

# Études de dangers des systèmes d'endiguement – Vers un outil modulaire CAROHL de Calcul de l'Aléa Rupture des Ouvrages Hydrauliques Linéaires

## *Levees hazards studies – Toward a modular tool CAROHL for hydraulic linear structures breach hazard calculation*

**E. Durand<sup>1</sup>, B. Bridoux<sup>1</sup>, L. Saussaye<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Cerema, Blois, France, [edouard.durand@cerema.fr](mailto:edouard.durand@cerema.fr)

### Résumé

L'évaluation de la sûreté des ouvrages hydrauliques en France est un enjeu national relevant de la politique de prévention et de lutte contre les inondations. Une nouvelle réglementation sur les ouvrages hydrauliques a introduit en 2007 la notion d'étude de dangers des digues. Dans ce cadre, la méthodologie et l'outil de calcul de l'aléa rupture de digue, CARDigue, ont été développés entre 2008 et 2011 par la DREAL Centre-Val de Loire, le Cerema et l'Inrae [1] pour l'aide à la réalisation, de façon homogène, des études de dangers des digues de la Loire moyenne et ses affluents. Depuis 2011, l'outil a été employé sur 42 systèmes d'endiguement ligériens et les demandes d'utilisation de CARDigue en dehors du contexte Loire se sont accrues. Cela a permis d'avoir un retour d'expérience de son utilisation et d'envisager des améliorations. Sur la même période, des progrès scientifiques majeurs ont été faits sur la connaissance des mécanismes à l'origine des ruptures d'ouvrages hydrauliques [6][9]. Le Cerema envisage donc le développement d'un nouvel outil modulaire, CAROHL, qui permettra aux bureaux d'études de créer et d'analyser des scénarios de rupture propres au système d'endiguement étudié, à l'aide de modules de mécanisme élémentaire (surverse, érosion interne, érosion externe, glissement, soulèvement hydraulique) mis à disposition dans l'outil et combinés entre eux. L'outil pourra ainsi s'adapter à chaque système d'endiguement, ce que ne permet pas aujourd'hui l'outil CARDigue [2], qui ne caractérise que les mécanismes et scénarios de rupture affectant les digues de la Loire moyenne.

Le présent article présente les principes de fonctionnement de ce nouvel outil innovant CAROHL, au stade actuel de démonstrateur, et son domaine d'application. Il décrit les améliorations apportées par rapport à CARDigue et illustre sa modularité avec la possibilité de création de nouveaux mécanismes et modules élémentaires afin de s'adapter aux scénarios de défaillance de chaque système d'endiguement.

### Mots-clés

digue, étude de dangers, aléa de rupture, évaluation, sûreté

## Abstract

In France, levees safety assessment is a national issue supported by prevention and fight against inundation politics. In 2007, a new regulation about hydraulic structures (levees and dams) was voted and a decree made levees hazards studies mandatory. In these circumstances, DREAL CVL (state regional owner of central Loire levees), and two contractors Cerema and Inrae developed from 2008 to 2011 a new methodology and tool, CARDigue, for Loire levees breach hazards calculation [1]. Since 2011, CARDigue has been used on the 42 central Loire levee systems by contractors and then standard hazard studies were conducted. Widely, the use of CARDigue out of Loire context has increased and a feedback on its utilization has pointed out necessity of methodology and tool improvements. At the same time, major scientific advances had been done on mechanisms which are the cause of levee breaches [6][9]. Thus, Cerema has laid the foundation a new modular tool development, CAROHL, that will enable contractors to create and analyze suitable linear hydraulic structure breach scenarios using provided elementary mechanisms modules combination (overflowing, external and internal erosion, scour, slope sliding, uplift). Therefore, CAROHL will be able to suit all levee systems, what CARDigue can't do [2] since the tool utilization is restricted to 5 identified Loire levee system breach scenarios.

This article presents scope and operation principles of the new and innovating demonstrator tool CAROHL. It describes improvements compared to first tool CARDigue and underlines its adaptability and possibilities to create and combine new modules to fit each levee system failure modes.

