

---

# Impact des réseaux techniques sur la performance d'une digue – Analyse système et Modèle fonctionnel

**Laetitia Ferrer, Corinne Curt, Laurent Peyras, Rémy Tourment**

*Irstea, UR Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie – 3275, route de Cézanne – CS 40061– 13182 AIX EN PROVENCE CEDEX 5*

*{laetitia.ferrer ; corinne.curt ; laurent.peyras ; rémy.tourment}@irstea.fr*

---

*RÉSUMÉ. Les réseaux techniques présents sur une digue (canalisations d'eau ou de gaz, câbles électriques...) peuvent, s'ils sont défaillants, perturber fortement son fonctionnement. Nos travaux visent la prise en compte de ces réseaux dans l'évaluation de la performance des digues. La méthodologie développée propose : la réalisation d'une analyse système d'un cas de digue répondant à notre problématique ; une extension des résultats à un système endigué urbain ; l'élaboration d'un modèle fonctionnel pour les digues urbaines incluant des réseaux ; et la caractérisation de ces réseaux afin d'améliorer les modèles d'évaluation de la performance des digues existants. L'extension des résultats de l'analyse système a été menée en utilisant les méthodes de sûreté de fonctionnement (Analyse Fonctionnelle, Analyse des Modes des Défaillances et de leurs Effets, Nœud Papillon). Le modèle fonctionnel est constitué à partir des nœuds papillons dans lesquels sont injectés les scénarios de dégradation. La caractérisation des réseaux est réalisée par la proposition d'indicateurs pour deux grands types de réseaux. Ces méthodologies et résultats sont réalisés dans le but de fournir aux experts et gestionnaires de digues des démarches et outils pertinents pouvant faciliter leur prise de décision.*

*ABSTRACT. Utility networks present in dikes (water or gas pipelines, power or telecom cables, roads...) can highly disturb their working. Our works are aimed to take in consideration those networks to evaluate the performance of levees. The method developed consists in: realization of a system analysis for a case study related to our problematic ; generalization of results to an urban levee system ; elaboration of a functional model for urban levees including networks ; and characterization of networks in order to improve current performance evaluation models. The generalization of system analysis results led to the use of dependability (Functional Analysis, Failures Modes and Effects Analysis, and Bowtie methods). Functional model is made from the bowties in which are integrated degradation scenarios. Characterization of networks is realized by the proposal of indicators for two major types of networks. Those methods and results are realized in order to provide relevant approaches and tools for experts and managers of dikes in order to facilitate decision making.*

*MOTS-CLÉS : Réseaux, Dignes, Analyse de risque, Performance*

*KEY WORDS: Networks, Dikes, Risk analysis, Performance*

---

## 1. Introduction

Les digues sont des ouvrages de protection contre les inondations mais leur défaillance au cours d'un événement (crue, tempête, ...) est susceptible d'engendrer des pertes humaines et économiques majeures. Dans ce cadre, la réglementation française a été renforcée depuis un peu moins de 10 ans ([MED 07] ; [MED 08],...) et impose dorénavant aux gestionnaires de digues l'évaluation régulière de la performance de leurs ouvrages au moyen de diagnostics réguliers, d'examen visuels périodiques et d'études de dangers. De par leur caractère à grand linéaire - la France compte ainsi aujourd'hui près de 10 000 km de digues fluviales et maritimes [TOU 07] - la complexité de leurs modes de rupture [TOU 13], et la grande variété de données nécessaires à leur diagnostic, les digues induisent des problématiques de diagnostic et de décision particulières, nécessitant l'intervention d'un ingénieur expert [FLO 13]. Dans ce contexte, il est pertinent de développer des méthodes et outils d'aide à la décision notamment pour l'évaluation de la performance des ouvrages.

