



HAL
open science

Mise en perspective de la situation des digues en France par comparaison avec les ouvrages de protection contre les inondations d'autres pays dans le monde

S. Patouillard, Yann Deniaud, B. Beullac, R. Tourment

► To cite this version:

S. Patouillard, Yann Deniaud, B. Beullac, R. Tourment. Mise en perspective de la situation des digues en France par comparaison avec les ouvrages de protection contre les inondations d'autres pays dans le monde. Dignes 2024, Mar 2024, Aix-en-Provence, France. 10.5281/zenodo.10592857 . hal-04539117

HAL Id: hal-04539117

<https://hal.science/hal-04539117>

Submitted on 9 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mise en perspective de la situation des digues en France par comparaison avec les ouvrages de protection contre les inondations d'autres pays dans le monde

Putting into perspective the French levees situation by comparison with flood protection structures in other countries around the world

S. Patouillard¹, Y. Deniaud², B. Beullac³, R. Tourment³

¹ DREAL Centre – Val de Loire (DETL), Orléans, France, sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

² Cerema, Plouzané, France, yann.deniaud@cerema.fr

³ INRAE, RECOVER, Aix Marseille Université, Aix-en-Provence, France, bruno.beullac@inrae.fr

Résumé

Depuis longtemps, les ingénieurs œuvrant sur les digues de protection contre les inondations sont amenés à échanger avec leurs homologues étrangers pour faire progresser les connaissances. Comme en témoigne, par exemple, l'action de la commission des ingénieurs étrangers suite à la crue catastrophique de 1879 à Szegegin en Hongrie (Annales des Ponts et Chaussées 1890). Plus récemment, le bulletin de la commission internationale des grands barrages (CIGB) "*Levees and flood defences across the world - Characteristics, Risks and Governance*" apporte un premier bilan de la situation des ouvrages de protection contre les inondations et des problématiques associées pour une vingtaine de pays comportant plus de 1 000 km de digues. Ce rapport, d'abord initié par un groupe d'experts européens, a été approuvé lors du dernier congrès de la CIGB qui s'est tenu à Marseille en juin 2022. Le rapport comprend une partie de synthèse et des parties détaillées pour chaque pays. La synthèse donne un aperçu global des ouvrages étudiés : leur ancienneté qui, pour certains, date de plusieurs millénaires, leur dimension qui représente plus d'un demi-million de kilomètres, leur rôle de protection qui concerne plus de 700 millions de personnes soit 10 % de la population mondiale. Les parties concernant chaque pays abordent les items suivants : faits et chiffres sur les digues, enjeux protégés et normes de sécurité, inondations récentes et ruptures de digues, législation et gouvernance, lignes directrices et bonnes pratiques, cycle de vie de la digue et besoins en termes de connaissances. L'objet de l'article est de présenter dans une première partie une synthèse de l'état des lieux des digues en France en suivant les items du bulletin et en mettant l'accent sur leurs spécificités françaises, dans une deuxième partie de donner les tendances et ordres de grandeurs de la situation pour l'ensemble des pays étudiés et, dans une troisième partie, de proposer une approche comparative des données de la France avec ces pays. Les données se révèlent encore trop fragmentaires pour assurer une bonne comparaison de la situation entre les pays, néanmoins les auteurs présentent quelques résultats de cette approche conduisant par exemple à proposer une première évaluation du patrimoine mondial des digues en termes de linéaire d'ouvrages et de population concernée.

Mots-clés

digues, inondations, gouvernance, données, patrimoine

Abstract

Engineers working on flood defences have long been involved in exchanges with their foreign counterparts in order to advance knowledge, as illustrated by the work of the Committee of Foreign Engineers following the catastrophic flood of 1879 at Szegedin in Hungary (*Annales des Ponts et Chaussées* 1890). More recently, the bulletin of the International Commission on Large Dams (ICOLD) "Levees and flood defences across the world - Characteristics, Risks and Governance" provides an initial assessment of the situation of flood defences and the associated issues for some twenty countries, each of which has more than 1,000 km of levees. Initially written by a group of European experts, the report was approved during the last ICOLD congress, held in Marseille in June 2022. The report includes a summary section and detailed sections for each country. The summary gives a global overview of the structures studied: their age, some of which dates back several millennia, their size, which represents more than half a million kilometers, and their protection role, which affects more than 700 million people, i.e. 10% of the world's population. The sections on individual countries cover the following items: facts and figures on levees, protected stakes and safety standards, recent floods and levee failures, legislation and governance, guidelines and good practice, the levee life cycle and knowledge needs. The purpose of this article is to present, in the first part, a summary of the situation of levees in France, based on the bulletin sections and highlighting French specific features; in the second part, to give trends and orders of magnitude for the situation in all the countries studied; and finally, in the third part, to propose a comparative approach between France and those countries. The overall data is still too fragmentary to ensure a precise comparison of the situation between countries, but the authors present some of the results of this approach, leading, for example, to an initial assessment of the world's levees portfolio in terms of levees length and affected population.