## Key Words

levee, hazard study, breach hazard, assessment, safety

## Introduction

L'analyse de la sûreté d'un ouvrage hydraulique, digue ou barrage, est une étape très importante pour le gestionnaire d'un ouvrage, puisqu'elle met en avant le risque de rupture de celui-ci et ses conséquences potentielles sur les personnes et les biens. Ainsi, pour les systèmes d'endiguement, la réglementation invite le gestionnaire d'un système d'endiguement, notamment lors de l'étude de dangers, à étudier le niveau de sûreté de son ouvrage et à choisir le niveau de protection qui l'engagera en termes de responsabilité.

À la différence d'un barrage ou d'un autre ouvrage géotechnique « ponctuel », les systèmes d'endiguement sont des ouvrages pouvant être de grands linéaires dont l'évaluation suppose de pouvoir traiter un grand nombre de données de natures différentes (topographiques, bathymétriques, géologiques, géotechniques, visuelles...) d'une manière systématique et homogène afin de faire ressortir les points faibles du système. Dans le cadre d'une étude de dangers (EdD), CAROHL (comme CARDigue) doit donc s'envisager comme un outil de tri, distinguant les tronçons les plus sûrs de l'ouvrage des tronçons plus sensibles pour lesquels une analyse fine sera à mener.

### Evolution de CARDigue vers un outil modulaire CAROHL utilisable sur tous les systèmes d'endiguement

C'est dans cette optique que la méthodologie et l'outil CARDigue (Calcul de l'aléa rupture de digue) ont été mis au point dès 2008 lors de la première étude de dangers des digues de classe A de la Loire moyenne et de ses affluents [1].

#### Rappel méthodologique et principes généraux

Le principe de base de cette méthodologie, comme le montre la Figure 1, est de discrétiser le système d'endiguement en tronçons élémentaires d'une longueur choisie pour être représentative d'une section homogène de digue. Ce tronçon est décrit géométriquement par un profil en travers type défini par les coordonnées (x, y, z) des 7 points caractéristiques présentés sur la Figure 1.

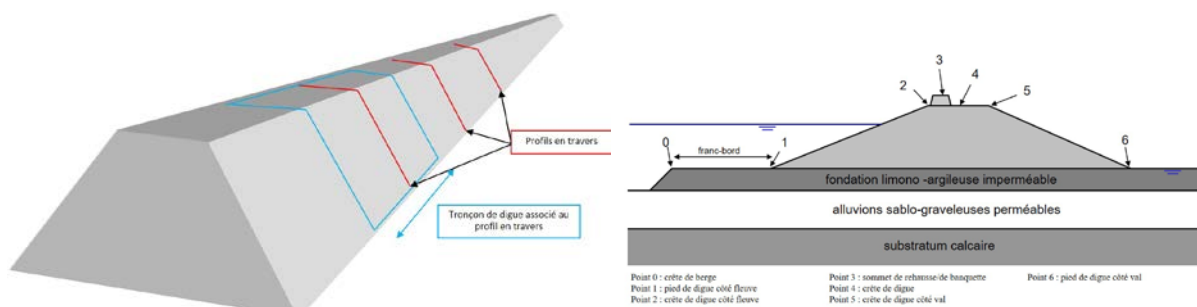


FIGURE 1. Principe CARDigue de discrétisation d'un système d'endiguement en tronçons élémentaires représentés par un profil en travers type.

À chaque profil en travers, en plus des informations de géométrie, d'épaisseur et de nature de la

couche de fondation et de la couche d'alluvions sous-jacente, est rapportée, de manière codifiée, la présence d'éléments structurels et les désordres sur le tronçon relevés lors des inspections visuelles. Ces informations sont complétées par l'existence de confortements (écran étanche, massif en enrochement, massif drainant...) et par les niveaux de sollicitations hydrauliques pour lesquelles l'analyse de stabilité du profil est souhaitée selon les mécanismes et scénarios de rupture identifiés comme possibles sur les digues de Loire.