Des travaux ont été réalisés sur l'évaluation de la performance des digues ces dernières années ([LIN 00] ; [SER 05] ; [VUI 12]). Ceux-ci prennent en compte de manière très détaillée les caractéristiques propres de la digue c'est-à-dire celles qui relèvent de sa conception, de sa réalisation et du vieillissement de ses matériaux et composants. Or, des éléments extrinsèques peuvent influencer négativement sur la performance de ces ouvrages. C'est le cas de la végétation arborée qui peut entraîner une susceptibilité accrue au phénomène d'érosion interne [BAM 14]. C'est également le cas des réseaux techniques présents sur une digue (canalisations d'eau ou de gaz, câble électrique, route...) qui peuvent fortement la perturber. Par exemple, la rupture d'une canalisation d'eau contenue dans la digue va conduire à une perte de fluide mais peut aussi mener à des pertes de matériau de la digue par entraînement des particules. Le vide ainsi créé peut engendrer un tassement différentiel de la digue ou directement une brèche et entraîner sa défaillance. Ces éléments extrinsèques n'étaient que peu considérés dans les modèles de Serre et Vuillet. Il est donc crucial de proposer des méthodes de prise en compte de ces réseaux lorsqu'on l'évalue la performance d'un système de digues. L'objectif ici est de produire une analyse système et un modèle fonctionnel pour les digues urbaines incluant des réseaux puis de fournir une liste de variables caractérisant les réseaux techniques, afin d'affiner les modèles existants d'évaluation de la performance des digues. Les travaux présentés sont issus du projet INCERTU financé par le programme RDT du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et de l'Energie. Il implique trois partenaires : l'EIVP, le LEESU et Irstea (UR Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie). Pour ce qui est des digues, l'AD-IDR (Association départementale Isère Drac Romanche) est associée comme territoire d'expérimentations.

## 2. Démarche

La démarche que nous avons développée comporte quatre étapes:

(i) analyse systémique d'un cas de digue répondant bien à la problématique du projet : digue urbaine, forts enjeux en zone protégée, réseaux enfouis et voirie en crête de digue. L'étude de cas a été réalisée sur la base d'une étude de danger récente. On produit une analyse système du cas d'étude et une synthèse de l'étude de dangers mettant en avant ses points forts et ses limites pour lesquels des développements sont nécessaires.

(ii) amélioration et extension des résultats précédents à un système endigué urbain incluant des réseaux. Pour cela on met en œuvre les méthodes de la sûreté de fonctionnement [VIL 88]. Une analyse fonctionnelle permet d'identifier plusieurs fonctions dont celles liées à la présence d'ouvrages extrinsèques (réseaux longitudinaux, traversants ou route en crête). La réalisation d'une analyse des modes des défaillances et de leurs effets (AMDE) [VIL 88] permet ensuite l'élaboration de scénarios de dégradation représentés sous la forme de nœuds papillons pour chacune des fonctions du système. Un « Nœud Papillon » présente les scénarios d'accidents qui pourraient survenir, en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences sur les cibles identifiées.

(iii) proposition d'un modèle fonctionnel pour les digues urbaines incluant des réseaux. Ce modèle fonctionnel est construit à partir des nœuds papillons proposés au cours de l'étape précédente. Afin d'affiner l'analyse et de rendre compte de la totalité des événements, nous avons intégré aux nœuds papillons, les scénarios de rupture des digues en remblai homogène, formalisés par M. Vuillet dans sa thèse (2012).

(iv) les scénarios de rupture sont de nature qualitative. Des modèles quantitatifs d'évaluation de la performance des digues ont été construits à partir de ces scénarios [VUI 12]. Nous proposons de mieux caractériser les réseaux techniques afin d'améliorer ces modèles. Un ensemble de données est proposé et une première agrégation de ces données est réalisée sous la forme d'arbres.