Key Words

levees, flooding, governance, data, heritage

ANNEXE 8 : FRANCE (2020)

FR-1 : Faits et chiffres sur les digues et les défenses contre les inondations en France

Le territoire de la France est constitué de 11 grands bassins hydrographiques : 6 sur le continent européen (Figure FR-1) et 5 outre-mer. Ces derniers ne sont pas traités dans ce rapport. Deux grandes familles d'ouvrages hydrologiques permettent d'assurer la protection contre les inondations (Figure FR-2) :

- Digues et structures similaires dont le but est d'empêcher l'eau (de la mer, d'une rivière, d'un lac ou d'un torrent) d'inonder une zone dite "protégée".
- Barrages ou bassins de rétention des crues (réservoirs hors ligne) dont le but est de stocker les eaux de crue et d'abaisser le débit de pointe de la crue, que l'on ne trouve généralement que sur les rivières ; certains d'entre eux ont une ou plusieurs fonctions autres que la rétention des crues.

En France, on compte environ 9300 km de digues recensées dans le Système d'Information Géographique national pour le Contrôle des Ouvrages Hydrologiques (SIOUH), environ 8500 km de digues continentales (rivières, lacs, torrents) et 500 km de digues maritimes (mer, estuaires). En prenant en compte les autres protections côtières (parapets et murs en pierre) une autre source (Cereima, 2018) donne le chiffre de près de 1300 km de digues maritimes. En conclusion, il y a un peu plus de 10 000 km de digues et de défenses contre les inondations recensées en France. Ces chiffres concernent principalement la première ligne de défense et non les ouvrages de protection secondaires ou andrarts (bonnes terres, épis, petites digues, etc.). La hauteur des digues peut aller jusqu'à 6 mètres, avec de possibles exceptions locales plus élevées.

Il existe environ 10 000 barrages, dont un peu plus de 800 sont répertoriés comme barrages de rétention des crues dans la Base de Données Nationale SIOUH ; selon les experts, il y aurait environ 200 000 barrages, dont la plupart ne seraient pas répertoriés. La plupart d'entre eux sont petits ou multifonctionnels. Un des plus hauts barrages de France, celui de Serre-Ponçon, a notamment pour vocation la rétention des crues, et mesure 124 m de haut pour un volume de retenue de 1,3 km³ (soit 1300 millions de m³). Les plus petits barrages de rétention des crues peuvent ne mesurer que quelques mètres de haut pour des volumes de retenue ne dépassant pas quelques milliers de m³ ; ils peuvent être construits sur des cours d'eau temporaires ou permanents, mais aussi parfois en dehors de cours d'eau.

Les systèmes de protection basés sur les digues comprennent souvent des structures qui sont multifonctionnelles. De nombreux ouvrages dans la vocation principale n'ont pas la protection contre les inondations ont en réalité ce rôle mais doivent néanmoins être inclus dans le système de protection pour que celui-ci soit performant. Il peut s'agir d'infrastructures linéaires de transport (routes, voies ferrées comme le montre la Figure FR-3, canaux de navigation) ou d'autres types de structures (infrastructures portuaires, bâtiments, etc.). Les systèmes de protection peuvent également inclure des éléments naturels tels que des dunes, des promontoires rocheux, etc. Les systèmes de protection comprennent également de nombreux types de structures hydrologiques annexes, comme les écluses, les vanes, les stations de pompage, etc. Il n'y a pas ou très peu (ou peut-être même aucune) de structures de protection temporaires comme des structures de surélévation temporaires ou des murs de protection contre les inondations, à l'exception des ouvertures des murs de digues qui peuvent être fermées manuellement avec des portes ou battoirs pendant les grandes crues. L'entretien régulier est généralement planifié à l'avance, ou peut être déclenché à la suite d'une inspection qui détecte certaines réparations à effectuer. Les réparations majeures doivent être décidées et définies après une évaluation complète, y compris un diagnostic des causes ou de des problèmes (excès/déficit potentiels).

