



2022 CIGB ICOLD MARSEILLE
MARSEILLE 2022
27 MAY-3 JUNE

SHORT COURSES
FRIDAY MAY 27 2022

ICOLD
27TH CONGRESS
90TH ANNUAL
MEETING

CIGB
27^{ÈME} CONGRÈS
90^{ÈME} RÉUNION
ANNUELLE

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

CIGB ICOLD
www.cigb-icold2022.fr

Risk analysis of levee systems

Analyse de risque des systèmes d'endiguement

Functional analysis and Failure mode analysis: general principles and INRAE method
Analyse fonctionnelle et Analyse des modes de défaillance : principes généraux et méthode INRAE

INRAE

Bruno Beullac - INRAE



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Photo : Paul Royet

Part 1: Functional analysis of levee systems

Presentation outline:

- Place and objectives in risk analysis
- Analysis granularity
- External functional analysis 
- Internal hydraulic functional analysis
- Internal structural functional analysis
- Safety barriers



CIGB-ICNLD 10th edition 2022: Functional analysis of levee systems
27/05/2022

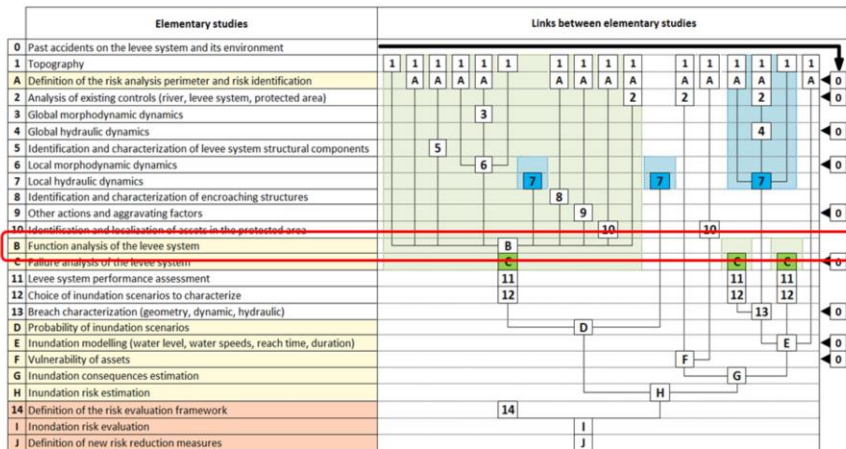


Partie 1 : L'analyse fonctionnelle des systèmes d'endiguement

Plan de la présentation :

- Place et objectifs dans l'analyse de risque
- Les granularités d'analyse
- L'analyse fonctionnelle externe
- L'analyse fonctionnelle interne hydraulique
- L'analyse fonctionnelle interne structurelle
- Les barrières de sécurité

Functional analysis at the heart of risk analysis



INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Functional analysis at the heart of risk analysis

- A requirement of French regulatory levee systems hazard studies
- It formats **levee system data** to structure failure analysis and risk estimation

L'analyse fonctionnelle au cœur de l'analyse de risque

- C'est un attendu du plan réglementaire de l'EdD
- Elle formate les données caractérisant le système endigué pour en structurer l'analyse de la défaillance et l'estimation du risque

Objectives of functional analysis in the risk analysis process

- Identification of all protection system functional relationships:
 - external functional relationships
 - internal functional relationships
- Description of protection system functioning
- Identification of protection system safety functions
- Constitution of a protection system functional model, basis for structured failure analysis and risk estimation



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



Objectives of functional analysis in the risk analysis process

- It aims to identify all the functional relationships that apply to the protection system:
 - external functional relationships (between the system and the elements of the environment in which it is located)
 - internal functional relationships (between the components of the system)
- It therefore details the functioning of the protection system for the different scales of analysis that characterise it
- and identifies the safety functions (safety barriers) which facilitate the correct operation of the system
- ⇒ The functional model thus constituted must make it possible to structure the analysis of the failure of the protection system and to estimate the resulting risk

Objectifs de l'analyse fonctionnelle dans la démarche d'analyse de risque

- Elle vise l'identification de l'ensemble des relations fonctionnelles qui s'appliquent au système de protection :
 - les relations fonctionnelles externes (entre le système et les éléments de l'environnement dans lequel il s'inscrit)
 - les relations fonctionnelles internes (entre les composants du système)
- Elle détaille donc le fonctionnement du système de protection pour les différentes échelles d'analyse qui le caractérisent
- et identifie les fonctions de sécurité (des barrières de sécurité) qui facilitent le bon fonctionnement du système
- ⇒ Le modèle de fonctionnement ainsi constitué doit permettre de structurer l'analyse de la défaillance du système de protection et d'estimer le risque qui en découle

How to conduct the functional analysis?

- Three different granularities for functional analysis of protection systems:
 - **Granularity 1 (external functional analysis):** main functions and constraint functions of the protection system;
 - **Granularité 2 (hydraulic internal functional analysis) :** hydraulic functions of protection subsystems;
 - **Granularité 3 (structural internal functional analysis) :** structural functions of the structural components of the subsystems.



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



How to conduct the functional analysis?

- To be well structured, the functional analysis of protection systems can be conducted at three different granularities (scales of analysis):
 - **Granularity 1 (external functional analysis):** the protection system and the main functions and constraint functions resulting from its interactions with its environment (external water environment, external protected area environment);
 - **Granularity 2 (hydraulic internal functional analysis):** the subsystems of the protection system (levees, weirs, cofferdams, gated structures, flood expansion zones, ...) that make up the protection system and their hydraulic functions;
 - **Granularity 3 (structural internal functional analysis):** the structural components (erosion protection, levee body, filter, drain, recharge, ...) that make up the subsystems and their structural functions.

Comment mener l'analyse fonctionnelle?

- Pour être bien structurée, l'analyse fonctionnelle des systèmes de protection peut être menée à trois granularités (échelles d'analyse) différentes :
 - **Granularité 1 (analyse fonctionnelle externe) :** le système de protection et les fonctions principales et contraintes résultant de ses interactions avec son environnement (milieu extérieur eau, milieu extérieur zone protégée) ;
 - **Granularité 2 (analyse fonctionnelle interne hydraulique) :** les sous-systèmes hydrauliques (digues, déversoirs, batardeaux, ouvrages vannés, zones d'expansion de crues, ...) qui composent le système de protection et leurs fonctions hydrauliques ;
 - **Granularité 3 (analyse fonctionnelle interne structurelle) :** les composants structurels (organe de protection contre l'érosion, corps de digue, filtre, drain, recharge, ...) qui composent les sous-systèmes et leurs fonctions structurelles.