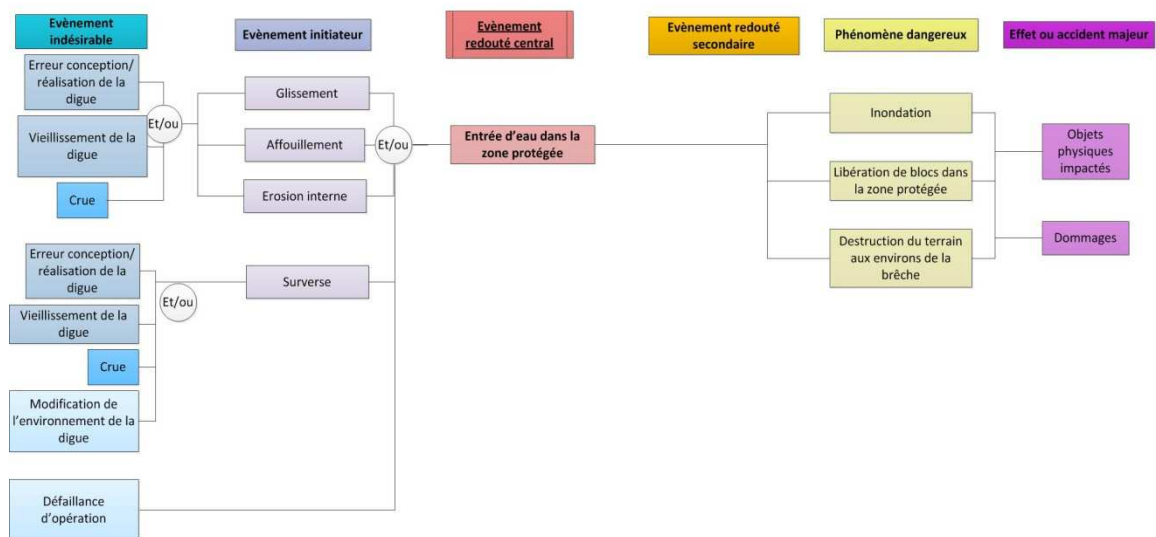
### 3. Résultats

Les modèles présentés ci-dessous sont applicables à des digues comportant des réseaux longitudinaux et/ou traversants et/ou une route en crête.

#### 3.1 Définition des fonctions afférentes aux réseaux techniques et modélisation des scénarios par Nœud-Papillons

En premier lieu, on réalise une analyse système du cas d'étude. Dans le projet, la digue du Drac est choisie en tant qu'illustration car elle répond bien aux questions soulevées ici (digues urbaines, forts enjeux à l'arrière, réseaux techniques et voirie). Cette digue est un ouvrage de classe A, existant depuis le 18<sup>ème</sup> siècle, protégeant la ville de Grenoble. Elle est constituée par des remblais en terre, la géométrie de l'ouvrage en termes de largeur de crête, pente des talus, profil en travers est sensiblement similaire sur l'ensemble de l'ouvrage. Nous nous appuyons notamment sur l'étude de dangers réalisée par le bureau d'études Sogreah [SOG 12] dans laquelle, la méthode du nœud papillon était mise en œuvre pour analyser les risques. L'utilisation de cette méthode est pertinente car elle permet d'identifier les causes et les effets d'un événement redouté associé à la digue et de facilement les visualiser. Cependant, dans cette étude de dangers, et comme dans la plupart des autres études de dangers, l'analyse n'est mise en œuvre que pour la fonction de protection de la digue. Or le système de digue considéré possède également des réseaux techniques. Dans ce projet, nous proposons donc d'étudier ces réseaux techniques, en identifiant de nouvelles fonctions à la digue et en élaborant les nœuds papillons leur étant associés. Nous proposons également une amélioration du nœud papillon de la fonction de protection afin qu'il explicite plus précisément les défaillances et les effets causés par une entrée d'eau dans la zone protégée.

L'analyse fonctionnelle réalisée suite à l'analyse du cas d'étude, a permis d'identifier quatre fonctions inhérentes à une digue comportant des réseaux techniques: *protection contre les inondations, supporte une route en crête, supporte un réseau traversant, supporte un réseau longitudinal*. A partir de l'AMDE mise en œuvre nous élaborons quatre nœuds papillons correspondant à chacune de ces fonctions. Nous présentons à titre d'exemple les nœuds papillons concernant la fonction de *protection contre les inondations* (Figure 1) et la fonction de *support d'un ouvrage traversant* (Figure 2).