Le coût de la protection contre les inondations fluviales en France a fait l'objet d'une analyse récente des coûts (Cereima, 2014). Parmi trois grands organismes de gestion de digues ayant chacun plus de 200 km de portefeuille de digues, les fonctionnaires des propositions cités sont les suivantes :

GRAND BASSIN HYDROGRAPHIQUE	SURFACE ¹ (en France) [km ²]	RIVIÈRES & AFFLUENTS ² [km]	DIGUES ³ [km]	Barrages de rétention ⁴ (nombre)
Rhône-Méditerranée	130,000	152,000	4900	375
Loire-Bretagne	154,500	135,000	1350	85
Adour-Garonne	118,000	120,000	1400	25
Senne-Normandie	95,000	85,000	850	485
Rhin-Meuse	31,500	30,000	300	35
Artois-Picardie	20,000	12,500	300	15
Total	551,500	605,000	9300	820

SOURCES : ¹Base des Bassins Hydrographiques Nationaux de l'Agence de l'Eau et de l'Environnement (ADEL) ; ²Système national d'information géographique pour le Contrôle des Ouvrages Hydrologiques (SIOUH) ; ³Système national d'information géographique pour le Contrôle des Ouvrages Hydrologiques (SIOUH) ; ⁴Base des Barrages Hydrologiques Nationaux de l'Agence de l'Eau et de l'Environnement (ADEL)

Vue des 3 premières pages de l'annexe France du 1^{er} bulletin de la CIGB sur les digues
Overview of the first 3 pages from France appendix of the 1st ICOLD bulletin on levees

Introduction

À la fin du XIX^e siècle, les accidents ayant affecté les digues en France avaient conduit à une perte totale de confiance dans ces ouvrages. Cependant, suite à la crue catastrophique de la Theiss en 1879 ruinant les digues de Svegedin, une commission d'ingénieurs a aidé leurs homologues hongrois à revoir leur conception. Cette même commission a conduit un retour d'expérience sur les nouvelles digues qui ont réussi à contenir les grandes crues de la Theiss de 1881 et 1888 pourtant plus importantes que la précédente. Le partage du nouveau standard de conception connu sous le nom de « profil hongrois » a redonné aux ingénieurs de la Loire des perspectives d'amélioration de leur conception des digues [1]. Cet exemple illustre comment les échanges entre pays confrontés aux mêmes difficultés ont pu faire progresser les connaissances dans le domaine des protections contre les inondations. Plus récemment, les échanges internationaux dans le domaine des digues se sont intensifiés avec notamment les travaux initiés par un groupe d'experts européen pour capitaliser les connaissances et les expériences dans un rapport commun publié en juillet 2018 [2]. Ces travaux ont conduit à la production du bulletin de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) "*Levees and flood defences across the world - Characteristics, Risks and Governance*" approuvé lors de son dernier congrès qui s'est tenu à Marseille en juin 2022. Ce rapport finalisé et prochainement disponible constitue un premier bilan mondial de la situation des ouvrages de protection contre les inondations et des problématiques associées.

1- Synthèse de l'état des lieux des digues en France

Faits et chiffres sur les digues

En France, le linéaire de digues de protection contre les inondations est estimé à plus de 10 000 km, ces chiffres concernant principalement les premières lignes de défenses des systèmes de protection. Si près de 9 300 km sont officiellement recensés (environ 8 800 km de digues continentales et 500 km de digues maritimes), les recensements spécifiques des protections côtières mentionnent près de 1 300 km de digues maritimes [3 ; 4] conduisant à compléter les chiffres officiels. La hauteur maximale moyenne des digues est de 6 mètres, avec des spécificités locales. Elles sont généralement construites en terre à partir de matériaux locaux, avec une histoire longue et complexe. Elles sont globalement hétérogènes et mal connues quand elles ne sont pas documentées dans les archives historiques ou récemment construites ou renforcées. Le matériau des digues fluviales est généralement limoneux ou argileux, tandis que celui des digues maritimes est souvent constitué d'un noyau sableux et limoneux, recouvert de roches ou de structures de protection rigides.



FIGURE 1. Digue fluviale près d'Orléans / digue côtière près des Saintes-Maries-de-la-Mer / digue de torrent à Domène / barrage de rétention des crues à Villerest (source : INRAE et DREAL Centre-Val de Loire).

La Figure 1 présente plusieurs types d'ouvrages de protection contre les inondations. Les systèmes de protection basés sur les digues comprennent souvent des structures multifonctionnelles. Certains ouvrages, dont la vocation principale n'est pas la protection contre les inondations, sont à inclure dans le système de protection pour que celui-ci soit performant. Ces ouvrages peuvent être des infrastructures linéaires de transport (routes, voies ferrées, canaux de navigation) ou d'autres types de structures (infrastructures portuaires, bâtiments, etc.). Les systèmes de protection peuvent également inclure des éléments naturels tels que des dunes, des promontoires rocheux, etc. Les systèmes de protection comprennent également de nombreux types de structures hydrauliques annexes, comme des écluses, des vannes, des stations de pompage, etc.

