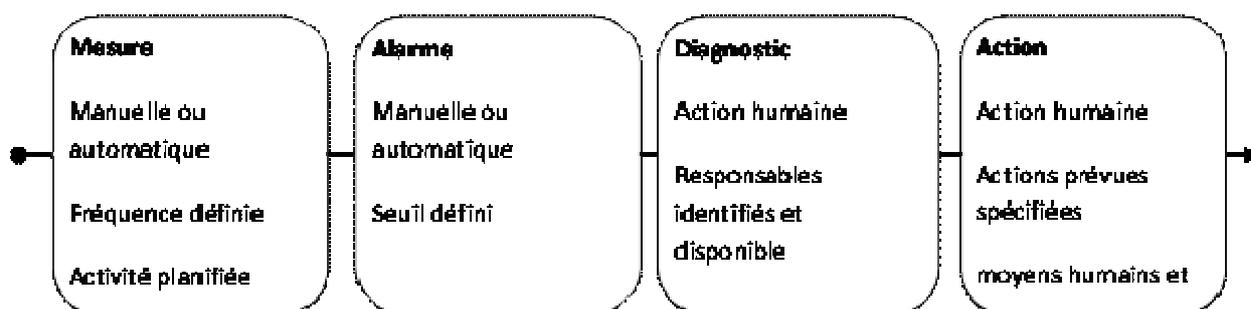


Figure 5 : Diagramme d'une barrière d'auscultation court terme

Pour être retenus comme barrières de sécurité, les systèmes d'auscultation doivent satisfaire les critères minimaux suivants :

- **Scénario défini** en termes de séquence, éléments mesurables et cinétique :

Le système d'auscultation doit répondre à un scénario d'accident précis. La description de la séquence accidentelle permet de déterminer les événements initiateurs et les phénomènes mesurables permettant de les détecter. Les effets mesurables peuvent l'être de manière globale, pour l'ensemble de l'ouvrage ou d'une zone de l'ouvrage ou localisés, pour un point critique précis de l'ouvrage. L'analyse doit montrer qu'il est possible d'instrumenter l'ouvrage de manière à détecter le scénario quelle que soit la localisation de l'événement initiateur. La cinétique du scénario qui est le temps minimal entre l'apparition d'un effet mesurable et l'occurrence du phénomène dangereux.

- **Seuils d'alertes définis** en fonction du risque, et de la cinétique :

Les seuils de déclenchement des alertes doivent être connus et documentés. Le déclenchement humain ou automatisé de l'alerte doit être effectué de manière simple sur franchissement du seuil.

- **Barrière indépendante** du scénario :

L'indépendance de la barrière doit être évaluée pour les éléments techniques ou organisationnels. L'occurrence du scénario ne doit pas endommager le matériel et les points de mesures doivent rester accessibles en cas d'occurrence de l'événement initiateur.

- **Actions de sécurité prévues** et responsables identifiés :

Les personnes chargées de faire l'analyse de la situation et de prendre la décision doivent être disponibles dans un temps compatible avec la cinétique du scénario. L'organisation doit répondre à cette exigence. De plus, les actions à mettre en œuvre doivent avoir été prévues en amont de la situation d'alerte, les parties prenantes identifiées et les délais de réponse maximum spécifiés.

Tous ces éléments doivent être établis et justifiés en fonction des spécificités de l'ouvrage et du phénomène surveillé. Ils ne peuvent être spécifiés de manière générique.

Si ces critères sont validés, le système d'auscultation peut être considéré comme une barrière pour les scénarios considérés. Ses performances peuvent alors être évaluées suivant les critères de l'Oméga 10 pour les éléments matériels et Oméga 20 pour les actions humaines. Ces deux rapports donnent des éléments pour évaluer l'efficacité, le temps de réponse et le niveau de confiance des différents éléments constituant le système d'auscultation.

4.4.2 CRITERE D'EFFICACITE

L'efficacité, aptitude d'une barrière de sécurité à remplir la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie, dans son contexte d'utilisation, pendant une durée donnée de fonctionnement, est à considérer pour l'ensemble des éléments composant le système d'auscultation de la réalisation de la mesure aux actions mises en œuvre en cas de dérive de la mesure.

❖ *Efficacité de la mesure*

Le premier élément à prendre en compte est la grandeur physique mesurée. Elle doit être représentative du scénario considéré et la plus générale possible. Le seuil de déclenchement de l'action de sécurité doit être justifié et documenté.

Ensuite, les appareils de mesures utilisés et la couverture qu'ils apportent doivent être évalués. En particulier, il faut définir si

- la mesure est uniquement locale ou si elle est globale pour l'ensemble de l'ouvrage,
- les appareils utilisés sont qualifiés ou de concept éprouvé.