**Figure 1 :** Nœud papillon de la fonction de protection contre les inondations

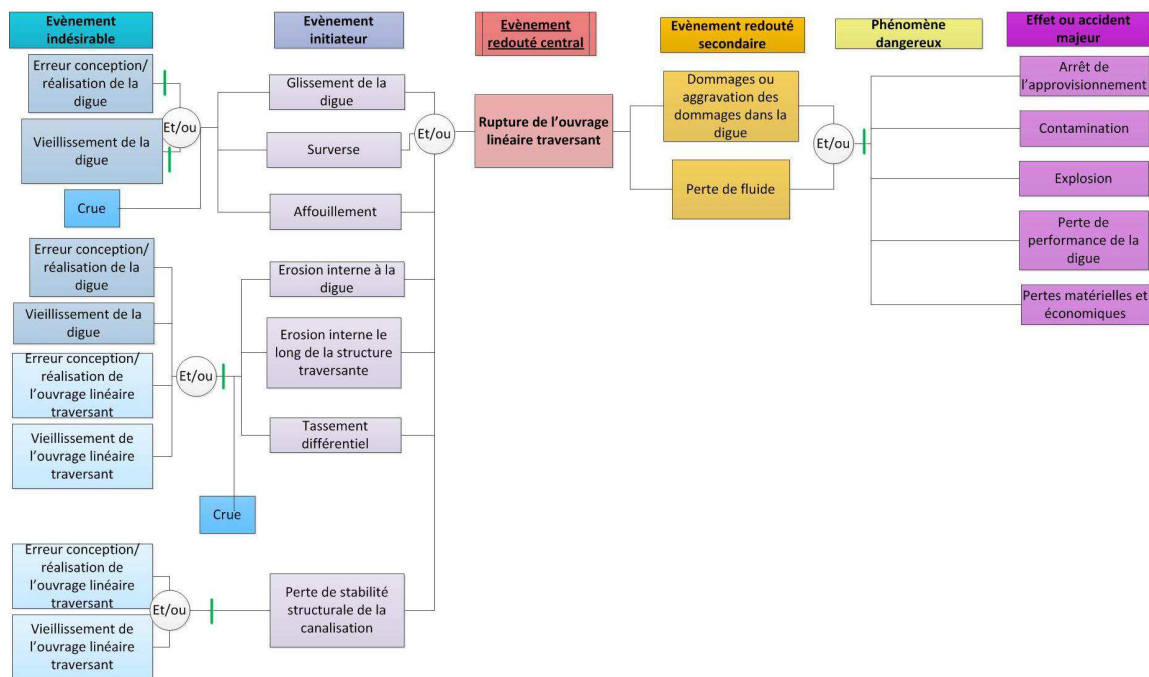
Le nœud papillon de la fonction de *protection contre les inondations* (Figure 1) s'articule autour de l'événement redouté central « entrée d'eau dans la zone protégée ». Celle-ci peut être causée par des événements indésirables survenus sur la digue tels que des phénomènes de glissement, d'érosion interne, d'affouillement et de surverse, chacun pouvant se produire seul ou simultanément. Selon les cas, une entrée d'eau dans la zone protégée pourra se produire sans que les défaillances survenues sur la digue ne mènent à une rupture de celle-ci (ex. cas d'une surverse sans rupture). Ces événements indésirables sont causés par un ou des événements initiateurs pouvant être d'origine environnementale (crue, modification de

l'environnement de la digue...), structurelle (vieillesse de la digue...) voire humaine si par exemple un batardeau est laissé ouvert accidentellement (défaillance d'opération).

L'entrée d'eau accidentelle dans la zone protégée risque de provoquer des inondations, de libérer des blocs dans la zone protégée et/ou de détruire le terrain environnant la brèche éventuelle de la digue. Ces accidents pourraient alors impacter des objets physiques et entraîner des dommages sur ceux-ci.

Par rapport à celui de l'EDD Sogreah, le nœud papillon de la fonction de protection (Figure 1) détaille les événements indésirables qui pourraient être à l'origine des événements initiateurs menant à la rupture. Par ailleurs, les événements redoutés secondaires identifiés par Sogreah ont été déplacés dans la section « Phénomène dangereux » et ont été développés. Ces compléments permettent de fournir une analyse de risque plus précise des digues.

La Figure 2 présente le nœud papillon élaboré pour la fonction de la digue : « *supporte un ouvrage traversant* ».



**Figure 2 :** Nœud papillon de la fonction support d'un ouvrage traversant

Dans de nombreux cas, des ouvrages linéaires (réseaux linéaires) traversent les digues, ce qui donne pour fonction à celles-ci de devoir les supporter. Pour cette fonction, l'événement redouté central est la rupture de l'ouvrage linéaire traversant (Figure 2). Les principaux modes de rupture de l'ouvrage linéaire traversant sont causés par (i) des problèmes de suintement à l'interface entre la digue et la structure pouvant découler d'un tassement différentiel, (ii) une érosion interne initiée le long de la structure comme une érosion régressive ou une érosion de conduit, (iii) une érosion interne à la digue pouvant être causée par une défaillance de la digue et/ou de l'ouvrage traversant linéaire (FLO 13). Par ailleurs les modes de rupture propre à la digue (Glissement, Surverse, Affouillement) peuvent également conduire à la rupture de l'ouvrage traversant. Les événements initiateurs de cette rupture peuvent donc provenir d'une défaillance de la digue et/ou d'une défaillance de la structure enfouie.

La rupture de l'ouvrage linéaire traversant peut entraîner des événements redoutés secondaires qui peuvent par exemple être des dommages ou aggravations dans la digue selon la nature de l'événement initiateur. Par exemple, si la rupture de la canalisation enfouie dans la digue est due à une perte de stabilité causée par son vieillissement, elle peut endommager la digue qui perdrait alors en performance. Par contre si la rupture de la canalisation est causée par une défaillance de la digue, elle peut en aggraver la défaillance, par exemple en cas d'érosion interne.