Dans l'outil CARDigue, ces scénarios sont fixes et au nombre de 5 (Figure 2). Ils sont identifiés par le mécanisme élémentaire initiant le scénario. Il s'agit de la surverse (s), de l'érosion externe (ee) (affouillement côté Loire), de l'érosion interne (ei), du glissement (g) et du soulèvement hydraulique (sh).

Mécanisme Initial (Nom du scénario)	Enchaînements des mécanismes menant à la rupture
Surverse (s)	Surverse => Erosion du talus Val => brèche
Erosion Interne (ei)	Erosion interne => brèche
Glissement (g)	Glissement côté val => Erosion interne => brèche
Erosion Externe (ee)	Erosion du pied de digue => Glissement de talus côté Loire => Erosion interne => brèche
Soulèvement Hydraulique (sh)	Soulèvement hydraulique => Erosion interne => brèche

FIGURE 2. Les cinq scénarios de rupture pris en compte dans CARDigue.

Pour chacun des scénarios considérés comme indépendant (n), l'outil fournit pour chaque niveau de sollicitation hydraulique (Qi), une probabilité d'apparition du mécanisme P(na) et une probabilité de rupture de la digue (Pnr), une fois ce mécanisme initiateur apparu. La probabilité événementielle de rupture par le mécanisme (n) est alors donnée par la combinaison de l'Équation 1 :

$$P(n)_{Qi} = P(na) \times P(nr) \quad (1)$$

Les probabilités sont définies à dire d'expert à partir de critères chiffrés qui traduisent le comportement de l'ouvrage vis-à-vis des mécanismes analysés. À titre d'exemple, pour le scénario de surverse, le critère d'apparition est la hauteur de surverse (ou de revanche) (distance à la cote du point 4 de la Figure 1). Plus la ligne d'eau est proche de la crête de digue, plus la probabilité d'apparition de surverse est forte ; elle devient certaine (P(sa)=1) quand elle dépasse la crête ou s'en approche très fortement (limite à fixer par l'utilisateur). Pour le glissement ou le soulèvement hydraulique, le critère d'apparition est un facteur de sécurité. Pour l'érosion interne, le critère pris en compte repose sur l'évaluation d'un gradient hydraulique global tel que proposé par Bligh [4] rapport entre la charge hydraulique sur la digue et sa largeur en pied.

Pour chaque mécanisme, une échelle de probabilité est définie selon des intervalles du critère analysé, probabilités et intervalles étant définis par l'utilisateur. L'exemple de la Figure 3 montre la grille de probabilité associée à l'apparition du glissement en fonction du facteur de sécurité F calculé sur chaque profil.

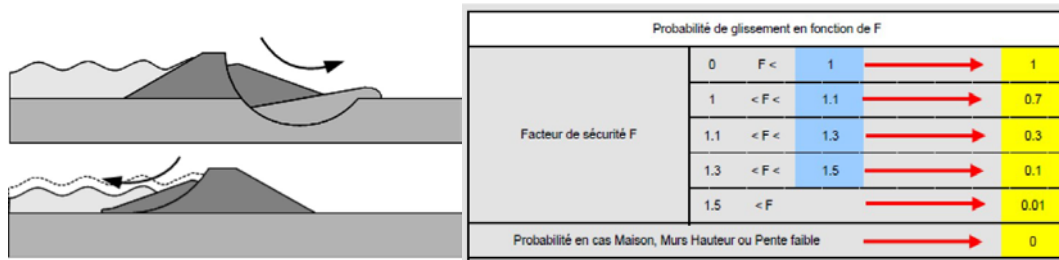


FIGURE 3. Mécanisme et grille de probabilité associée à l'apparition d'un glissement en fonction de 5 intervalles de valeurs du facteur de sécurité F calculé et la présence de murs etc.