Plusieurs appareils de mesure peuvent être mis en place, soit pour améliorer la couverture de zone, soit pour améliorer la redondance et la tolérance aux défaillances. La distinction entre la couverture de zone et la redondance doit être prise en compte dans l'évaluation du système.

Exemple : Une mesure de débit de fuite couvre-t-elle l'ensemble des sources et localisation possibles ?

❖ *Efficacité de l'exploitation de la mesure*

L'efficacité doit être évaluée pour les actions humaines et organisationnelles et pour les mesures compensatoires prévues. L'efficacité repose sur la connaissance a priori des actions à mettre en œuvre en cas d'alerte :

- responsables de l'analyse identifiés et disponibles,
- actions de sécurité définies et réalisable pour tous les modes de fonctionnement,
- critères de décision explicite si plusieurs mesures sont possibles,
- capacité de l'action à mettre l'ouvrage en sécurité.

Exemple : En cas de franchissement du seuil de débit de fuite, les personnes responsables de la décision sont-elles présentes sur site ou joignables en tout temps ? Existe-t-il des moyens pour déterminer la cause de la fuite ? Est-il possible de réaliser des travaux de confortement ou de faire baisser le niveau de la retenue ?

4.4.3 CRITERE DE TEMPS DE REPONSE

Le temps de réponse doit être adapté au scénario évalué. Il correspond au temps nécessaire entre le franchissement du seuil défini pour le paramètre surveillé et la mise en sécurité de l'ouvrage.

Le temps de réponse doit prendre en compte l'ensemble de la chaîne. Il doit donc prendre en compte la fréquence et le temps d'acquisition des données, de transfert des données et d'activation des alarmes, de prise de décision et de mise en œuvre d'une action de sécurité.

La définition d'un temps de réponse nécessite donc d'analyser précisément la séquence accidentelle et les actions de sécurité à mettre en œuvre. Ceci peut inclure de faire appel à un sous-traitant pour réaliser une opération de confortement. Dans ce cas, les délais d'intervention devront être évalués et contractualisés.

Le temps de réponse doit être considéré au pire cas. Il est dépendant des fréquences maximales de réalisation des mesures et d'acquisition de ces mesures.

L'évaluation du temps de réponse pour les activités humaines nécessite d'identifier les responsables des différentes opérations et leur disponibilité. Certaines activités peuvent être planifiées et cycliques (réalisation d'une mesure) d'autres activités sont réalisées lorsque la situation anormale est perçue (diagnostic et mise en œuvre d'une action).

Le temps de mise en œuvre de mesures compensatoires relatives au scénario considéré doit également être évalué. La mise en œuvre de ces mesures peut dépendre du temps de prise de décision (par exemple par une cellule de crise) et doit tenir compte du temps de mise à disposition des ressources humaines ou matérielles quel que soit le moment où la dérive se produit (de nuit, en effectif réduit, etc.)

Exemple : dans le cas d'un renard hydrique, il peut être prévu de faire appel à un prestataire extérieur pour le confortement d'un ouvrage. Les délais de réalisation doivent être connus et les moyens humains et matériels doivent être mis à disposition dans des délais suffisants. L'ensemble de ces éléments doivent être spécifiés, documentés et éventuellement contractualisés.

4.4.4 NIVEAU DE CONFIANCE

Le niveau de confiance doit être évalué pour l'ensemble des éléments humains et organisationnels entrant en jeu de la barrière de type système d'auscultation court-terme. Le niveau de confiance global est égal au niveau de confiance du moins bon de ces éléments.

Le niveau de confiance est nul si les critères minimaux, d'efficacité et de temps de réponse ne sont pas remplis.

4.4.4.1 NIVEAU DE CONFIANCE DES SOUS-SYSTEMES TECHNIQUES

Les éléments matériels se limitent généralement à l'appareil de mesure et éventuellement au dispositif de télémessure. Différents critères qualitatifs et quantitatifs permettent d'évaluer leur niveau de confiance :

- le principe de concept éprouvé,
- la résistance aux contraintes spécifiques,
- la technologie utilisée (simple ou complexe, éprouvée par l'usage),
- la tolérance aux défaillances (redondance),
- la possibilité de détection des défaillances (diagnostic).

Remarque : Le principe de sécurité positive en général utilisé pour les systèmes instrumentés de sécurité n'est pas applicable aux barrières de sécurité basées sur de l'auscultation.

Un dispositif utilisé à des fins de sécurité devra satisfaire au principe de concept éprouvé. Il faudra donc qu'il réponde pour cela aux exigences suivantes:

- soit l'équipement a subi des tests de qualification pour un usage précis correspondant au contexte de mise en place sur site,
- soit il est utilisé depuis plusieurs années sur des ouvrages et pour des fonctions similaires et le retour d'expérience est bon.