Granularity 1 - External functional analysis

- **Granularity 1 (external functional analysis):** main functions and constraint functions of the protection system;
- **Granularité 2 (hydraulic internal functional analysis) :** hydraulic functions of protection subsystems;
- **Granularité 3 (structural internal functional analysis) :** structural functions of the structural components of the subsystems.



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



Objectives of the external functional analysis

- Describe water external environment characteristics
- Describe protected area characteristics
- Describe other external environments
- Identify interactions between protection system and external environments
- Characterise interactions in terms of main functions and constrained functions



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



Objectives of the external functional analysis

- Description of the characteristics of the water external environment to be protected against
- Description of the characteristics of the external environment protected area
- Description of other external environments (underground environment, State, managers, ...)
- Identification of the interactions between the protection system and its external environments
- Characterisation of these interactions in terms of main functions and constrained functions



Objectifs de l'analyse fonctionnelle externe

- Description des caractéristiques des milieux extérieurs eau contre lesquels on se protège
- Description des caractéristiques du milieu extérieur zone protégée
- Description des autres milieux extérieurs (milieu souterrain, Etat, gestionnaires, ...)
- Identification des interactions entre le système de protection et ses milieux extérieurs
- Caractérisation de ces interactions en termes de fonctions principales et de fonctions contraintes

The main functions of the protection system

- Main functions = the purpose of the protection system
- The main function of flood protection is paramount in the risk analysis of protection systems
- “Flood protection” main function is characterised in terms of level of protection



The main functions of the protection system

- The main functions reflect **the purpose of the protection system** (its vocation)
 - These are generally:
 - to protect the assets of the protected area against flooding
 - control the morphology of the water environment
- The main function of flood protection is paramount in the risk analysis of protection systems
 - an approach to characterise the risk of flooding
- The main function of flood protection must be characterised in terms of level of protection of the protection system

Les fonctions principales du système de protection

- Les fonctions principales traduisent l’**objet de l’action du système de protection** (sa vocation)
 - Ce sont généralement :
 - protéger les enjeux de la ZP contre les inondations
 - maîtriser la morphologie du milieu eau
- La fonction principale de protection contre les inondations est prépondérante dans le cadre de l’analyse de risque des systèmes de protection (et donc de l’EdD)
 - une démarche de caractérisation du risque d’inondation
- La fonction principale de protection doit être caractérisée en termes de niveau de protection du système de protection

The constraint functions of the protection system

- The response of the system to constraints imposed by the external environment
- They enable the main functions to be carried out and ensure the durability of the protection system
- Their identification conditions the rest of the risk analysis



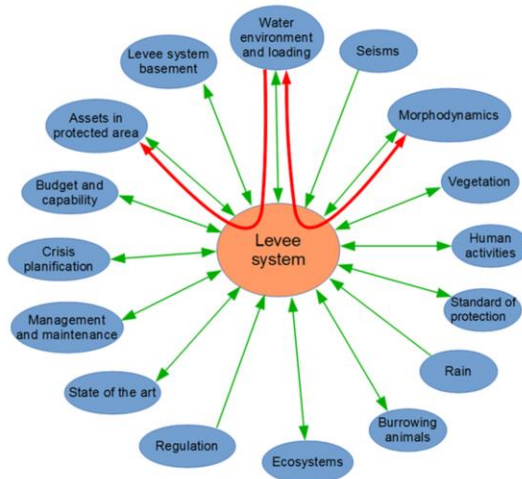
The constraint functions of the protection system

- They respond to the constraints imposed by the external environment: stresses (hydraulic, vegetation, human activities, etc.); assets; maintenance; ...
- Taking them into account allows the main functions to be carried out and guarantees the continuity of the protection system: resist stresses (hydraulic, vegetation, etc.); prevent or limit the entry of water into the protected area; allow the monitoring and maintenance of the structures and banks; ...
- Their identification conditions the rest of the risk analysis: identification of constraints: starting point for reflection on the technical solutions to be implemented to guarantee the effectiveness of the protection system

Les fonctions de contraintes du système de protection

- Elles répondent aux contraintes imposées par les milieux extérieurs : sollicitations (hydrauliques, végétation, activités humaines, ...) ; enjeux ; entretien ; ...
- Leur prise en compte permet la réalisation des fonctions principales et garantit la pérennité du système de protection : résister aux sollicitations (hydrauliques, végétation, ...) ; empêcher ou limiter l'entrée d'eau dans la zone protégée ; permettre la surveillance et l'entretien des ouvrages et des berges ; ...
- Leur identification conditionne la suite de l'analyse de risque : identification des contraintes : point de départ de la réflexion sur les solutions techniques à mettre en œuvre pour garantir l'efficacité du système de protection

The functional diagram highlights the main functions and constraints related to the interactions between the protection system and its external environments



N°	Définition de la fonction
MF 1	To protect assets against flooding from water environment
MF 2	To prevent the watercourse from divagating by restricting its hydraulic and morphodynamic
CF 1	Be adapted to river hydraulic effects
CF 2	To resist earthquakes
CF 3	Integrate the morphological and morphodynamic specificities of the watercourse
CF 4	Integrate the presence and continued development of woody vegetation into its management and design
CF 5	Integrate the presence of human activities on and near the structure in management and design
CF 6	Take into account the protection standards
...	...

The functional diagram highlights the main functions and constraints related to the interactions between the protection system and its external environments

- **Main functions:** they link two elements of the external environment via the system and reflect the functions of the levee system
- **Constrained functions:** they link the system to each of its external elements and reflect the responses to the constraints imposed on it by these elements

Le diagramme fonctionnel permet la mise en évidence des fonctions principales et contraintes liées aux interactions entre le système de protection et ses milieux extérieurs

- Les fonctions principales : elles lient deux éléments des milieux extérieurs via le système et traduisent les vocations du système d'endiguement
- Les fonctions contraintes : elles lient le système à chacun de ses éléments extérieurs et traduisent les réponses aux contraintes que ces éléments lui imposent

Granularity 2 - Hydraulic subsystems and functions

- **Granularity 1 (external functional analysis):** main functions and constraint functions of the protection system;
- **Granularité 2 (hydraulic internal functional analysis) :** hydraulic functions of protection subsystems;
- **Granularité 3 (structural internal functional analysis) :** structural functions of the structural components of the subsystems.