Des études de coûts de la protection contre les inondations fluviales en France réalisées en 2014 [5] et 2018 [6] ont donné les fourchettes de coûts suivantes :

- Entretien : 4 400 à 8 500 €/km/an ;
- Gestion : 2 000 à 3 800 €/km/an.

Enjeux protégés et normes de sécurité

En France, 17,1 millions de personnes vivent dans des zones à risque d'inondation fluviale, ce qui représente 5 % de la surface nationale, avec 9 millions d'emplois situés dans ces zones [7]. Près de 1,4 million de personnes vivent dans des zones exposées aux inondations maritimes, et 850 000 emplois y sont situés. Les principaux systèmes de protection contre les inondations "protègent" environ 20 000 km² et environ 2 millions de personnes, mais il est probable qu'un nombre encore plus important de personnes bénéficie d'un certain degré de protection par des digues.

Depuis 2017, la législation nationale demande que les niveaux de protection des systèmes d'endiguement soient caractérisés par un état de charge (un niveau d'eau) pour lequel la probabilité de rupture des ouvrages est inférieure ou égale à 5 % (niveau de sûreté). Cette législation demande également d'estimer le risque d'inondation pour les scénarios de brèche qui résultent d'un dépassement du niveau de danger, caractérisé par une probabilité de brèche d'au moins 50 %. Les niveaux de sollicitations liés à un système d'endiguement sont représentés dans la Figure 2.

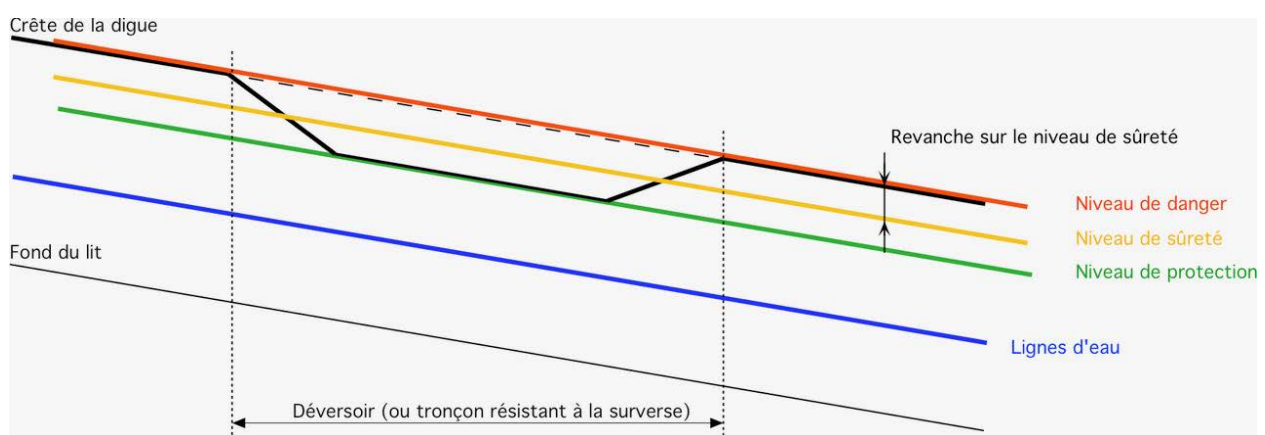


FIGURE 2. Niveau de protection, niveau de sûreté et niveau de danger le long d'un système d'endiguement fluvial résistant au débordement en raison d'un déversoir (source : Rémy Tourment).

Pour les anciens systèmes de digues, il n'existe pas de norme de sécurité uniforme à l'échelle nationale pour le niveau de protection contre les inondations, qu'il appartient aux autorités locales de définir. Les niveaux de protection contre les inondations, définis réglementairement par une hauteur d'eau, correspondent à une probabilité annuelle de survenue d'une crue. Cette probabilité est généralement comprise entre 1/5 et 1/20 dans les zones agricoles et entre 1/20 et 1/200 dans les zones habitées. Mais cette probabilité peut atteindre 1/1 000 dans certains territoires (zones densément habitées du delta du Rhône). Pour les nouveaux systèmes d'endiguement, la probabilité annuelle de crue associée au niveau de protection dépend du nombre de personnes potentiellement présentes dans la zone protégée : au moins 1/200 pour les zones protégées de plus de 30 000 personnes, au moins 1/100 pour celles entre 3 000 à 30 000 personnes et 1/50 pour celles de moins de 3 000 personnes.

Il n'existe pas non plus de norme uniforme pour le niveau de sûreté des digues. Des règles d'ingénierie s'appliquent aux digues pour la conception ou les vérifications de conformité. Le CFBR publie des recommandations sur la manière d'effectuer ces vérifications, mais il n'existe pas de valeur fixe pour le niveau de sûreté, qui est, comme le niveau de protection, laissé à l'appréciation des acteurs locaux (bien que le niveau de sûreté d'un système neuf ou rénové doive être au moins égal au niveau de protection - voir ci-dessus).