Un dispositif de type nouvelle technologie devra être éprouvé a minima sur des ouvrages similaires ou en parallèle de dispositifs de concept éprouvé.

Le dispositif doit être adapté aux contraintes d'utilisation. Il doit pour cela être qualifié pour les conditions de température et d'humidité, y compris en cas d'événements météorologiques extrêmes. L'accessibilité des points de mesure lors de ces événements doit également être prise en compte.

La technologie peut être simple ou complexe. En règle générale, les dispositifs de mesure manuelle permettant une lecture directe seront considérés comme simples et les dispositifs télémésurés ou basés sur un appareil de mesure électronique seront considérés comme complexes.

La tolérance aux défaillances s'assimile à la redondance. Une mesure d'auscultation entrant en jeu dans une barrière de sécurité sera considérée comme "tolérante à une anomalie" lorsque le dysfonctionnement d'un des éléments la composant ne perturbera pas la réalisation de la mesure. Des appareils couvrant différentes zones de l'ouvrage ne doivent pas être considérés comme redondants.

La détection des défaillances doit permettre de diagnostiquer une dérive de la mesure ou un défaut de l'appareil de mesure dans un temps compatible avec la fréquence de l'événement initiateur. Les fréquences de tests et de diagnostic doivent être largement inférieures aux fréquences d'EI (facteur de 10 exigé par la norme CEI 61511). Le diagnostic peut être réalisé par des mesures manuelles ou des comparaisons avec d'autres mesures. En particulier, il faudra vérifier :

- les procédures et fréquences de tests et de validation utilisées,
- la maintenabilité des équipements.

En fonction des paramètres de technologie, tolérance aux défaillances et possibilité des défaillances, le niveau de confiance peut être défini pour les sous-systèmes matériels.

Diagnostic des défaillances	Technologie simple		Technologie complexe	
	Tolérance aux défaillances		Tolérance aux défaillances	
	Non	Oui	Non	Oui
Aucune	0	1	0	0
Fréquence faible	1	2	0	1
Fréquence élevée	2	3	1	2

Tableau 9 : Niveau de confiance des éléments matériels de barrières de type « auscultation court-terme »

4.4.4.2 NIVEAU DE CONFIANCE DES SOUS-SYSTEMES HUMAINS

Chaque activité humaine entrant en jeu dans le système d'auscultation doit être identifiée et évaluée. Certaines activités sont simples ou planifiées, d'autres nécessitent une analyse et une prise de décision en situation d'urgence. Les éléments du système d'auscultation réalisés par des opérations humaines peuvent être :

- la réalisation de la mesure ;

- le traitement de premier niveau de la mesure ;
- le diagnostic sur dépassement de seuil ;
- la prise de décision sur l'action à réaliser ;
- la mise en œuvre de l'action de sécurité.

Une ou plusieurs personnes peuvent être impliquées dans la réalisation de chaque tâche. Ces personnes doivent être identifiées, disponibles et compétentes.

La méthode Omega 20 donne des éléments d'appréciation du niveau de confiance pour des tâches d'obtention de l'information active ou passive, de diagnostic et de réalisation de l'action.

Le principe de cette méthode est d'affecter une décote comprise entre 0 et 2 au niveau de confiance optimal considéré comme égal à 2. Les décotes sont estimées en fonction de la complexité, de la difficulté et des conditions de réalisation de la tâche à effectuer.

Par exemple, le tableau ci-dessous donne l'appréciation de la situation de travail pour la tâche « réalisation de l'action de sécurité »

Décote	Caractéristiques de la situation de travail
0	<p><u>Niveau de stress acceptable :</u> Ressources nécessaires à la réalisation de l'action jugées suffisantes : absence de pression temporelle ou temps d'intervention largement inférieur à la cinétique de l'accident, pas d'exposition au danger, expérience significative de la situation, feedback suffisant sur l'action engagée,...</p> <p><u>ET</u> <u>Tâche simple et peu exigeante :</u> Nombre d'actions limité, sans enchaînement complexe (par exemple : fermer plusieurs vannes sans notion d'ordre), système robuste aux erreurs (détrompeur, temporisation, codes couleurs ou symboles évitant le risque de confusion,...) ou permettant d'alerter l'opérateur pour lui donner la possibilité de revenir en arrière. Les moyens d'actions étant facilement accessibles et facilement manœuvrables.</p>
- 1	<p><u>Niveau de stress possible mais tolérable :</u> Ressources nécessaires à la réalisation de l'action jugées pouvant s'avérer insuffisantes, notamment dans certaines conditions difficiles (peu de marge temporelle, exposition au danger, ...)</p> <p><u>ET/OU</u> <u>Tâche moyennement exigeante ou difficile :</u> Nombre d'actions limité mais niveau d'exigence plus élevé : efforts importants de mémorisation ou de concentration, enchaînements stricts à respecter (par exemple : arrêter la pompe P1 puis seulement après, fermer la vanne V1 et ensuite la vanne V2. Modifier l'ordre de ces actions entraînerait un accident) mais le système permet à l'opérateur de revenir en arrière. Ou les moyens d'actions peuvent être moyennement accessibles et manœuvrables.</p>
- 2	<p><u>Niveau de stress important :</u> Fort ressenti de pression : ressources nécessaires à la réalisation de l'action jugés inadaptées par rapport aux objectifs à atteindre (temps jugé insuffisant, exposition au danger, effet de panique, ...).</p> <p><u>OU</u> <u>Tâche très exigeante, difficile ou impossible :</u> Niveau d'exigence trop élevé (nombre d'actions important avec enchaînements stricts, impossibilité d'interrompre les effets d'une action engagée par erreur, ...) et/ou accessibilité ou manœuvrabilité difficile ou impossible des moyens d'action.</p>