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



Objectives of the hydraulic internal functional analysis of levee subsystems

- Identification and description of hydraulic sub-systems
- Description and characterisation of technical hydraulic functions for each sub-system



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



Objectives of the hydraulic internal functional analysis of levee subsystems

- For the levee system as a whole: identify and describe the hydraulic sub-systems of which it is composed (in terms of their hydraulic roles)
- For each subsystem: describe and characterise the hydraulic roles in terms of technical hydraulic functions from the point of view of the hydraulic functioning of the levee system

Objectifs de l'analyse fonctionnelle interne hydraulique des sous-systèmes de digues

- Pour l'ensemble du système endigué : identifier et décrire les sous-systèmes hydrauliques qui le composent (du point de vue de leurs rôles hydrauliques)
- Pour chaque sous-système : décrire et caractériser les rôles hydrauliques en termes de fonctions techniques hydrauliques du point de vue du fonctionnement hydraulique du système endigué

Identification and description of the hydraulic subsystems that make up the levee system (1/2)

Subsystems can be of different types:

- Linear :
 - levee;
 - overflow-resistant levee;
 - spillway;
 - cofferdam; 
 - ...
- Punctual :
 - drainage works;
 - transparency works;
 - ...
- Surface structures:
 - storage area;
 - flow zone;
 - ...



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



Identification and description of the hydraulic subsystems that make up the levee system (1/2) The subsystems can be discretised on the basis of their geometric and technical characteristics. They can be of different types:

- Linear: levee; overflow resistant levee; spillway with or without fuse; cofferdam; ...
- Punctual: drainage structures; transparency structures; etc.
- Surface structures: storage area; flow area; ...

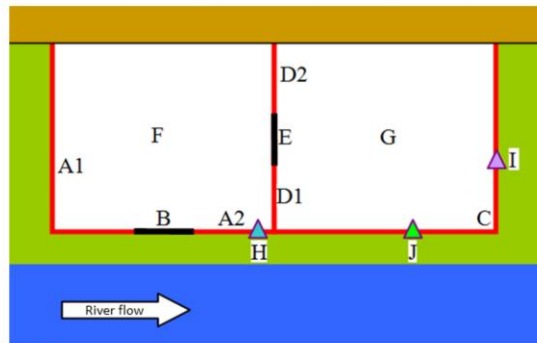
Identification et description des sous-systèmes hydrauliques qui composent le système endigué (1/2) Les sous-systèmes peuvent être discrétisés sur la base de leurs caractéristiques géométriques et techniques.

Ils peuvent être de différents types :

- Linéaires : digue ; digue résistante à la surverse ; déversoir ; batardeau ; ...
- Ponctuels : ouvrages de vidange et de ressuyage ; ouvrages de transparence ; ...
- Surfaiques : casier ; zone d'écoulement ; ...

Identification and description of the hydraulic subsystems that make up the levee system (2/2)

Example of decomposition of a protection system into sub-systems :



Sub-system	Sous-système
A Levee	Digue
B Spillway	Déversoir
C Levee	Digue
D Levee	Digue
E Spillway	Déversoir
F Non urbanized area	Casier non urbanisé
G Urbanized area	Casier urbanisé
H Flap gate	Organe de vidange (clapet)
I Gate	Organe de vidange (vanne)
J Pump	Pompe

INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Identification and description of the hydraulic subsystems that make up the **damm**ed system (2/2)

As shown in this example of decomposition of a protection system, the first step in the analysis is to identify the different subsystems that make up the protection system

Identification et description des sous-systèmes hydrauliques qui composent le système endigué (2/2)

Comme le montre cet exemple de décomposition d'un système de protection, la première étape de l'analyse est d'identifier les différents sous-systèmes composant le système de protection

Identification and characterisation of subsystem functions (1/2)

Example of generic hydraulic functions applicable to subsystems

N°	Technical hydraulic function	Characterisation of the function	Type of subsystem
1	Prevent water from entering the protected area or part(s) of the protected area, up to the crest	- Water level corresponding to the crest - Lowest point of the crest	Linear
2	Control the spillage in the area behind the subsystem from the sill	- Water level corresponding to the spillway control weir - Lowest weir elevation - Flow law - Flow direction	Linear
3	Temporarily prevent water from entering the area behind the subsystem, up to the top of the temporary protection	- Water level corresponding to the top of the temporary protection - Low water level of the protection - Water level at the time of installation	Linear
4	Allow gravity flow of water through a linear sub-system	- Water level corresponding to the flow level - Maximum flow rate	Punctual
5	Control a water transfer (level, direction and/or rate of flow), from one side of a sub-system to the other	- Maximum flow rate - Operating instructions (direction and flow rate according to water levels)	Punctual
6	Storing flood water	- Maximum volume - Fill level - Hydraulic modelling - Storage law	Surface
7	Allow gravity flow of flood water	- Hydraulic modelling - Inlet location - Outlet location - Flow law	Surface

INRAE

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

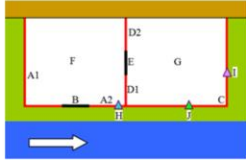
Identification and characterisation of subsystem functions (1/2)

Different types of generic hydraulic functions applicable to protection subsystems have been identified

Identification et caractérisation des fonctions des sous-systèmes (1/2)

Différents types de fonctions hydrauliques génériques applicables aux sous-systèmes de protection ont été identifiées

Identification and characterisation of subsystem functions (2/2)



INRAE

N°	Sub-system	Hydraulic functions	Characterisation of functions
A	Levee	1. Prevent water from entering Zone F, up to the crest	- water level corresponding to the crest
B	Spillway	1. Prevent water from entering Zone F, up to the crest	- water level corresponding to the crest
		2. Control the spill in Zone F from the weir	- water level corresponding to the weir of the controlled discharge - Weir rating - Flow law: defined by a weir law - Flow direction: river $\Rightarrow$ F
C	Levee	1. Prevent water from entering Area G, up to the crest	- water level corresponding to the crest
D	Levee	1. Prevent water from entering from the F to the G, or from the G to the F, up to the crest	- water level corresponding to the crest - Crest elevation
E	Spillway	1. Prevent water from entering from the F to the G, or from the G to the F, up to the crest	- water level corresponding to the crest
		2. Check the spill in area G from the weir (overflow resistance)	- water level corresponding to the control threshold of the controlled discharge - weir rating - Flow law: defined by a weir law - Flow direction: F $\Rightarrow$ G
F	Non urbanized area	7. Store flood water	- Maximum volume - Fill level - Hydraulic modelling - Storage law
G	Urbanized area	7. Store flood water	- Maximum volume - Fill level - Hydraulic modelling - Storage law
H	Flap gate	6. Control a transfer of water (flow rate), from one side to the other of A	- maximum flow (m ³ /s) - control of transfer direction (F $\Rightarrow$ river) - transfer start level
I	Gate	6. Controlling a transfer of water (flow rate), from one side of C	- transfer rate control: maximum flow rate (m ³ /s) - transfer start level
J	Pump	6. Controlling a transfer of water (flow rate), from one side of C	- control of transfer direction (G $\Rightarrow$ river) - control of transfer flow: maximum flow (m ³ /s) - transfer start level