Inondations récentes et ruptures de digues

Depuis 1789, plus de 220 événements de crue ont été enregistrés dans la base de données historique des crues en France [8]. Environ quarante de ces événements incluent explicitement des ruptures de digues et sont présentés sous forme d'un tableau dans le rapport. Les événements les plus récents sont repris dans le Tableau 1 suivant.

TABLEAU 1. Événements récents de crues avec ruptures de digues.

Nom	Dates	Descriptions
Tempête Xynthia	2010	Combinaison de vents forts et de fortes marées donnant lieu à une onde de tempête et à une submersion marine provoquant de graves inondations dans certaines régions côtières (Charente-Maritime et Vendée). Les conséquences ont été très importantes : 49 morts, 2,5 milliards d'euros de dommages directs et 200 km de digues à reconstruire
Crues de l'Agly	2013 2014 2020	Nombreuses occurrences de dommages et plusieurs brèches sont identifiées sur les digues. Les inondations qui en ont résulté ont provoqué d'importants dégâts matériels dans le secteur protégé [9]

Législation et gouvernance

Le Décret du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques conduit à une évolution importante en matière de réglementation des digues. Il met notamment l'accent sur la protection contre les inondations apportée à la population et pas seulement sur la sécurité des ouvrages. Un résumé de ces aspects réglementaires a fait l'objet d'une publication récente [10].

Les lois du 27 janvier 2014 (L.2014-58) et du 7 août 2015 (L.2015-991) ont également confié à l'échelon intercommunal une compétence exclusive pour la Gestion des Milieux Aquatiques et la Prévention des Inondations (GEMAPI). Les digues d'un système hydrauliquement cohérent sont

ainsi placées sous la responsabilité d'un unique gestionnaire. L'État (ministère en charge de l'environnement) est chargé du contrôle de l'application de la réglementation par le gestionnaire. La sécurité de la population reste une attribution du Maire de la commune et du Préfet de département. L'alerte et la gestion de crise sont de leur responsabilité sur la base, entre autres, des informations données par les gestionnaires de systèmes d'endiguement.

Guides et bonnes pratiques

Il n'existe pas de guides ou document technique à valeur réglementaire ou prescriptif.

Le ministère français en charge de l'environnement a publié en 2015 un "Référentiel technique des digues maritimes et fluviales" [11] pour fournir une base technique et un vocabulaire partagé à l'ensemble des acteurs. Le CFBR publie des documents d'orientation générale tels que les « recommandations pour la justification des barrages et digues en remblais » [12] et le recueil en deux parties sur les « techniques de réparation et de renforcement des digues » [13].

L'*International Levee Handbook (ILH)* [14], désormais accessible en français [15], est utilisé par une partie de la profession. Le « Guide Enrochement », traduction française du *Rock Manual*, est également utilisé par de nombreux concepteurs [16].

Enfin INRAE et le Cerema ont publié différents manuels pour l'analyse, l'évaluation, l'investigation, l'inspection et la gestion des risques sur les digues (fluviales ou maritimes), qui sont utilisés comme référence par de nombreux membres de la communauté des digues (gestionnaires, ingénieurs, etc.).

Besoins en termes de connaissances

Les premières lacunes concernent l'inventaire des ouvrages (digues et structures de protection) et de leurs responsables (propriétaires et gestionnaires) ainsi que les données de caractérisation de leur nature et de leur état.

Les outils et méthodes de modélisation et d'estimation des probabilités des événements s'améliorent continuellement et sont à actualiser régulièrement. Des recherches spécifiques sont encore nécessaires pour mieux estimer les charges hydrauliques marines affectant les systèmes d'endiguement côtiers, et mieux comprendre les mécanismes de défaillance et leur séquençement dans la modélisation des scénarios complexes de rupture. Des défis importants restent encore à relever dans la conception et le développement de méthodes d'analyse de risques liées aux systèmes de protection, en particulier pour l'analyse et la probabilisation des défaillances des systèmes, l'analyse des conséquences des inondations, l'attribution des risques et leur communication. Le manque de données suffisantes pour soutenir l'analyse de fiabilité des ouvrages reste un challenge, ainsi que les simplifications inhérentes aux processus et méthodes de modélisation appliquées en pratique. Enfin, les effets à attendre du changement climatique sont également, comme dans beaucoup d'autres pays, sources d'incertitudes majeures, tant en termes de charges hydrauliques futures que de comportement des ouvrages hydrauliques.