Tableau 10 : Estimation de la décote pour la tâche « réalisation de l'action de sécurité » -source : Omega 20 (INERIS)

Dans les faits, une décote d'au moins 1 devrait être appliquée aux activités de diagnostic et de décision si le diagnostic demande des analyses complémentaires et s'il n'y a pas d'action systématique prévue sur dépassement du seuil.

4.4.5 MAINTIEN DES PERFORMANCES DANS LE TEMPS

La performance du matériel se dégrade dans le temps lorsqu'aucune maintenance n'est mise en place. Le maintien des performances dans le temps doit être assuré par la mise en œuvre d'une maintenance et d'une inspection adaptées, et en réalisant des tests périodiques de fonctionnement.

En cas de modifications (sur le système d'auscultation, sur l'ouvrage et son exploitation ou sur l'organisation), il faut que les performances des systèmes d'auscultation court-terme, en tant que barrières, soient maintenues.

4.4.6 SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION

Les tableaux ci-dessous synthétisent les critères d'évaluation d'un système d'auscultation en tant que barrières de sécurité. Le premier tableau correspond à la première phase de l'analyse, durant laquelle on cherche à déterminer si le système d'auscultation peut être retenu comme barrière. Le second tableau correspond à la cotation du niveau de confiance du système d'auscultation.

CRITERES MINIMAUX	
Définition du scénario	<ul style="list-style-type: none"> - Phénomène de dégradation - Séquence accidentelle - Grandeurs mesurable sur cette séquence - Cinétique du scénario
Action de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en sécurité de l'ouvrage possible - Moyens prévus et identifiés - Action réalisable lors de la séquence accidentelle
Appareil de mesure	<ul style="list-style-type: none"> - Seuil d'alerte prévu - Mesure réalisable lors de la séquence accidentelle
Synthèse	Les critères minimaux doivent être remplis pour l'ensemble des éléments
EFFICACITE	
Mesure	<ul style="list-style-type: none"> - Grandeur physique représentative du scénario - Couverture de zone du ou des appareils de mesure suffisante - Concept éprouvé
Exploitation de la mesure	<ul style="list-style-type: none"> - Identification des responsables de la décision et de l'action - Actions possibles prévues en amont - Critères de décision explicites - Efficacité de l'action quel que soit les conditions et l'état de l'ouvrage
Synthèse	L'efficacité doit être évaluée pour l'ensemble du système technique et organisationnel
TEMPS DE REPONSE	
Temps de réponse et comparaison avec cinétique du scénario	<ul style="list-style-type: none"> - Fréquence de mesure - Temps de mise à disposition des personnes responsables de l'analyse et de prise de décision - Temps de mobilisation des moyens humains et matériels et de réalisation de l'action
Synthèse	Le temps de réponse est la somme des temps de mise en

	œuvre des différents éléments techniques et organisationnels
SYNTHESE : La barrière peut être retenue : oui ou non	

Tableau 11 : Critères permettant de retenir une barrière

NIVEAU DE CONFIANCE	
Niveau de confiance des éléments matériel	<ul style="list-style-type: none"> - Concept éprouvé - Technologie - Tolérance aux défaillances - Détection des défaillances
Niveau de confiance des actions humaines	<ul style="list-style-type: none"> - Responsables identifiés - Documentation du scénario et des critères de choix - Complexité de l'action - Difficulté de l'action - Niveau de stress
Synthèse	NC global= Moins bon NC des différents sous-systèmes
SYNTHESE : Le facteur de réduction de risque peut être évalué	

Tableau 12 : Critères de cotation du niveau de confiance d'un système d'auscultation court terme

5. CRITERES D'APPRECIATION DE DISPOSITIFS PARTICULIERS

Cette partie vise à fournir quelques éléments et pistes d'évaluation sur des dispositifs particuliers mis en œuvre dans le cadre de systèmes d'auscultation, en particulier les systèmes de mesure.