Result of the hydraulic functional analysis of the subsystems of an example protection system

Résultat de l'analyse fonctionnelle hydraulique des sous-systèmes d'un exemple de système de protection

Granularity 3 - Levee components and structural functions

- **Granularity 1 (external functional analysis):** main functions and constraint functions of the protection system;
- **Granularité 2 (hydraulic internal functional analysis) :** hydraulic functions of protection subsystems;
- **Granularité 3 (structural internal functional analysis) :** structural functions of the structural components of the subsystems.



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



Objectives of the structural internal functional analysis of levee components

- ⇒ For the different subsystems of the protection system: identification and description of homogeneous cross-sections
- ⇒ For each type of homogeneous cross-section: identify and characterise technical structural functions of each component



Objectives of the structural internal functional analysis of levee components

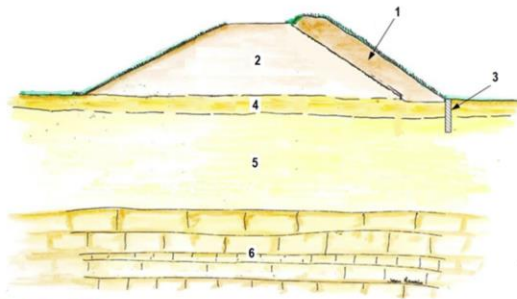
- ⇒ For the different subsystems of the protection system: identify and describe the different homogeneous cross-sections in terms of the nature and location of their structural components
- ⇒ For each type of structurally homogeneous cross-section: identify and characterise the technical structural functions performed by the components

Objectifs de l'analyse fonctionnelle interne structurelle des composants de digues

- ⇒ Pour les différents sous-systèmes du système de protection : identifier et décrire les différents tronçons homogènes du point de vue de la nature et de la disposition de leurs composants structurels
- ⇒ Pour chaque type de tronçon structurellement homogène : identifier et caractériser les fonctions techniques structurelles remplies par les composants

Realisation of the internal functional and structural analysis of levee components (1/2)

Identification of the structural components of levees:



	Levee component
1	Waterside levee slope reinforcement
2	Levee body (ancient structure)
3	Waterside levee toe protection
4	Clay-silt foundation
5	Sand-silt foundation
6	Limestone substratum

INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Identification of the structural components of levees:

=> A homogeneous section is defined by the nature and position of the components within its cross-section: impermeability, levee body, filtering element, drainage element, foundation, protection, etc.

Identification des composants structurels de digues :

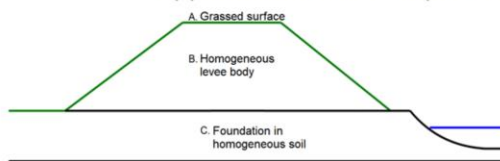
=> Un tronçon homogène est défini par la nature et la position des composants au sein de sa section en travers : étanchéité, corps de digue, organe de filtration, organe de drainage, fondation, protection, ...

Realisation of the internal functional and structural analysis of levee components (2/2)

• Generic structural functions

N°	Functions	Description
1	Stability	Conditions the mechanical stability of the section
2	Impermeability	Limits the flow of water
3	Drainage	Captures the internal flows of the section and evacuates them
4	Filtration	Prevents particle migration at the interface of granular components
5	Auto-filtration	Prevents the migration of particles within a granular component
6	Protection	Resistance to external erosion (water, other agents)

• Application to an example of a levee cross-section



N°	Composants	Contacts	Fonctions
A	Grassed surface	B ; environnement	6. Protection
B	Homogeneous levee body	A ; C	1. Stability 2. Impermeability 5. Auto-filtration
C	Foundation in homogeneous soil	B ; environnement	1. Stability 2. Impermeability 5. Auto-filtration

INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Réalisation de l'analyse fonctionnelle interne structurelle des composants de digues (2/2)

- Les fonctions structurelles génériques
- Application à un exemple de tronçon de digue

Safety barriers

- Safety barriers provide **safety functions** to improve levee system safety and promote its proper functioning: they **prevent** or **relay** function failures
- Safety barriers can be identified and characterised during the functional analysis



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



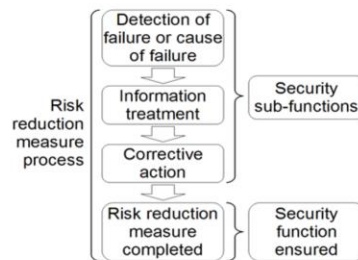
Safety barriers

- The purpose of safety barriers is to provide safety functions to improve the safety of the system and to promote its proper functioning:
 - they prevent or relay function failures
 - but do not participate directly in the normal operation of the system
- They can be identified and characterised during the functional analysis:
 - for each component/element of the system
 - and for each associated technical function

Les barrières de sécurité

- Les barrières de sécurité ont pour objectif d'assurer des fonctions de sécurité pour améliorer la sécurité du système et favoriser son bon fonctionnement :
 - elles préviennent ou relaient les défaillances de fonctions
 - mais ne participent pas directement au fonctionnement normal du système
- Elles peuvent être identifiées et caractérisées lors de l'analyse fonctionnelle :
 - pour chaque composant/élément du système
 - et pour chaque fonction technique associée

- Safety barriers must be **independent** of the failures to which they apply
- Their performance is assessed in terms of :
 - Effectiveness
 - response time
 - confidence level
- Security functions are divided into sub-functions:



INRAE

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Safety barriers must verify **independence** from the failures to which they apply

Their performance is assessed in terms of :

- **effectiveness**: ability to fulfil the safety function,
- **response time**: between triggering and the desired effectiveness,
- **confidence level**: probability of failure of the barrier.