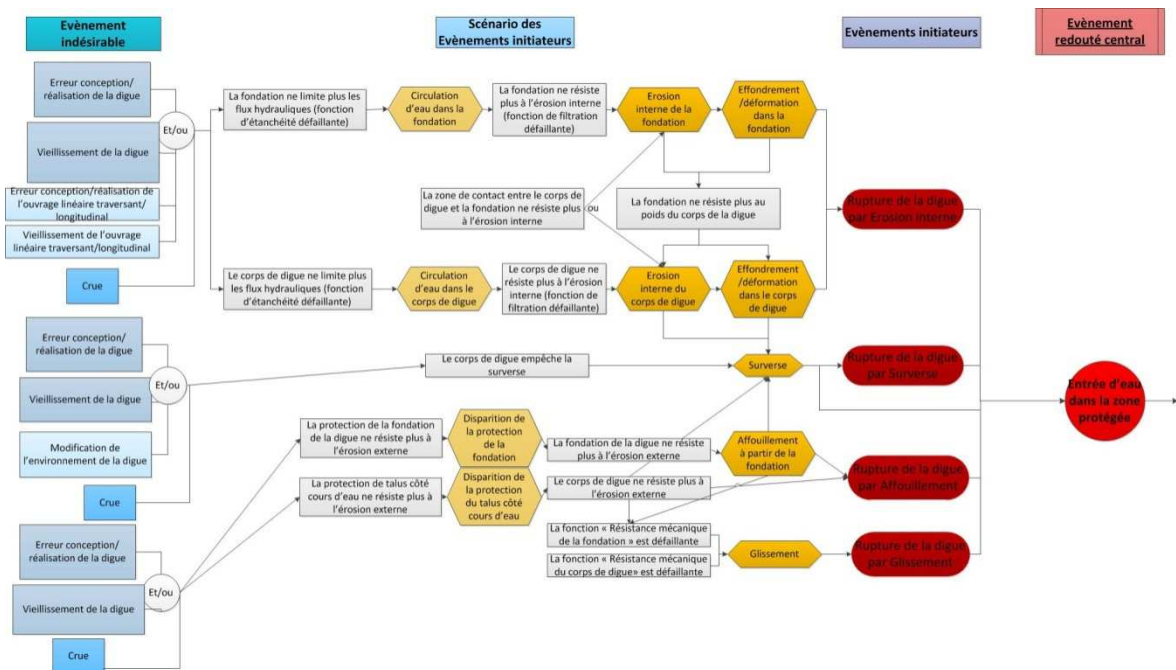
Si l'ouvrage linéaire traversant contient un fluide, sa fuite causée par la rupture de l'ouvrage risque également de provoquer des accidents majeurs tels que des explosions (gaz) ou des contaminations (ex : eaux usées).

Il peut également se produire des effets indirects lorsqu'il s'agit par exemple de câbles de télécommunication qui traversent la digue. En cas de coupure de ceux-ci, cela entraînerait un arrêt de communications pouvant être essentielles même en dehors de la zone protégée (ex, appel des secours en cas de crise).

Les nœuds papillons sont applicables à des digues en remblai homogène comportant des réseaux longitudinaux et/ou traversants et/ou une route en crête. Ils sont applicables à d'autres types de digues. Les événements indésirables, redoutés secondaires et les effets seront les mêmes, mais les événements initiateurs seront différents selon le type de digue concerné.

### 3.2 Proposition d'un modèle fonctionnel pour les digues urbaines incluant des réseaux

Afin de préciser les enchaînements d'événements et de mettre en évidence des interactions entre les phénomènes, des graphes causaux associés aux quatre modes de rupture possible de la digue (par érosion interne, affouillement, surverse et/ou glissement) et décrits dans (VUI 12), sont intégrés dans les nœuds papillon. Ils permettent de détailler les événements qui conduisent ou peuvent conduire à l'événement redouté central.