Pour la probabilité de rupture ( $P_{nr}$ ) une fois le mécanisme n apparu, des critères sont également définis pour chaque mécanisme et des facteurs influençant la probabilité de rupture sont pris en compte. À titre d'exemple, pour la surverse, la probabilité  $P(sr)$  est fonction l'épaisseur de la lame d'eau déversante dont le pouvoir érosif est influencé par la pente de la digue côté zone protégée, la présence d'obstacles (comme la végétation) ou par la présence d'eau en pied limitant le ressaut hydraulique. Les retours d'expérience sur les crues historiques [3] de la Loire montrent qu'au-delà de 0,2 m, les surverses ont conduit systématiquement à des brèches ( $P_{sr} = 1$ ).

La méthodologie et l'outil associé, développé par le Cerema, permettent à l'utilisateur de définir et de prendre en compte des facteurs favorisant ou diminuant l'apparition d'un mécanisme ou la possibilité de rupture associée, en pondérant soit le calcul du critère lui-même soit la probabilité résultante. Pour plus de précisions sur les critères et coefficients pris en compte dans la méthodologie CARDigue et sur les probabilités déterminées, le lecteur se reportera à l'article [5].

L'outil permet l'édition d'un procès-verbal pour chaque profil, regroupant les principales informations pour les différents mécanismes et niveaux de sollicitation hydraulique étudiés (Figure3a). L'exploitation des résultats de CARDigue par un système d'information géographique (SIG) permet de reporter les informations et de localiser les points faibles du système d'endiguement étudié.

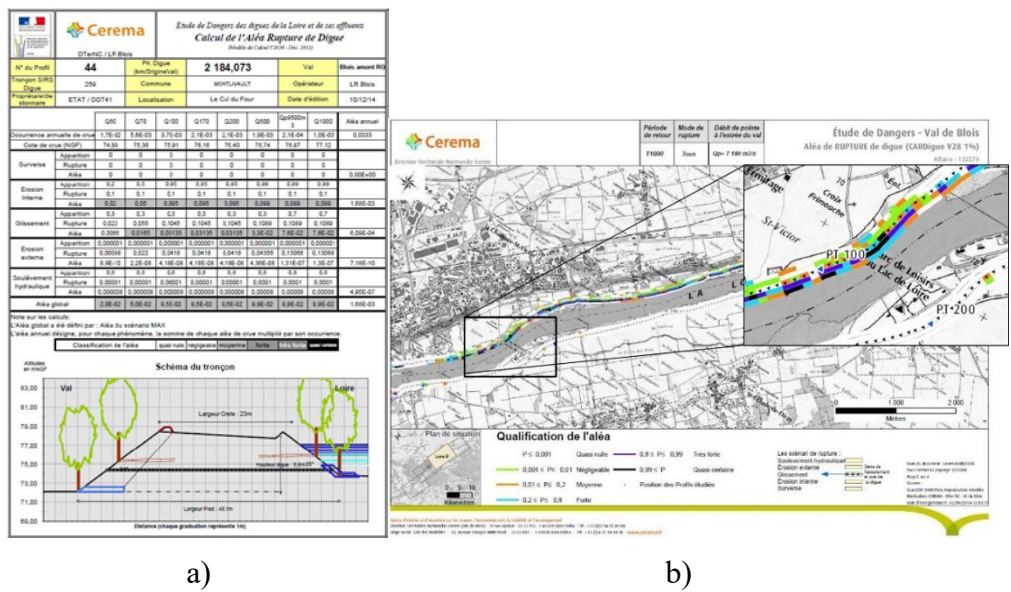


FIGURE 4. Exemple de procès-verbal CARDigüe (a) et exemple d'exploitation de ses résultats sous SIG (b).

### Les limites d'utilisation de CARDigüe

Depuis ses premières utilisations par la DREAL Centre-Val de Loire sur les 3 systèmes d'endiguement de classe A de la Loire moyenne de 2011 à 2013, CARDigüe a été mis à disposition et utilisé par les bureaux d'études missionnés pour la réalisation des études de dangers des 42 systèmes d'endiguement de la Loire moyenne et de ses affluents. Par ailleurs, plusieurs conventions d'utilisation ont été passées avec des bureaux d'études souhaitant l'utiliser en dehors du cadre des digues de Loire.