Their safety functions are composed of sub-functions:

Les barrières de sécurité doivent vérifier une **indépendance** vis-à-vis des défaillances auxquelles elles s'appliquent

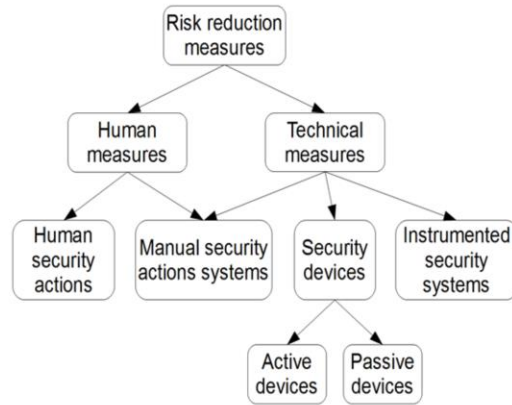
Leur performance est évaluée en termes :

- **d'efficacité** : aptitude à remplir la fonction de sécurité,
- **de temps de réponse** : entre déclenchement et efficacité recherchée,
- **de niveau de confiance** : probabilité de défaillance de la barrière.

Leurs fonctions de sécurité se décomposent en sous-fonctions : détection, traitement/analyse, action.

Safety barriers can be:

- autonomous technical devices (technical barriers),
- purely organisational measures (human barriers),
- or, more generally, combinations of both (mixed barriers).



Safety barriers can be:

autonomous technical devices (technical barriers),

purely organisational measures (human barriers),

or, more generally, combinations of both (mixed barriers).

=> For protection systems, safety barriers are mainly **monitoring planning, maintenance and repair**, in and out of crisis

Les barrières de sécurité peuvent correspondre :

- à des dispositifs techniques autonomes (barrières techniques),
- à des mesures purement organisationnelles (barrières humaines),
- ou plus généralement à des combinaisons des deux (barrières mixtes).

=> Pour les systèmes de protection, les barrières correspondent principalement à la **planification de la surveillance, l'entretien et la réparation**, en crise et hors crise

Part 2: Failure mode analysis of levee systems

Presentation outline:

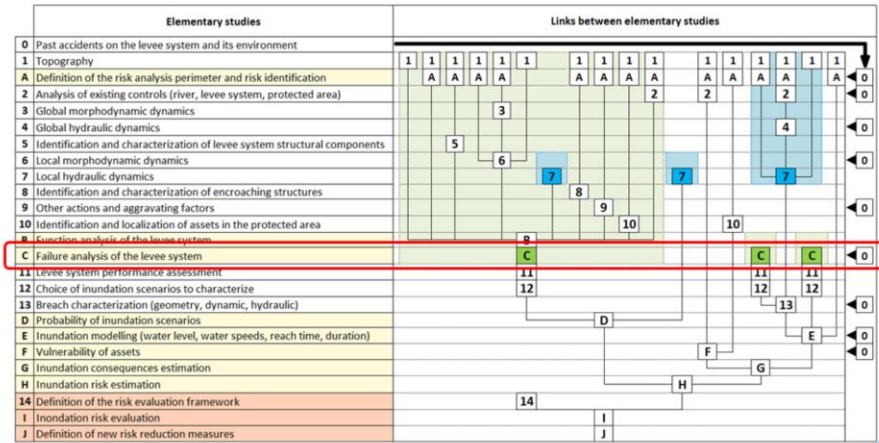
- Objectives of failure analysis
- Definition of the concept of failure
- Hydraulic failure analysis
- Structural failure analysis
- Graphical representation of failure scenarios
- Integration of safety barriers
- Synthesis of the approach



CIGB-ICNLD 10th 2022: Failure analysis of levee systems
27/05/2022



Objectif de l'analyse de la défaillance



INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Objective of the failure analysis

- The failure analysis of the protection system is based on the conclusions of the functional analysis
- Its purpose is to :
 - to facilitate the definition of the failure scenarios of the protection system
 - to facilitate the definition of the failure scenarios of the protection system for its diagnosis and performance evaluation

Objectif de l'analyse de la défaillance

- L'analyse de la défaillance du système de protection repose sur les conclusions de l'analyse fonctionnelle
- Elle a pour objectif :
 - de faciliter la définition des scénarios de défaillance du système de protection
 - pour la réalisation de son diagnostic et de l'évaluation de sa performance

Définition de la notion de défaillance

- Failure: inability to reach a performance threshold for a given function.
- It can concern:
 - the protection system (granularity 1),
 - its sub-systems (granularity 2) 
 - or the structural components of the latter (granularity 3).



CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022



Definition of failure

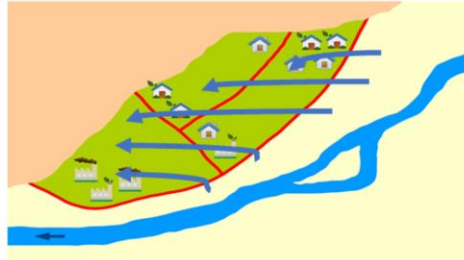
- Failure is defined as the inability to reach a performance threshold for a given function.
- It can concern :
 - the protection system and its flood protection function (granularity 1),
 - its sub-systems (section of levee, weir, ...) and their hydraulic functions (granularity 2),
 - or the structural components of the latter (levee body, drain, filter, waterproof screen, protection, ...) and their structural functions (granularity 3).

Définition de la notion de défaillance

- La défaillance se définit comme l'incapacité d'atteindre un seuil de performance relatif à une fonction donnée.
- Elle peut concerner :
 - **le système de protection** et sa fonction de protection contre les inondations (granularité 1),
 - **ses sous-systèmes** (tronçon de digue, déversoir, ...) et leurs fonctions hydrauliques (granularité 2),
 - ou **les composants structurels** de ces derniers (corps de digue, drain, filtre, écran étanche, protection, ...) et leurs fonctions structurelles (granularité 3).

Analysis of the hydraulic failure of the protection system

- Generally conducted in an expert manner:



- More structured and exhaustive methods (FMEA type) for complex systems:
⇒ scenarios = sequences of **failure modes** built by **cause and effect** relationships.

INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Analysis of the hydraulic failure of the protection system

- It is generally carried out in an expert way: expert identification of possible flood scenarios
- More **structured and exhaustive** methods such as **FMEA** (Failure Mode and Effects Analysis) can be interesting for complex systems:
 - Identification of **failure modes**, their **causes** and **effects** and construction of scenarios by **cause and effect relationships**.

L'analyse de la défaillance hydraulique du système de protection

- Elle est généralement menée de manière experte : identification experte des scénarios d'inondation envisageables
- Les méthodes plus **structurées et exhaustives type AMDE** (analyse des modes de défaillance et de leur effets) peuvent être intéressantes pour les systèmes complexes :
 - Identification **des modes de défaillance**, de leurs **causes** et de leurs **effets** et construction des scénarios par **relations de causes à effets**.