2- Tendances de la situation des digues dans le monde

Les tendances de la situation des digues dans le monde sont approchées à partir des données du bulletin renseignées par les pays impliqués dans les instances internationales, récemment constituées, sur la question des digues (Comité Technique LE de la CIGB). Cette approche reste donc partielle puisqu'elle ne s'appuie que sur 23 pays (soit environ 12 % des pays recensés dans

le monde). La plupart des digues sont situées le long de cours d'eau, mais, dans certains pays (notamment en Europe occidentale), une proportion importante se trouve sur le littoral ou au bord de lacs. Les digues urbaines, les murs anti-inondations et autres ouvrages hydrauliques spécifiques ont un rôle de protection important malgré le petit linéaire qu'ils représentent. Les digues ont généralement une hauteur de l'ordre de quelques mètres, mais peuvent parfois dépasser 10 mètres et donc se rapprocher de la hauteur des grands barrages (au sens de la définition de la CIGB), tandis que leur longueur est généralement (beaucoup) plus longue que celle des barrages. Les digues documentées dans le bulletin offrent une certaine protection contre les inondations à près de 720 millions de personnes, soit environ 10 % de la population mondiale. La plupart de ces personnes vivent en Chine, mais les digues japonaises, européennes et nord-américaines protègent également des dizaines de millions de personnes. Aucun chiffre exact n'est encore disponible pour la plupart des autres continents.

Les informations sur la valeur économique protégée sont très fragmentaires. Dans certains pays avec une forte population et/ou des enjeux économiques importants dans des zones sujettes aux inondations et/ou protégées par les digues, la valeur protégée est d'un ordre de grandeur de 1 000 milliards d'euros. Dans plusieurs autres pays, la valeur économique protégée par les digues est d'au moins plusieurs milliards d'euros.

Plusieurs pays ont connu des ruptures de digues au cours des 50 dernières années. Les causes courantes de défaillance sont la surverse, l'érosion interne, les problèmes de conduites traversant les digues, les problèmes de transition entre différentes structures, le glissement de talus, et même pour une occasion la sécheresse. Dans certains cas, l'effondrement du sol (dû au drainage, à l'exploitation minière et/ou à des phénomènes karstiques) peut également augmenter les risques.

Dans le passé, plusieurs défaillances catastrophiques de digues se sont produites. Aujourd'hui, du fait de l'amélioration des pratiques dans les zones à forts enjeux, on pourrait s'attendre à ce que les défaillances à faible conséquence soient les plus courantes. Néanmoins, certaines inondations des 25 dernières années ont démontré que des crues catastrophiques faisant plus de 1 000 victimes peuvent encore se produire, et constituent un risque majeur. Plusieurs inondations des dernières décennies ont causé chacune plus d'un milliard d'euros de dégâts, mais certaines inondations ont causé plus de 10 milliards d'euros de dégâts, un cas dépassant même le seuil de 100 milliards d'euros.

La législation relative aux digues est presque toujours une législation nationale. Plutôt concentrée sur un niveau de politique générale de la gestion des risques d'inondation, sans focus particulier sur les digues, la directive cadre européenne sur les inondations a pu cependant, dans certains cas, motiver la révision des normes de sécurité et/ou la mise en œuvre de travaux de renforcement des digues.

Dans plusieurs pays, barrages et digues relèvent de la même législation et donc de réglementations identiques ou similaires. Il paraîtrait donc nécessaire de vérifier l'applicabilité des pratiques barrages aux digues, et vice-versa.

La plupart des digues ont des standards de sécurité (ou de protection) explicites, mais avec toutefois des définitions variables d'un pays à l'autre. La probabilité de crue correspondante est souvent de l'ordre de 1/100. Toutefois, dans les zones présentant de nombreux enjeux exposés aux inondations, elle a tendance à être plus élevée et des valeurs de l'ordre de 1/1 000 ou 1/10 000 deviennent courantes. Inversement, dans certains pays, pour les zones présentant peu d'enjeux exposés aux inondations, elles peuvent être plus souples qu'une valeur imposée de 1/100 minimum.

La gouvernance liée aux digues est assez complexe dans de nombreux pays, avec des différences significatives entre les pays, voire entre les États au sein des pays fédéraux. Malgré ces différences, de nombreux acteurs sont souvent impliqués.

La plupart des pays s'appuient sur des règles de l'art nationales, souvent inspirées des bonnes pratiques internationales issues de l'ILH [15] ou des bulletins de la CIGB. Les ouvrages de référence internationaux sont rarement utilisés directement, bien que cela puisse évoluer avec la diffusion et l'utilisation de l'ILH dans davantage de pays.