Ces diverses utilisations ont suscité de nombreux retours qui ont permis de mieux cibler les limites d'utilisation de l'outil et de donner des pistes d'amélioration. Nous noterons ainsi :

- la limitation de l'outil à 5 scénarios fixes (Figure 2) qui, s'ils s'appliquent bien aux digues de Loire, ne correspondent pas nécessairement ou en totalité aux scénarios de rupture rencontrés sur d'autres systèmes d'endiguement ;
- le nombre limité de configurations géotechniques prises en compte dans l'estimation du facteur de sécurité au glissement (3 hauteurs de digue, 3 pentes de talus, 2 types de sols support) et des caractéristiques géotechniques fixes et identiques pour tous les profils ;
- le poids très important de l'érosion interne dans les scénarios de rupture et l'approche « simpliste » de l'érosion interne par le gradient moyen de Bligh.

À ces retours, se sont ajoutés les changements réglementaires de 2015 et 2019 ayant modifié profondément l'approche d'évaluation des ouvrages hydrauliques avec le passage de l'objet « digue » à l'objet « système d'endiguement », le transfert de la compétence Gemapi aux EPCI et le développement important des connaissances scientifiques sur les différents mécanismes [9], notamment l'érosion interne [6][7].

Ceci a amené le Cerema en 2019 à travailler au développement d'un nouvel outil permettant une utilisation sur tous les systèmes d'endiguement (en domaine fluvial dans un premier temps),

autorisant l'utilisateur à définir lui-même ses scénarios de défaillance et à introduire d'autres mécanismes élémentaires ou d'autres critères d'évaluation d'un mécanisme existant. Ce projet a été appelé CAROHL pour Calcul de l'Aléa de Rupture des Ouvrages Hydrauliques Linéaires. Il est aujourd'hui à l'état de démonstrateur sous Excel.

**CAROHL, un outil modulaire, évolutif et adaptable au fonctionnement de chaque système**

*Principes de l'outil CAROHL*

L'évaluation d'un système d'endiguement passe par son analyse fonctionnelle et une analyse de ses modes de défaillance et de ses effets (type AMDE). Celles-ci vont permettre d'identifier les fonctions de l'ouvrage et de ses composants et d'identifier pour chacun les modes de défaillance potentiels qu'il conviendra d'étudier. De ces analyses vont découler l'identification des mécanismes à l'origine des défaillances et la définition de scénarios conduisant à la ruine de l'ouvrage (Figure 5). L'objectif de CAROHL est de traduire ces scénarios et de fournir les probabilités associées.

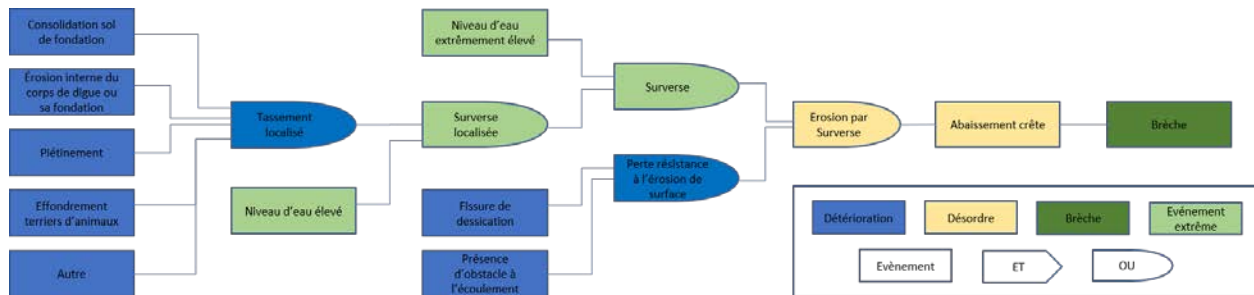


FIGURE 5. Exemple d'arbre de défaillance d'un scénario de surverse conduisant à une brèche (d'après [9]).