The hydraulic FMEA method: a systematic approach to the comprehensive identification of flood scenarios

- A failure mode for each technical hydraulic function identified in the functional analysis

N°	Technical hydraulic function	Characterisation of the function	Failure mode
1	Prevent water from entering the protected area or part(s) of the protected area, up to the crest	- Water level corresponding to the crest - Lowest point of the crest	Water entering and/or spreading of runoff possible before the objective water level
2	Control the spillage in the area behind the subsystem from the sill	- Water level corresponding to the spillway control weir - Lowest weir elevation - Flow law - Flow direction	Possible discharge before the target water level and/or with a flow higher than expected Discharge possible but from a level higher than the objective water level and/or with a flow rate lower than the expected conditions
3	Temporarily prevent water from entering the area behind the subsystem, up to the top of the temporary protection	- Water level corresponding to the top of the temporary protection - Low water level of the protection - Water level at the time of installation	Water entry possible before the target water level
4	Allow gravity flow of water through a linear sub-system	- Water level corresponding to the flow level - Maximum flow rate	Water transfer not possible or with a lower flow rate than expected Unplanned water transfer possible
5	Control a water transfer (level, direction and/or rate of flow), from one side of a sub-system to the other	- Maximum flow rate - Operating Instructions (direction and flow rate according to water levels)	Storage of the planned volume is not possible
6	Storing flood water	- Maximum volume - Fill level - Hydraulic modelling - Storage law	Gravity flow not possible or lower than expected
7	Allow gravity flow of flood water	- Hydraulic modelling - Inlet location - Outlet location - Flow law	Higher than expected flow rate

La méthode d'AMDE hydraulique : une démarche systématique pour l'identification exhaustive des scénarios d'inondation

- Un mode de défaillance pour chaque fonction technique hydraulique identifiée lors de l'analyse fonctionnelle

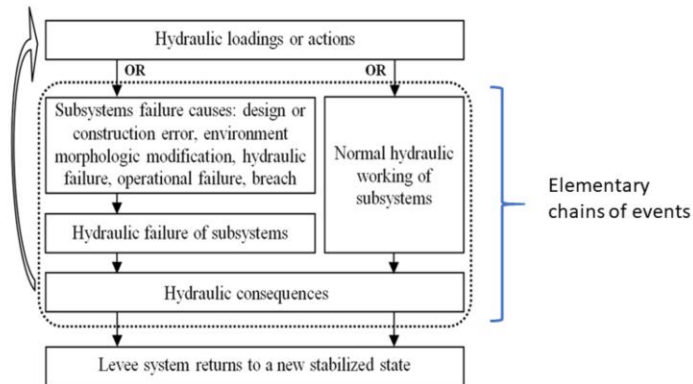
The FMEA table: it identifies and lists the relationships between the **causes of function failures** and the **effects of function failures**, through the hydraulic contacts

N°	Sub-systems	hydraulic contacts	Hydraulic functions	Failure causes	Failure modes	Failure effects
A	Levee	River; F	1. Prevent water from entering Zone F, up to the crest	- Design: crest level below Q150 - Structural failure: lowering of crest level below Q150 / breach - Environment: relative lowering of crest level below Q150	Water entry possible before Q150	Water enters F, before Q150
B	Spillway	River; F	1. Prevent water from entering Zone F, up to the crest 2. Control the spill in Zone F from the weir	- Design: crest level below Q100 - Structural failure: lowering of crest level below Q100 / breach - Environment: relative lowering of crest level below Q100 - Design: spillway control threshold level below Q100 - Structural failure: lowering of the spillway control threshold level below Q100 - Environment: relative lowering of the spillway control threshold level below Q100 - Design: spillway control weir level above Q100 - Operational: obstruction of the spillway weir - Environmental: relative rise in spillway weir level above Q100	Water inflow possible before Q100 Discharge possible before Q100 and/or with a flow rate higher than expected Discharge possible but from a level higher than Q100 and/or with a flow rate lower than the expected conditions	Water enters F, before Q100 Water enters F earlier or in greater quantities than expected The water level rises more than expected in the watercourse at A2, B and C
...	...	...	...	...	...	...

Sub-system
A Levee
B Spillway
C Levee
D Levee
E Spillway
F Non urbanized area
G Urbanized area
H Flap gate
I Gate
J Pump

Le tableau d'AMDE : il permet d'identifier et de lister les relations de causes de défaillances de fonctions à effets de défaillances de fonctions, au travers des contacts hydrauliques

Hydraulic failure scenarios (floods in the protected area) are built on the basis of the information in the FMEA table



INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Les scénarios de défaillances hydrauliques (d'inondations) sont construits sur la base des informations du tableau d'AMDE

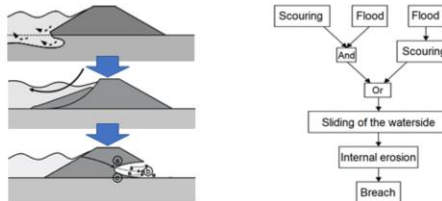
Structural failure analysis of the protection system

- Different possible methods for the analysis of the structural failure of each structurally homogeneous cross-section:

- Application of classical failure modes



- Expert determination of failure scenarios



- Structured and exhaustive Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Structural failure analysis of the protection system

- Different possible methods for the analysis of the structural failure of each structurally homogeneous cross-section:
 - Application of classical failure modes: failure only considered from the point of view of the realisation of its initiating phenomenon (overflow, external erosion, internal erosion, sliding)
 - Expert determination of scenarios, meaning the sequence of possible component deterioration mechanisms
 - **Structured and exhaustive FMEA** (Failure Mode and Effects Analysis) analysis, which allows a more structured and exhaustive identification of structural failure scenarios

L'analyse de la défaillance structurelle du système de protection

- Différentes méthodes possibles pour l'analyse de la défaillance structurelle de chaque tronçon structurellement homogène :
 - Application des modes de rupture classiques : rupture uniquement considérée du point de vue de la réalisation de son phénomène initiateur (surverse, érosion externe, érosion interne, glissement)
 - Détermination experte des scénarios, c'est à dire des enchainements de mécanismes de détériorations de composants envisageables
 - L'analyse **structurée et exhaustive de type AMDE** (analyse des modes de défaillance et de leur effets), qui permet une identification plus structurée et exhaustive des scénarios de défaillances structurelles