Les inspections des digues et les évaluations de la sécurité sont généralement programmées moins fréquemment et/ou moins systématiquement que pour les grands barrages, ce qui correspond quelque peu aux pratiques recommandées par la CIGB pour les petits barrages.

Il est intéressant de noter que l'entretien des digues se fait à un coût financier relativement faible alors que la (re)construction de digues est souvent relativement coûteuse, de l'ordre de 1 à 2 millions d'euros par kilomètre et plus dans les zones complexes/urbaines.

3- Approche comparative de la France avec d'autres pays

Les renseignements apportés dans les annexes du bulletin pourraient en partie constituer une base de données dont l'exploitation permettrait de tirer des enseignements de la comparaison entre pays. Dans une première étape, les données du bulletin ont été organisées par pays suivant plusieurs champs sélectionnés pour leur caractère *a priori* « comparable » : population et surface du pays, linéaire de digues, hauteur des digues, répartition maritime/fluviale, enjeux concernés en nombre de personnes / en valeur monétaire / en surface, financement annuel, dommages annuels en valeur monétaire, normes nationales. À partir de ces champs, il semble possible de déterminer des ratios permettant des comparaisons entre pays. En pratique, les données concernant les digues sont encore très fragmentaires et souvent renseignées avec des référentiels différents.

Le Tableau 2, présente par exemple quelques résultats généraux à partir du linéaire de digues exploitables sur l'ensemble des pays en ajoutant les données de 12 pays (malheureusement incomplètes) issues du bulletin mais dont les annexes ne sont pas encore disponibles. Pour pallier le manque de données, nous pouvons restreindre la comparaison à certains champs et aux pays qui ont renseigné ces champs, comme montré dans la dernière ligne du tableau pour la « population protégée ». Un résultat intéressant est que le linéaire de digues de la France ramené à sa surface correspond au ratio des 23 pays considérés.

TABLEAU 2. Calcul de sommes et ratios pour la France et l'ensemble des pays.

	Linéaire de digues =LD (Mkm)	Surf. Pays =SP (milliers de km ²)	Pop. Pays =PP (Mhab)	Pop. Protégée =PPr (Mhab)	LD/SP (km/km ²)	LD/PP (km/hab)	LD/PPr (km/hab)
23 pays	0,677	36 555	2 548,2		1,85.10 ⁻²	2.66.10 ⁻⁴	
23 pays + 12	0,721	52 112	4 597,9		1,38.10 ⁻²	1.57.10 ⁻⁴	
France	0,010	552	64,7	2	1,81.10 ⁻²	1.55.10 ⁻⁴	50.10 ⁻⁴
13 pays (PPr)	0,637	31 860	2 548,2	719.5	1,2.10 ⁻²	2.5.10 ⁻⁴	8.85.10 ⁻⁴

Si on utilise des ratios relatifs à la population pour estimer l'ordre de grandeur du linéaire de digues et la population protégée au niveau mondial on obtient 2 millions de kilomètres et un ordre de grandeur de 2,5 milliards de personnes (sur la base d'une population totale de 8 milliards d'individus). Il ne s'agit là que d'une première estimation qui méritera d'être affinée avec des données plus complètes.

À la suite, sont présentés les principaux faits et chiffres clefs de quatre pays de référence.

La Chine

La Chine compte 413 679 km de digues, certaines ayant été initialement construites il y a plus de deux mille ans. Elles protègent 610 millions de personnes et 41 millions d'hectares de terres arables. Les deux tiers du pays sont soumis au risque d'inondation, les Chines orientale et méridionale, représentant 50 % de la population et générant deux tiers des productions industrielles et agricoles, étant en moyenne les zones les plus sévèrement touchées.

Les normes de contrôle des inondations associées aux digues et à leurs enjeux protégés sont exprimées en termes de périodes de retour de crues ou d'ondes de marées. Des recommandations relativement intégrées, ont été produites et couvrent la conception des digues, les normes de contrôle des inondations, les spécifications pour la construction, l'exploration des désordres et d'autres aspects. Elles vont être complétées dans le futur au regard des pratiques actuelles de l'ingénierie.

Les Pays-Bas

Les Pays-Bas comptent environ 3 500 km de digues, d'une hauteur de 3 à 10 m (6 m en moyenne), implantées pour 30 % le long des rivières, 30 % en estuaires, et le reste le long des lacs et de la côte. 60 % des terres et environ 70 % de la population et de l'économie du pays sont soumis au risque d'inondation en l'absence de digues. Il s'agit de 12 millions de personnes ou 400-500 milliards d'euros de production économique annuelle, et au moins 1 000 milliards de valeurs de biens protégés.