5.1 CRITERES D'APPRECIATION DES APPAREILS DE MESURES

Les critères suivants doivent intervenir dans la sélection et l'évaluation d'un appareil de mesure :

- limites d'utilisation (types d'ouvrage, environnement),
- robustesse,
- redondance et corrélation des mesures,
- plage de mesure,
- précision de mesure,
- vérifications et Inspections,
- maintenabilité,
- étalonnage,
- durée de vie et pérennité de la mesure.

Les performances de l'auscultation pourront être caractérisées en termes de :

- Type de mesure : locale ou intégratrice,
- Echelle de mesure : plage de mesure et précision de la mesure
- Technologie utilisée : Fiabilité et pérennité, complexité, possibilité de redondance,
- Mise en œuvre de la mesure : complexité de la réalisation de la mesure, maintenabilité, testabilité.

Les paragraphes 5.2 et 5.3 donnent des éléments qualitatifs sur certains appareils de mesures. Le paragraphe 5.4 présente différents dispositifs d'auscultation et leurs performances dans un tableau de synthèse.

5.2 MESURE DES MOUVEMENTS ET DEFORMATIONS

5.2.1 PENDULES DIRECTS ET INVERSES

Domaine d'application :

Mesure des déplacements horizontaux relatifs de deux points disposés sur une même verticale. Mesure de déplacements verticaux pour les pendules équipés d'un dispositif de mesure en Z.

Principe de la mesure :

Un fil tendu par un poids indique la verticale et permet de déterminer le déplacement de la projection du point d'ancrage par rapport à une table de visée scellée au corps du barrage.

Avantages des mesures de pendule :

- grande précision des mesures (1/10 mm) ;
- simplicité d'exécution des mesures ;
- mesure directement significative ;
- possibilité de mesures fréquentes ;
- capacité à être automatisées et télétransmises.

Inconvénients des mesures de pendule :

- mesures relatives d'un point par rapport à un autre ;

Points à examiner :

La précision de la mesure dépend de l'immobilité des fils, de la liberté de déplacement des fils et poids ou flotteurs, et de la qualité du scellement du câble et de la table de visée.

Il convient de vérifier que le câble est à l'abri de mouvement d'air ou de projection d'eau. Que la table et le câble sont scellés sur le même plot que le scellement est de bonne qualité, qu'il n'y a pas d'obstacle sur la trajectoire du câble, que les niveaux de liquide dans les réservoirs sont constants et que les réservoirs ne sont pas gelés.

5.2.2 PLANIMETRIE ET NIVELLEMENT

Domaine d'application :

Mesure des déplacements planimétriques d'un ensemble de repères par rapport à un réseau de repères et de stations supposés fixes.

Principe de la mesure :

Le déplacement des repères est calculé à partir de mesures d'angles effectuées au théodolite de grande précision depuis un réseau de piliers ou autres repères supposés fixes.

Avantages des mesures planimétriques :

- possibilité de surveiller un grand nombre de points ;
- grandeurs directement significatives ;
- détermination de déplacements absolus ;
- grande pérennité du matériel.

Inconvénients des mesures planimétriques :

- mesures longues à réaliser ;
- faible précision ;
- nécessité de faire appel à un personnel spécialisé ;
- mesures ne pouvant pas être faites dans toutes les conditions météorologiques (fortes pluies, neige, brouillard).

Points à examiner

La qualité des mesures dépend du bon état du matériel utilisé, de la compétence du personnel qui réalise et dépouille les mesures et de la stabilité des repères.

Les repères de planimétrie et de nivellement scellés doivent être parfaitement solidaires de la structure qu'ils représentent. Il en est de même pour les stations et les plaques de calage des théodolites. Il convient donc de vérifier l'absence de fissures au voisinage des repères. Il convient également de protéger les repères contre les chocs susceptibles de se produire en phase de travaux par exemple.

5.2.3 EXTENSOMETRIE

Domaine d'application

Mesure ponctuelle des déformations dans un massif en béton en vue d'en déduire la valeur des contraintes et leurs directions.

Principe de la mesure

La déformation ponctuelle dans une direction donnée est mesurée par un appareil immergé dans le béton avant sa prise. Cet appareil est constitué d'une corde métallique tendue entre deux flasques. Un électroaimant met la corde en vibration et un second électroaimant permet de mesurer le mode vibratoire et d'en déduire la tension de la corde qui est directement fonction de sa longueur. La fréquence de la vibration est fournie par un fréquencemètre.

Avantages des mesures d'extensométrie

- grande précision des mesures ;
- facilité des mesures ;
- mesures électriques donc transmissibles.