Le principe de ce nouvel outil (Figure 6) est de disposer d'un catalogue de modules (ou briques) élémentaires caractérisant les mécanismes de détérioration de la digue (érosion interne, érosion externe, glissement, etc.) et d'un assembleur permettant à l'opérateur i) de définir ses scénarios (enchaînement de mécanismes) conduisant à la rupture de l'ouvrage ii) de calculer la probabilité du scénario par assemblage mathématique des probabilités des modules élémentaires.



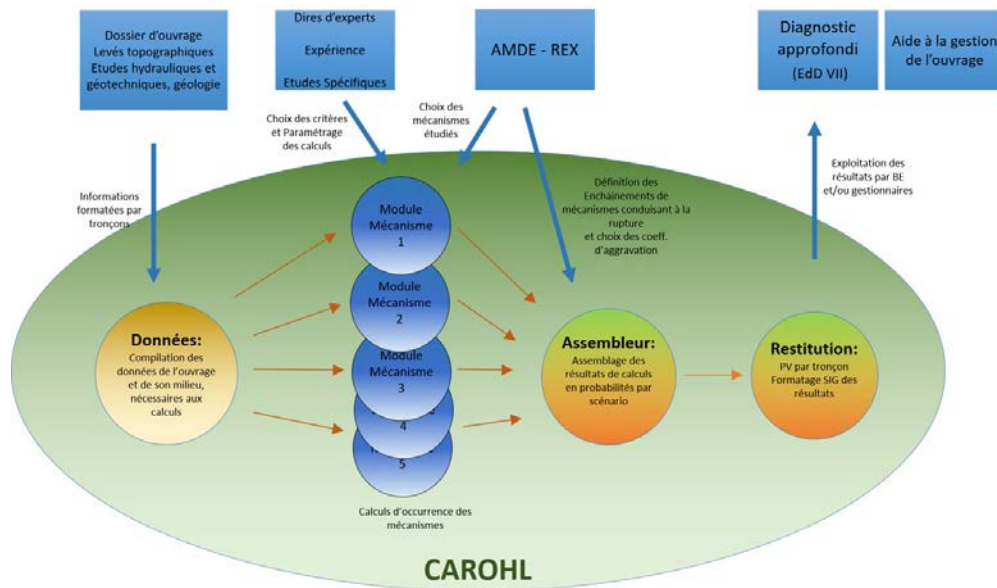


FIGURE 6. Logigramme fonctionnel de l'outil CAROHL.

### Catalogue de modules élémentaires

Le catalogue actuel de CAROHL comprend l'ensemble des modules élémentaires permettant de traduire les scénarios issus de CARDigue, qu'il s'agisse de l'apparition du mécanisme étudié ou son développement menant à la rupture. À titre d'exemple, pour la traduction du scénario de surverse, CAROHL comprend un module « surverse » + un module « érosion externe du talus côté zone protégée ». Les autres modules à disposition sont : l'érosion interne selon le critère de Bligh, l'érosion externe côté eau (affouillement), le soulèvement hydraulique, le glissement amont, le glissement aval.

Pour chaque module, comme pour CARDigue précédemment, l'opérateur définit le critère d'analyse, la plage de probabilisation du résultat et les coefficients modérateurs (Figure 7). Chaque module extrait les données nécessaires de la table/base de données propre à l'ouvrage étudié, calcule pour chaque profil la valeur brute du critère défini pour ce mécanisme, traduit le résultat en probabilité en appliquant les coefficients modérateurs le cas échéant.

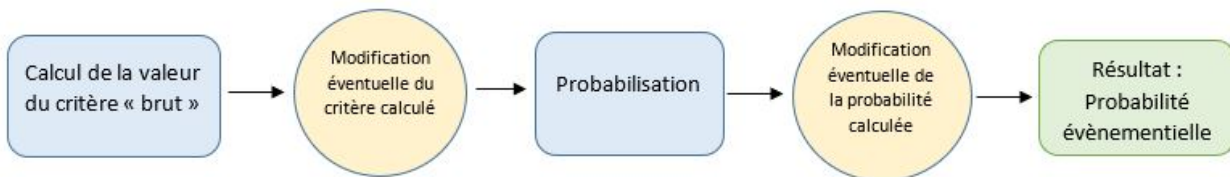


FIGURE 7. Principe de calcul d'un module élémentaire de l'outil CAROHL.