**Figure 3 :** Extrait du modèle conceptuel élaboré pour la fonction de protection de la digue

La Figure 3 représente le nœud papillon développé pour la fonction de protection contre les inondations (Figure 1), intégrant des graphes causaux associés aux différents modes de rupture de la digue. Sur cette figure, il s'agit d'un extrait du nœud papillon. La partie droite du nœud concernant l'arbre des effets, n'a pas été représentée car elle est la même que celle du nœud papillon initial. La partie gauche considère l'ensemble des mécanismes de dégradation concernés : dans les cases grises sont figurées les fonctions de la digue qui ne sont plus remplies, dans les losanges jaunes sont représentés des événements induits par la non réalisation de ces fonctions et dans les ovales rouges sont indiqués les modes de rupture provoqués par ces événements et leur mécanisme associé. Les interactions entre ces mécanismes sont également indiquées. Par exemple, si la fondation de la digue ne résiste plus à l'érosion externe, elle peut conduire à des affouillements à partir de la fondation, mais également éventuellement à un glissement. Ce qui risquerait par la suite de mener la digue à rompre et provoquerait une entrée d'eau dans la zone protégée.

Ce nœud papillon développé constitue donc un modèle fonctionnel appliqué au réseau de digues qui tient compte des ouvrages traversants ou longitudinaux qu'il peut contenir. En effet, la présence d'une canalisation ou d'un câble dans la digue peut conduire à un événement indésirable (ex : vieillissement de la canalisation) qui pourrait entraîner le déroulement de l'un des scénarios de rupture de la digue.

Le modèle fonctionnel global proposé est générique et constitue le socle pour l'amélioration des modèles existants d'évaluation de la performance des digues. Il est de nature qualitative. L'évaluation de la performance suppose le développement d'un modèle quantitatif.

### 3.3 Amélioration des modèles quantitatifs d'évaluation de la performance par intégration de connaissances sur les réseaux

Des modèles d'évaluation quantitatifs de la performance des digues ont été produits dans le travail de Vuillet (2012) (cf. Figure 4) pour chaque mode de rupture considéré (Evénements initiateurs sur la Figure 3) à partir des graphes causaux. Ils fonctionnent selon un mode hiérarchique : une liste d'indicateurs d'état, non formalisés, issus de mesures visuelles, auscultées... est proposée pour évaluer chacun des critères. Ces critères sont agrégés selon des opérateurs mathématiques simples (minimum, moyenne pondérée) pour évaluer la performance vis-à-vis d'un mode de rupture. Les indicateurs sont actuellement en cours de formalisation et des structures d'agrégation sont proposées [BAM 14] pour ce qui concerne les caractéristiques intrinsèques de la digue et ceux liés à la présence d'une végétation arborescente. Nous nous attachons ici à apporter des éléments pour la caractérisation des indicateurs permettant de décrire les réseaux techniques présents dans les digues. En effet, le passage indicateurs d'état – critère fonctionnel se fait uniquement à dire d'expert selon un mode "boîte noire" à partir de variables non formalisées. Ceci peut entraîner des problèmes de répétabilité ou de reproductibilité de l'évaluation [CUR 10].