Inconvénients des mesures d'extensométrie

- mesure indirecte ;
- impossibilité d'intervenir sur les appareils ;
- indications ponctuelles ;
- difficulté d'interprétation ;
- risque de dérive de l'appareillage.

Points à examiner

Le matériel de mesure n'étant pas accessible, il n'y a pas de contrôle réalisable sur ce type d'appareils.

5.2.4 CONTROLE DE JOINTS ET FISSURES

Domaine d'application

Mesure des déplacements d'un bloc par rapport à un autre dans trois directions principales, soit au droit d'un joint, soit au droit d'une fissure.

Principe de la mesure

Le vinchon mis au point par la DTG d'Électricité de France comporte deux barres d'acier coudées, scellées de part et d'autre du joint ou de la fissure, permettant de mesurer, selon trois directions, les déplacements d'une barre par rapport à l'autre.

Matériels utilisés

Technologie simple : les barres sont scellées de part et d'autre d'une fissure ou d'un joint que l'on cherche à ausculter. Chaque barre est équipée de pastilles usinées permettant de disposer le pied à coulisses pour la mesure. Selon la direction, les distances entre les repères sont de 60, 80 ou 100 mm de manière à éviter d'intervertir deux mesures dans des directions différentes.

Avantages des mesures de vinchons

- grande simplicité du matériel utilisé ;
- mesure directe ;
- bonne précision (1/10 mm).

Inconvénients des mesures de vinchons

- Mesure ponctuelle et relative

Points à examiner

Les points de fixation doivent être parfaitement solidaires du bloc correspondant. Les pastilles sur lesquelles sont faites les mesures doivent être arrondies et à l'abri de toute corrosion. Les vinchons doivent être remplacés lorsque le déplacement mesuré dans l'une des trois directions dépasse une valeur seuil au-delà de laquelle la précision diminue fortement du fait du non-respect de la direction initiale des mesures.

Les points de mesure doivent être protégés des chocs ou situés de manière à ne pas y être exposés.

5.3 MESURE DES INFILTRATIONS ET PRESSIONS

5.3.1 PIEZOMETRE

Domaine d'application

Mesure des pressions d'eau dans un forage et des pressions interstitielles au sein d'un massif de matériau meuble. Les piézomètres en fondation permettent de détecter des sous-pressions et de l'artésianisme.

Principe de la mesure

La pression est obtenue, soit en implantant un capteur à l'endroit précis où on désire la mesurer, soit en la calculant à partir de la pression ramenée à l'extérieur du massif.

Avantages des piézomètres

- mesure directe facile à interpréter ;
- appareil télémessurable (utilisation de cellule électrique) ;
- bonne précision si le matériel est adapté.

Inconvénients des piézomètres

- mesure ponctuelle ;
- difficulté d'intervenir sur une cellule si celle-ci ne fonctionne pas ;
- cellule sensible à l'état de magnétisation de la corde vibrante.

Points à examiner

Les piézomètres fermés (cellule CL1 de Telemac) permettent une mesure électrique

- Inconvénient : difficiles à contrôler et non remplaçables
- Avantage : télémesure possible

Il existe des piézomètres fermés à cellule rechargeable (munis d'un obturateur gonflable).

Des problèmes de compatibilité entre appareils de mesure et cellule peuvent se poser. Ils doivent provenir du même fournisseur.

Les Piézomètres ouverts sont sensibles à des défauts d'étanchéité sur la tête qui peuvent fausser la mesure

Les piézomètres sont plus efficaces en milieu calcaire qu'en milieu argileux ou les débits d'infiltration sont très faibles. Les piézomètres de Casagrande, qui ont un diamètre plus faible sont plus adaptés pour ces milieux.

Précision

- Piézomètre ouvert : précisions au cm
- Cellule : Précision au mm

5.3.2 DEBITS DE FUITE OU DE DRAINAGE

Domaine d'application

Mesure des débits de fuite au travers d'un massif.

Principe de la mesure

Les mesures de débit peuvent se faire de trois manières :

- à l'aide d'un récipient gradué mis en place sous l'écoulement pendant un temps déterminé ;
- à l'aide d'un récipient non gradué dont on mesure le temps de remplissage ;
- en continu en mesurant la hauteur d'eau passant au travers d'une section calibrée.

Des télémesures sont possibles en mesurant le niveau d'eau dans un réservoir.

Avantages des mesures de débit

- simplicité des mesures,
- possibilité de télémesure (capteur à ultrasons), ou capteurs de niveaux
- représentativité de la grandeur mesurée ;

Inconvénients des mesures de débit

- sensibilité au gel,
- nécessité d'un entretien fréquent ;

Points à examiner

Les capacités utilisées doivent être adaptées au débit à mesurer.

Les sections de mesure soit triangulaires, soit rectangulaires, doivent être maintenues propres. Il convient de prêter attention aux dépôts solides qui peuvent s'accumuler dans les bacs ou déversoirs.