En plus des mécanismes dégradant la digue, les scénarios de rupture peuvent aussi incorporer des « barrières de sécurité » correspondant à des mécanismes ou événements luttant contre la détérioration de l'ouvrage (mise en place de protection temporaire, interventions du gestionnaire durant la crue, etc.). Ces éléments sécurisants influencent eux aussi la probabilité de rupture associée à un scénario (apparition ou développement) et peuvent donc être traités dans CAROHL



comme des briques d'un scénario. Un module dédié est donc disponible dans le catalogue.

### *L'Outil Assembleur de CAROHL*

Cette interface aussi dénommée « panneau de contrôle » CAROHL (Figure 8) permet à l'utilisateur : i) de définir le mécanisme étudié ii) d'associer à ce mécanisme le ou les modules élémentaires concernés iii) de définir le mode d'assemblage de ces modules élémentaires en termes de probabilité (ET/OU/MAX) iv) de calculer pour chaque profil la probabilité globale événementielle du scénario résultant de cet assemblage. Les tests réalisés sur les données de l'étude de dangers du système d'endiguement de Blois rive gauche [8] permettent, avec l'outil CAROHL, de retrouver les résultats de l'outil CARDigue.

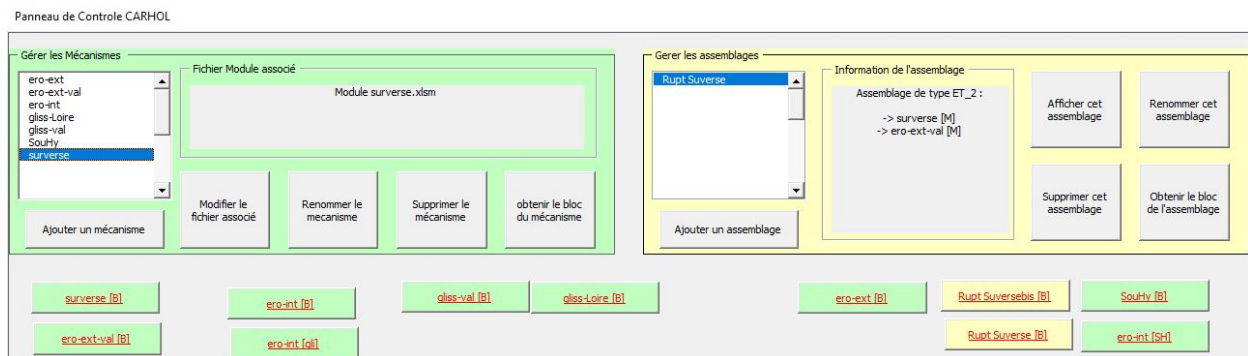


FIGURE 8. Interface d'Assemblage de l'outil CAROHL (démonstrateur).

Comme pour CARDigue, les résultats des calculs par profil sont exploitables à l'aide d'outil SIG. À ce titre, l'interfaçage avec des outils comme SIRS Digues v2 est une piste explorée, d'autant plus que cet outil facilitant la gestion des digues peut alimenter la table de données utilisée dans CAROHL.

### *Développement de nouveaux modules et mécanismes*

La souplesse qu'offre l'outil CAROHL est de pouvoir définir, à l'aide des modules élémentaires existants dans le catalogue ou de nouveaux modules, un nouveau mécanisme de défaillance. On pourrait par exemple ajouter un nouveau module « Tassement » qui pourrait être consécutif à de l'érosion interne et provoquerait la surverse.