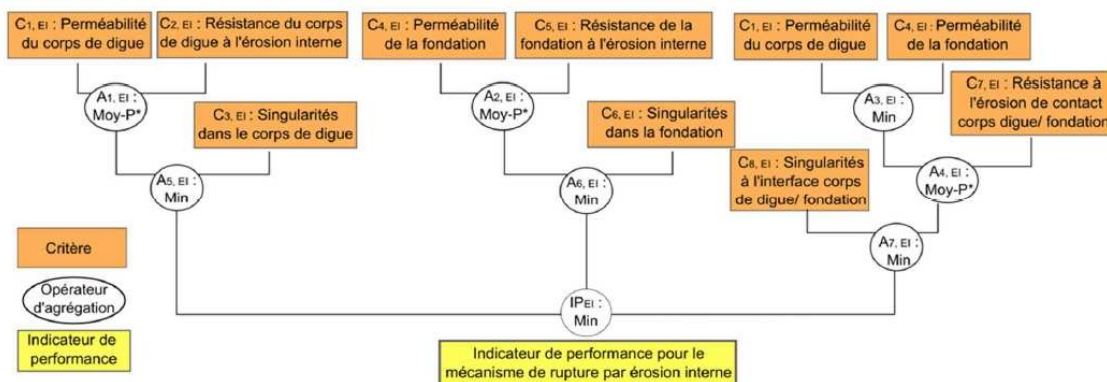
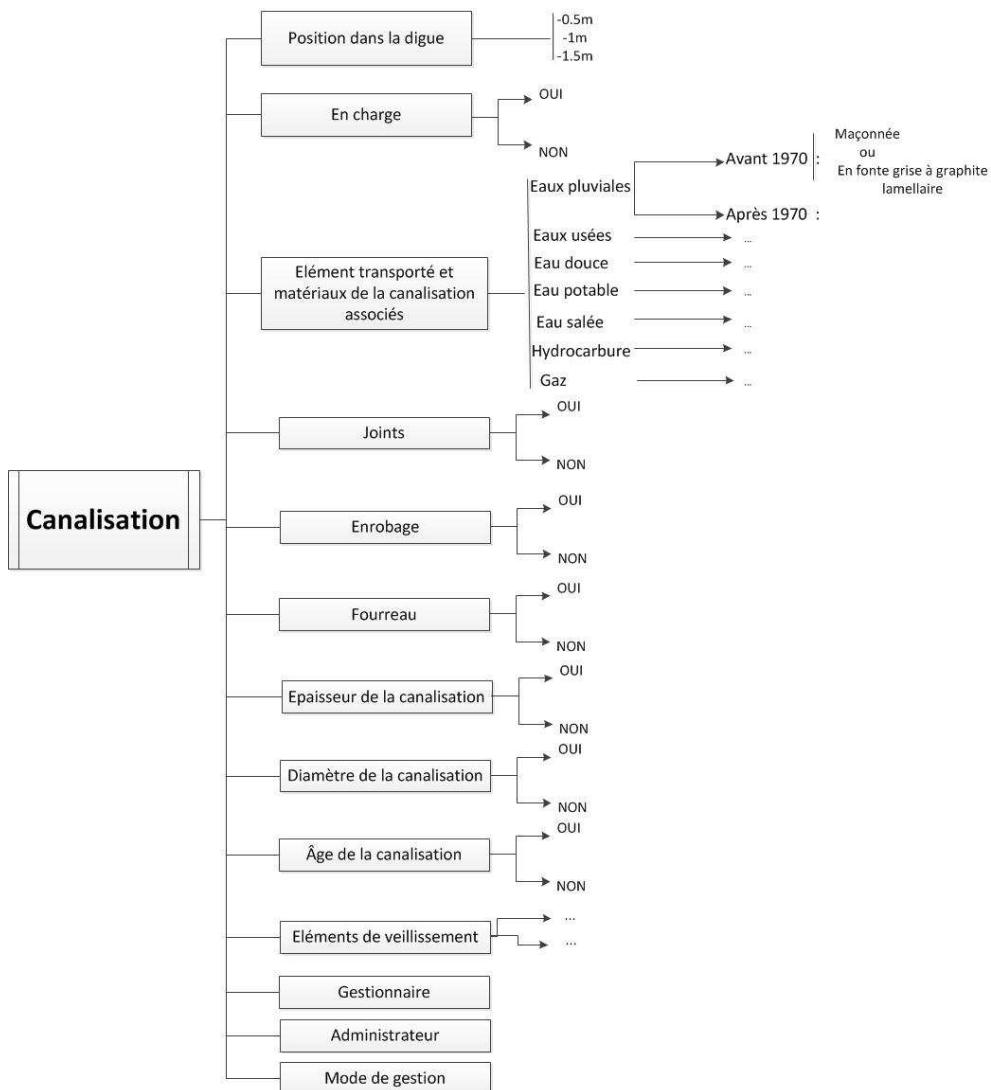


Figure 4 : Modélisation fonctionnelle du mécanisme d'érosion interne issue de la thèse de M. Vuillet (2012)

La Figure 4 présente ainsi le modèle d'évaluation de la performance des digues en remblai homogène pour le mécanisme de rupture par érosion interne. Les critères « Singularités dans le corps de digue » et « Singularités dans la fondation » concernent les ouvrages traversants. La liste des indicateurs d'état permettant de les évaluer est : Karst, Terriers, Arbres/Racines, Ouvrages traversants, Contacts entre le corps de digue et les ouvrages traversants (conditions de pose). Les indicateurs d'état sont les mêmes pour chacun des deux critères. Nous proposons ici de détailler et améliorer la description de l'item « Ouvrages traversants ».

Nous déclinons cet indicateur d'état en deux grands types de réseaux à savoir « câble » et « canalisation ». En effet, ces deux éléments sont différents notamment quant à leur influence sur la performance de la digue. Nous associons à ces types de réseaux des indicateurs (non formalisés) permettant de les préciser et les structurons sous la forme d'arbres. La Figure 5 est l'arbre associé à l'indicateur d'état « Canalisation ». 13 indicateurs sont a priori nécessaires pour évaluer l'influence de l'état de la canalisation sur le critère « Singularités » : position dans la digue, joints... Pour l'indicateur d'état « Câble » 12 indicateurs ont été identifiés.