5.3.3 FIBRE OPTIQUE

Domaine d'application

Localisation des changements de températures provoqués par une circulation d'eau.

Principe de la mesure

Une fibre optique protégée à l'intérieur d'un câble est installée dans la fondation. A l'aide d'un instrument de mesure, des impulsions lumineuses sont injectées dans la fibre. L'analyse de l'intensité rétrodiffusée et du décalage en longueur d'onde induit par la diffusion permettent de localiser l'écoulement d'eau.

La mesure du temps de parcours (aller et retour) permet de déterminer la température de la fibre tout le long du câble. Cette mesure est donc intégratrice.

Différents types d'analyseurs prennent en compte des types de diffusion différents : Brillouin ou Raman.

Les systèmes Brillouin ont une portée de 30km, les systèmes Raman de 1 à 10km (Données constructeurs). La précision est de l'ordre de 1m.

Avantages de la fibre optique

- mesure intégratrice ;
- ne nécessite pas d'identifier la localisation précise des fuites probables ;
- insensibilité à la corrosion, à la CEM ;
- télémesure possible.

Inconvénients la fibre optique

- mesure indirecte (mesure de température) ;
- étalonnage complexe de chaque câble ;
- mesure non pérenne (en cas de remplacement la série de données est perdue) ;
- Sensible à l'état de traction de la fibre donc aux déformations (la fibre peut être utilisée pour mesurer des déformations ou des tensions)

5.4 SYNTHÈSE DES PERFORMANCES DE DISPOSITIFS D'AUSCULTATION PARTICULIERS

Phénomène mesuré	Appareil de mesure	Type de mesure (Locale ou intégratrice)	Précision	Pérennité	Complexité	Fiabilité	Redondance	Epruvé
Mesures géodésiques Rq : la fréquence de ces mesures est généralement faible	Planimétrie	Intégratrice (mouvement absolu)	mm	Elevée	Complexe	Très élevée	Différents points de mesure	Oui
	Nivellement	Intégratrice (mouvement absolu)	mm	Elevée	Complexe	Très élevée	Différents points de mesure	Oui
	GPS	Intégratrice (mouvement absolu)	cm	Non maîtrisée	Complexe	Non maîtrisée	Indispensable	Non
Déformations (relatif)	Pendules / pendules inverses	Locale (mouvement relatif)	0,1 mm	Elevée	Simple	élevée	Corrélation de mesures	Oui
	Extensomètres	Locale (mouvement relatif)	<mm	Non maintenable	Simple	moyenne	Corrélation de mesures	Oui
	Fils invariants	Locale (relatif)	<mm	Moyenne	Simple	Elevée	Possible	Oui

Phénomène mesuré	Appareil de mesure	Type de mesure (Locale ou intégratrice)	Précision	Pérennité	Complexité	Fiabilité	Redondance	Epruvé
Mouvement des fissures	Vinchon	Locale (surveillance phénomène localisé)	<mm	Elevée	Simple	élevée	Corrélation de mesures	Oui
Débits d'eau	Mesure volumétrique	Intégratrice	Moyenne	Elevée	Simple	Très Elevée	1 seul point de mesure	Oui
	Déversoir	Intégratrice	Moyenne	Elevée	Simple	Très Elevée	1 seul point de mesure	Oui
	Fibre optique	Intégratrice Détece position et débit	Moyenne	Moyenne (non remplaçable)	Complexe	Moyenne	réalisable	Non
Pression hydraulique	Piézomètre ouvert	Locale	cm	Elevée	Simple	Elevée	Plusieurs points de mesure	Oui
	Piézomètre fermé	Locale	mm	Faible	Simple	Moyenne	Plusieurs points de mesure	Oui
	Piézomètre cellule	Locale	mm	Faible	Simple	Moyenne	Plusieurs points de mesure	Non

Tableau 13: critères généraux pour des technologies d'auscultation particulières

6. CONCLUSION

L'auscultation, et plus largement la surveillance, sont des processus continus qui ont pour objectif d'apprécier l'évolution du risque pendant la vie de l'ouvrage. L'auscultation doit permettre de maintenir un niveau de risque acceptable par la mise en œuvre d'actions appropriées si des dérives sont constatées.

Les principales difficultés dans l'évaluation des systèmes d'auscultation en tant que barrières de sécurité sont :

- **Les objectifs recherchés lors de la conception** du système d'auscultation : l'auscultation n'a pas été spécifiée et conçue comme barrière de sécurité. C'est un système évolutif dans le temps qui a pour but de collecter un nombre important de données pour en faire l'analyse et améliorer la connaissance de l'ouvrage ;
- La difficulté à **justifier le critère minimal d'indépendance** : d'un point de vue probabiliste, les fréquences d'événements initiateurs et les probabilités de fonctionnement du système d'auscultation sont corrélées ;
- **L'évaluation de l'efficacité** du système : on cherche à évaluer l'efficacité d'une organisation à maîtriser le risque. Les moyens à mettre en œuvre et les réponses qui seront apportées à des dérives de comportement ne sont pas connus au moment de l'évaluation. On cherche donc à caractériser à la fois une efficacité de mesures et une maturité de l'organisation.