The structural FMEA method: a systematic approach that allows the exhaustive identification of breach scenarios:

- Identification of degraded or faulty modes for each technical structural function identified during the functional analysis

N°	Functions	Degradation of the function	Failure of the function
1	Stability		Loss of stability
2	Impermeability	Permeability above the degradation threshold	Permeability above the failure threshold
3	Drainage	Drainage rate below the degradation threshold	Drainage rate below failure threshold
4	Filtration		Possible migration of particles from one component to another
5	Auto-filtration		Possible migration of particles within a component
6	Protection	Weakened protection	No more protection

INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

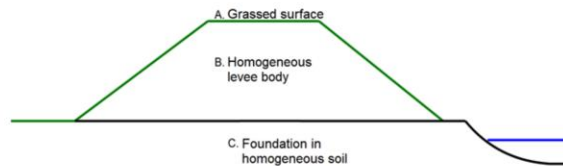
Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

La méthode d'AMDE structurelle : une démarche systématique qui permet l'identification exhaustive des scénarios de brèche :

- Identification des modes dégradé ou défaillant pour chaque fonction technique structurelle identifiée lors de l'analyse fonctionnelle

The FMEA table: this identifies and lists the relationships between the causes of function failures and the effects of function failures, through the contacts between components

N°	Components	Possibles mechanisms	Causes of degradations or failure of functions		Functions	Degradations or failure of functions		Consequences of degradation or failure of functions (resulting mechanisms)
			Deterioration	Ruin		State	Caracterisation	
A	Grassed surface	- Overflowing erosion	- Partial disappearance (A6a)	- Total disappearance (A6b)	6. Protection	a) Degraded	- Deteriorated protection	- External erosion of A - Overflowing erosion of A
		- External erosion	- Partial disappearance (A6a)	- Total disappearance (A6b)		b) Failed	- No more protection	- External erosion of B - Overflowing erosion of B
...	...	...	...	...	...	...	...	...



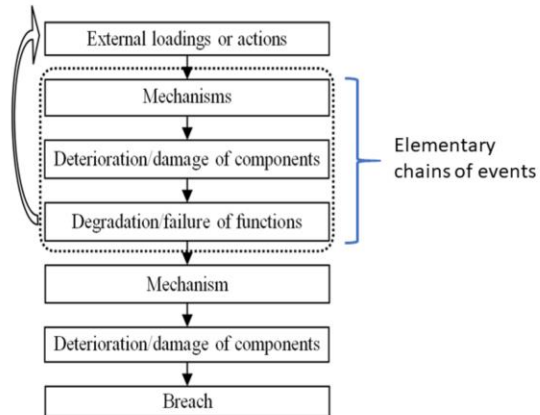
INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Le tableau d'AMDE : il permet d'identifier et de lister les relations de causes de défaillances de fonctions à effets de défaillances de fonctions, au travers des contacts entre composants

The structural failure (breach) scenarios are constructed on the basis of the information in the structural FMEA table



INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

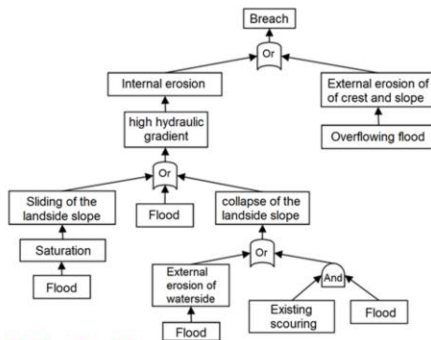
Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

Les scénarios de défaillances structurelles (de brèches) sont construits sur la base des informations du tableau d'AMDE structurelle

The graphic representation of failure scenarios

⇒ It facilitates the reading of scenarios and the calculation of their probabilities

■ Cause tree method:



■ Event tree method :

Initial event Flood above levee crest Overflowing erosion	Composant 1 Grassed surface Protection function efficient?	Composant 2 Earth-fill Resistance to erosion function efficient?	Consequences
	Yes	Yes	No consequence
		No	Not possible
	Yes	Yes	Deterioration of the levee (outside protection)
	No	No	Breach

INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

The graphic representation of failure scenarios

⇒ It facilitates the reading of scenarios and the calculation of their probabilities

• Cause tree method :

A deductive method, where the tree is built from the final failure to the original causes.

It is generally used in the context of the application of expert failure analysis methods, but can also follow an FMEA

• Event tree method:

An inductive method for modelling all possible scenarios resulting from an initial adverse event and leading to different possible final events

It is most suitable for representing the results of the application of an FMEA method

La représentation graphique des scénarios

⇒ Elle facilite la lecture des scénarios et le calcul de leurs probabilités

■ Méthode de l'arbre de causes :

Méthode déductive, où l'arbre est construit de la défaillance finale vers les causes originales.

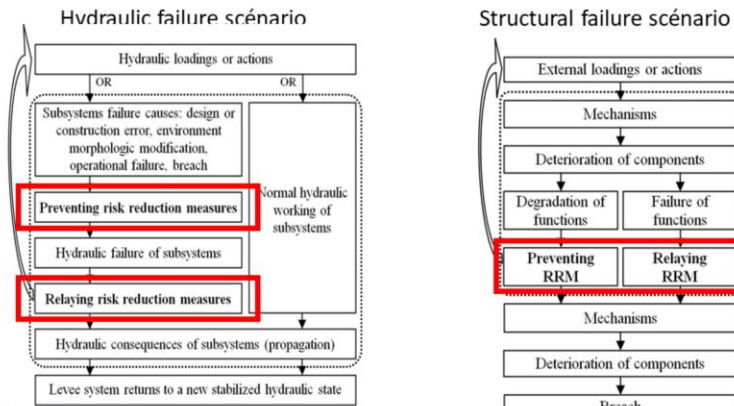
Elle est généralement utilisée dans le cadre de l'application de méthodes expertes d'analyse de la défaillance, mais peut également faire suite à une AMDE

■ Méthode de l'arbre d'événements :

Méthode inductive permettant de modéliser tous les scénarios possibles résultant d'un événement indésirable initial et conduisant à différents événements finaux possibles

Elle est la plus adaptée pour représenter les résultats de l'application d'une méthode d'AMDE