De plus, même si l'outil est actuellement orienté vers une utilisation sur des systèmes d'endiguement fluviaux, la nouvelle modularité permet d'ouvrir le champ des possibles aux ouvrages de protection contre les submersions marines. Les mécanismes propres à ces ouvrages comme le franchissement par paquets de mer ou l'impact dynamique de la houle pourraient faire l'objet de modules dédiés. Comme pour chaque module, il conviendra alors de disposer des données nécessaires pour chacun des profils étudiés.

### *Analyse d'un mécanisme existant avec un autre critère*

L'outil permet également de créer des modules élémentaires permettant l'analyse d'un mécanisme identifié à l'aide d'autres critères. Par exemple, pour l'érosion interne, des modules basés sur les essais développés ces dix dernières années comme le Hole Erosion Test (HET) [6] ou sur des critères comme ceux de Sellmeijer [10], de Kenney et Lau [11] ou encore de Li [12],

etc. pourraient aisément être ajoutés dans le catalogue et faire l'objet d'assemblage dans des scénarios de rupture avec d'autres modules existants.

## Conclusion et perspectives

Afin de rendre l'outil initial de calcul de l'aléa rupture de digue modulable et adaptable aux différents scénarios de rupture rencontrés sur les systèmes d'endiguement, en dehors de l'environnement Loire, le Cerema a développé les principes de l'outil de calcul CAROHL. Un démonstrateur a été développé sous Excel et un cahier des charges a été rédigé pour permettre son développement sous un environnement informatique plus efficace pour le traitement des données, les calculs et l'interfaçage avec les outils SIG.

Les recherches de financement et de partenariat engagées par le Cerema se poursuivent et permettront, nous l'espérons, le développement de cet outil qui facilitera la réalisation des études de dangers des systèmes d'endiguement de manière homogène sur le territoire national.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier France Dignes pour le soutien témoigné depuis l'initiative de ce projet.

## Références

- [1] Maurin J. *et al.* (2013). *Loire river levees hazard studies: failure modes model*. Dignes maritimes et fluviales de lutte contre les inondations. 2e Colloque national-Dignes2013, Hermes, 2013 Lavoisier, Paris
- [2] Durand E. *et al.* (2016). *River Loire levees hazard studies – CARDignes' model principles and utilization examples on Blois levees*. European Conference FloodRisk 2016, Lyon, France. DOI: 10.1051/e3sconf/20160703010
- [3] Piney S. (2011). *Retour d'expérience des brèches historiques du val d'Orléans*. Annexe 19 du Rapport DREAL CVL Étude de dangers – Levée d'Orléans.
- [4] Bligh W.G. (1927). *The practical design of irrigation works*. Van Nostrand Co., New York.
- [5] Durand E. *et al.* (2016). *CARDignes: An integrated tool for levee system diagnosis and assessment*. *International Conference on Scour and Erosion (ICSE8)*, Oxford, UK. Scour and Erosion – Harris, Whitehouse & Moxon (Eds) © 2016 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02979-8
- [6] Chevalier C., Bonelli S. (2017). *Collectif IREX. Guide ERINOH – Erosion interne dans les ouvrages hydrauliques - Volume 1- Méthodologie de caractérisation expérimentale*. Presse des Ponts
- [7] ICOLD (2014). *Internal Erosion in Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations*, Vol. 1: internal erosion processes and engineering assessment. ICOLD Bulletin n° 164, 2014.
- [8] Cerema (2015). *Étude de dangers des digues de classe B et C des vals du Blaisois*. Cerema rapport n°C14RB0060.
- [9] Cerema (2019). *Guide international sur les digues – The International Levee Handbook (CIRIA, 2013)*. Version française. Edition Cerema, Bron. Collection Références, 1485 pages.
- [10] Sellmeijer J.B., Lopéz de la Cruz J., Van Beek V. M., Knoeff J.G. (2011). Fine-tuning of the piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments. *Eur. J. Environ. Civ. Engng*, 2011, 15, No. 8: 1139–1154.
- [11] Kenney T.C., Lau D. (1985, 1986). Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(2), 215-225 et 23(3), 420-423
- [12] Li M. (2008). *Seepage induced instability in widely graded soils*. The University of British Columbia, Vancouver.