Sous certaines conditions, des dispositifs d'auscultation court-terme, notamment certains débits de fuites peuvent être considérés comme des barrières de sécurité. Dans ce cas, leurs performances peuvent être évaluées suivant les critères habituellement appliqués aux barrières pour les parties humaines et techniques de ces dispositifs. Ces critères sont définis par les méthodologies Omega 10 et Omega 20. Les analyses et processus de décision étant relativement complexes, on considérera la plupart du temps que ces barrières sont de niveau NC1 au maximum. Cette affirmation ne dispense en rien d'une évaluation complète, spécifique et justifiée d'un tel dispositif en vue d'une utilisation dans une étude de dangers.

Les aspects temporels et les objectifs initiaux de conception d'un dispositif d'auscultation long terme font que leur fiabilité ou niveau de confiance ne sont pas les critères principaux de performance. Les points critiques à analyser sont :

- **l'efficacité de la mesure** : mesure pertinente couvrant l'ensemble du phénomène. Le phénomène de vieillissement doit donc être connu et analysé et les paramètres physiques mesurables correspondant déterminés ;
- **la pérennité de la mesure dans le temps** : qualification, maintenance et étalonnage des appareils, redondance ou recoupement des mesures, traitement de premier niveau, remplacement possible, archivage des données ;
- **l'analyse et le traitement des données** : fréquence, compétence, possibilité d'études approfondies ou de mesures compensatoires.

Dans ces conditions, il semble plus judicieux de considérer **l'auscultation comme un élément d'entrée de l'évaluation des fréquences d'événement initiateurs de type vieillissement ou dégradation**. Cette approche est renforcée par le fait que le retour d'expérience disponible en matière de vieillissement des ouvrages ne dissocie pas l'ouvrage de son auscultation.

Les fréquences d'EI et leur sensibilité à la qualité de l'auscultation sont des points dont l'évaluation n'est évidemment pas aisée en l'absence de données suffisamment précises. **Ces points pourraient être traités par des groupes de travail multipartites et des études approfondies du retour d'expérience disponible.**

La prise en compte de l'auscultation dans la cotation des fréquences d'EI ne peut bien évidemment pas se faire sans une vérification que le système mis en place est adapté à cet usage. Les EI de type vieillissement doivent donc être listés pour chaque ouvrage ou type d'ouvrage si pertinent, l'existence ou non de dispositifs d'auscultation permettant de les surveiller doit être vérifiée, les analyses des résultats d'auscultation doivent faire explicitement référence aux évolutions de ces phénomènes.

Il est également recommandé de fixer des plages d'alerte sur les différentes mesures recueillies, afin de permettre un diagnostic plus fiable. Si aujourd'hui la définition de seuils ne peut être envisagée, le retour d'expérience sur les cas où des mesures compensatoires ont été décidées peut éventuellement permettre de définir des plages où une attention particulière doit être portée à un phénomène.

7. BIBLIOGRAPHIE

7.1 REFERENTIELS D'EVALUATION DES SYSTEMES DE SECURITE

1. Norme CEI 61511
2. Guide DT93
3. Méthode Omega 10
4. Méthode Omega 20

7.2 BULLETINS CIGB

5. B068, Auscultation des barrages et de leurs fondation - La technique actuelle, 124 pages, 1989
6. B087, Amélioration de l'auscultation des barrages – Recommandation et exemples, 332 pages, 1992
7. B093, Vieillessement des barrages et des ouvrages annexes - Synthèse et recommandations, 242 pages, 1994
8. B104, Auscultation des barrages de steriles - Synthèse et recommandations, 89pages, 1996
9. B118, Systèmes d'auscultation automatique des barrages - Recommandations et exemples, 252 pages, 2000
10. B124, Glissement des versants de retenues: Reconnaissances, Etudes, gestion - Recommandation et exemples, 251 pages, 2000
11. B129, Fondations de barrages - Géologie. Méthodes d'investigation. Traitement. Auscultation, 493 pages, 2005
12. B130, Evaluation du risque dans la gestion de sécurité du barrage - Examen des bénéfiques, des méthodes et des dernières applications, 81 pages, 2005
13. B138, La surveillance: Elément de base d'un processus: «sécurité des barrages», 52 pages, 2009
14. B158, Guide de la surveillance des barrages, 102 pages, 2012



INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - **Internet** : <http://www.ineris.fr>