**Figure 5 :** Extrait de l'arbre formalisant les éléments de connaissance associés à l'indicateur d'état « Canalisation »

Ces arbres et éléments sont une première représentation qu'il conviendra d'améliorer. Il s'agit de formaliser les indicateurs correspondant en définissant : un mode opératoire, une échelle et référence, un lieu et un moment de mesure afin de rendre leur utilisation robuste [CUR 10]. Par ailleurs, ces indicateurs devront être agrégés (opérateurs arithmétiques, règles SI-ALORS) afin d'obtenir une note globale pour le réseau considéré.

#### 4. Conclusion

Les systèmes de digues constituant une protection contre les inondations, il est nécessaire de connaître leur performance. Des méthodes existent mais elles ne prennent actuellement pas en compte les caractéristiques que peuvent posséder ces systèmes tels que les réseaux techniques urbains (routes, câbles électriques...). La méthodologie proposée dans cette communication tient compte de ces spécificités. A partir de l'analyse système d'un cas d'étude, nous avons associé de nouvelles fonctions au système de digues. Pour chacune d'elle nous avons réalisé une AMDE et un nœud papillon. En repartant des nœuds papillon produits nous avons proposé un modèle fonctionnel permettant entre autre la visualisation des scénarios de rupture possibles de la digue et leurs liens éventuels. Par ailleurs, nous avons proposé une amélioration d'un modèle d'évaluation de performance des digues existant. Nous avons détaillé l'indicateur d'état « ouvrage traversant » existant selon deux types de réseaux. Ceux-ci permettent de fournir des évaluations distinctes selon que l'on a affaire à un câble ou une canalisation et donc de rendre le modèle plus précis. Nous leur avons associé des éléments de connaissance formalisés sous la forme d'arbres. En perspectives figure la formalisation des indicateurs et leur agrégation.

Remerciements :

Les auteurs remercient le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE) pour le financement de ce projet RDT INCERTU. Ils remercient également l'Association Départementale d'aménagement de l'Isère, du Drac et de la Romanche (AD-IDR) pour sa contribution.

#### 5. Bibliographie :

[BAM 14] BAMBARA G., CURT C., MERIAUX P., VENNETIER M., VANLOOT P., « Evaluation de la vulnérabilité des digues fluviales soumises au développement d'une végétation arborescente », *Acte des 14<sup>èmes</sup> rencontres universitaires de Génie Civil (AUGC)*, 2014.

[BAM 14] BAMBARA G., CURT C., MERIAUX P., VENNETIER M., VANLOOT P., « Réduire les incertitudes épistémiques pour une meilleure évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales », *Acte du 19<sup>ème</sup> Congrès Lambda Mu 19 (IMdR)*, 2014.

[CUR 10] CURT C., PEYRAS L., BOISSIER D. "A knowledge formalization and aggregation-based method for the assessment of dam performance". *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, p. 171-183, 2010

[FLO 13] FLOODPROBE, « Technologies for Flood Protection of the Built Environment », *projet de recherche*, 2007-2013.

[TOU 13] TOURMENT R., BEULLAC B., DENIAUD Y., SIMM J., WALLIS M., SHARP M., POHL R., VAN HEMERT H., « L'ILH et les modes de défaillance des digues : liens avec les études de danger », 2013.

[LIN 00] LINO M., MERIAUX P., ROYET P., « Méthodologie de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire moyenne », Cemagref Editions, 208 p, 2000.

[MED 08] MEDDE, Arrêté définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, Journal Officiel de la République Française 2008

[MED 07] MEDDE, Décret relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement, Journal Officiel de la République Française 2007

[SER 05] SERRE D., Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations - Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique, Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, 2005.

[SOG 12] SOGREAH, Etude de dangers de la digue de classe A du Drac, Rapport final, décembre 2012.

[TOU 07] TOURMENT R., "Digues : comment éviter une rupture : présentation des modalités de surveillance, d'entretien et de diagnostic des digues de protection contre les inondations". Journée d'information sur la gestion des digues de protection contre les inondations dans le cadre du réseau régional des gestionnaires des milieux aquatiques de Provence-Alpes-Côte d'Azur. A. r. p. I. E. PACA, 2007.

[VIL 88] VILLEMEUR A., 1988 - *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*, Eyrolles, EDF, 1988

[VUI 12] VUILLET M., Élaboration d'un modèle d'aide à la décision basé sur une approche probabiliste pour l'évaluation de la performance des digues fluviales, Thèse de doctorat, Université Paris Est, 2012.