L'intégration des barrières de sécurité aux scénarios de défaillance



INRAE

CIGB-ICOLD Marseille 2022 - Risk analysis of levee systems -
27/05/2022

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

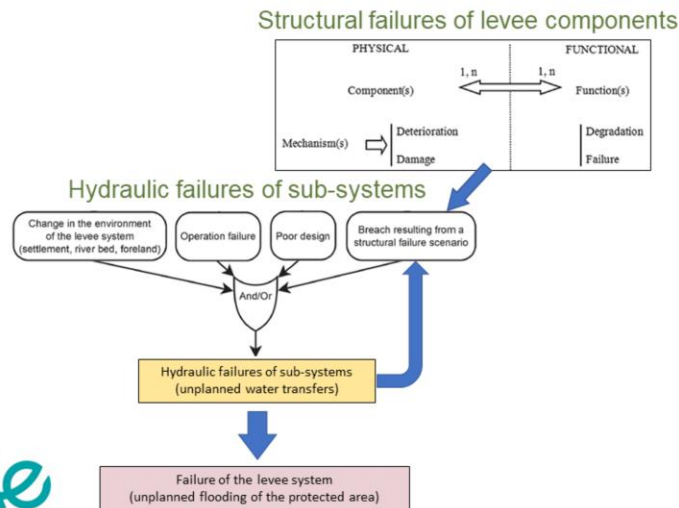
Integration of safety barriers

- Safety barriers (and their safety functions) can be integrated into the failure scenarios:
 - Integration of existing barriers at the beginning of the risk analysis
 - Integration of added barriers as risk reduction measures, after the risk analysis

L'intégration des barrières de sécurité

- Les barrières de sécurité (et leurs fonctions de sécurité) peuvent être intégrées aux scénarios de défaillance :
 - Intégration des barrières existantes au début de l'analyse de risque
 - Intégration des barrières ajoutées comme mesures de réduction du risque, à l'issue de l'analyse de risque

Synthesis of the approach



INRAE

Cfbr
comité français
des barrages
et réservoirs

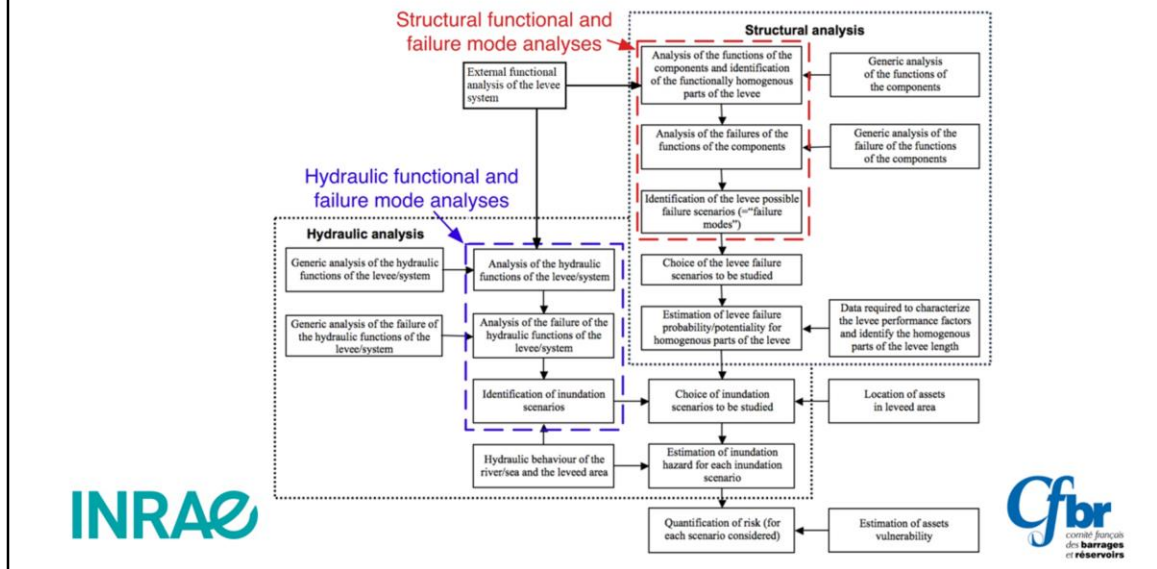
Two complementary axes of failure analysis:

- Structural failures of the components of levee cross-sections (resulting from actions on the structures):
 - Analysis of structural failure: identification of possible chains of deterioration mechanisms and therefore of structural function failures
 - Definition of possible breach scenarios
- Hydraulic failures of the sub-systems composing the protection system:
 - Analysis of the hydraulic failure: identification of the possible chains of causes and consequences of hydraulic failures
 - Definition of possible flooding scenarios in the protected area

Deux axes complémentaires d'analyse de la défaillance :

- Des défaillances structurelles des composants des section en travers de digues (résultant des actions sur les ouvrages) :
 - Analyse de la défaillance structurelle : identification des enchainements possibles de mécanismes de détérioration et donc de défaillances de fonctions structurelles
 - Définition des scénarios de brèches envisageables
- Des défaillances hydrauliques des sous-systèmes composant le système de protection :
 - Analyse de la défaillance hydraulique : identification des enchainements possibles de causes et de conséquences de défaillances hydrauliques
 - Définition des scénarios d'inondations envisageables dans la zone protégée

Synthesis of the approach



Synthesis of the approach

In the failure analysis approach presented, the functional analysis and the FMEA constitute two steps to be carried out successively in order to define all the failure scenarios of the flood protection system. The functional analysis of the system defines the framework within which the failure of the system will then be analysed, by applying the FMEA method.

In order to ensure the quality of the analysis, these two steps should be carried out in a coherent manner.

In order to integrate the two aspects, hydraulic and structural, of the failure, the method presented is integrated into a risk analysis approach, the different stages of which are shown in the diagram.

In this approach, the result of the structural analysis feeds the hydraulic analysis to arrive at the estimation of the flood risk.

Synthèse de la démarche

- Dans la démarche d'analyse de la défaillance présentée, l'analyse fonctionnelle et l'AMDE constituent deux étapes à conduire successivement pour aboutir à la définition de l'ensemble des scénarios de défaillance du système de protection contre les inondations.
- L'analyse fonctionnelle du système permet de définir le cadre dans lequel sera ensuite analysée la défaillance du système, par l'application de la méthode AMDE.
- Pour garantir la qualité de l'analyse, ces deux étapes doivent être menées en totale cohérence.
- Afin d'intégrer les deux aspects, hydraulique et structurel, de la défaillance, la méthode présentée s'intègre dans une démarche d'analyse de risque dont le diagramme expose les différentes étapes.
- Dans cette démarche, le résultat de l'analyse structurelle alimente l'analyse hydraulique pour aboutir à l'estimation du risque d'inondation.