Les standards de sécurité sont inclus dans la loi, qui mentionne d'une manière générale les documents de référence recommandés. Près des deux tiers des ouvrages respectent les anciens standards de sécurité (événement de fréquence annuelle de 1/250 à 1/10 000 selon les secteurs), les nouveaux standards de sécurité ayant été renforcés (événement de fréquence annuelle de 1/300 à 1/100 000). Le niveau de protection réel actuel est autour d'une fréquence annuelle de 1/1 000 (il était plus faible autrefois). Les coûts des dommages sont limités en raison de la forte protection. Le budget national de renforcement des ouvrages est de 360 millions d'euros par an, les dépenses d'entretien régulier étant probablement plus faibles. Le coût au kilomètre est généralement de l'ordre de 50 000 euros par an pour l'entretien régulier et de 1 à 30 millions d'euros par kilomètre pour chaque mise à niveau importante.

Angleterre (seules données disponibles pour le Royaume Uni)

L'Angleterre compte environ 8 000 km de digues de 1 à 6 m de hauteur, et 22 000 structures hydrauliques ou de protection contre les inondations (70 % cours d'eau, 18 % estuaires et 10 % littoral). 2,4 millions de propriétés et un nombre significatif d'infrastructures critiques sont soumis aux risques d'inondation. Les standards de sécurité sont variables. Généralement de 1/100 ou 1/200 par an, ils peuvent s'élever à 1/1 000 par an pour les grands projets à haut risque, et aller de 1/5 par an à 1/100 par an pour les zones à risques plus faibles. Les digues littorales ou des

principaux cours d'eau sont gérées par l'État, les 50 % restant par d'autres acteurs publics ou privés (programmes de maintenance annuels basés sur les risques, inspections tous les 0.5 à 5 ans selon les risques et gestion des événements de crues). Les coûts de renforcement sont légèrement inférieurs à 1 million d'euros par kilomètre. La législation sur les barrages apparaît plus spécifique que celle sur les digues.

Les États-Unis d'Amérique

Au total il y a probablement plus de 160 000 km de digues aux États-Unis. Beaucoup de ces ouvrages ont un historique de construction long et complexe et sont souvent gérés par des entités non fédérales. Elles respectent généralement un standard de sécurité de période de retour annuelle de 1/100, correspondant au niveau d'accréditation minimal des assurances. Les lois sur la protection contre les inondations procèdent aussi d'un long historique et il existe quelques divergences entre la législation sur les barrages et celle sur les digues. L'USACE joue un rôle clef en fournissant des documents d'orientation et des recommandations techniques.

En 2011, plus de 260 milliards de dollars de dommages liés aux inondations ont été évités par les digues. Depuis 1927, la rentabilité des investissements dans la protection a été multipliée par 8.

TABLEAU 3. Comparaison de données et ratios entre la France et certains pays.

	LD (Mkm)	Digues littorales	SP (milliers de km ²)	PP (Mhab)	PPr (Mhab)	SPr (km ²)	Dommages évités (M€/an)	LD/SPr (km/km ²)	DE/LD (€/an/km)
France	0,010	10%	552	64,7	2	20 000	550	0,5	55 000
Belgique	0,001	?	31	11,7	1	?	?	?	?
Suisse	0,001	0%	41	8,8	1.8	?	?	?	?
Allemagne	0,010	?	358	83,3	12	?	?	?	?
Chine	0,414	?	9 597	1 426	600	410 000	?	1,01	?
Pays-Bas	0,003	40 %	42	17,6	12	25 110	?	0,14	?
Angleterre	0,008	10 %	244	67,7	5	?	?	?	?
USA	0,160	?	9 832	340	20	?	230	?	1 450

Le Tableau 3 propose un exemple de résultats apportés par la base de données en restreignant l'analyse à 3 pays avec des cours d'eau partagés avec la France (Allemagne, Suisse et Belgique) ainsi que les 4 pays de référence. Malgré des enseignements intéressants mais qui restent à approfondir, on constate que les données restent très lacunaires et mériteraient un travail complémentaire à conduire entre les pays.

Conclusion

L'implication des différents pays dans les instances internationales, récemment constituées, sur la question des digues (Comité Technique LE de la CIGB) et la structuration des activités digues au sein des comités nationaux sont en croissance et en évolution constante. Cette situation facilite et

stimule le partage des connaissances et l'amélioration des pratiques pour les différents pays. Le bulletin « *Levees and flood defences across the world - Characteristics, Risks and Governance* » donne un aperçu global des digues et des défenses contre les inondations couvrant plus de 23 pays à travers le monde et représentant plus de 720 000 kilomètres de digues. L'article présente une partie des éléments de ce rapport en cours de publication avec d'abord un état des lieux des digues en France, puis les tendances et ordres de grandeurs de la situation pour l'ensemble des pays étudiés. Dans une dernière partie, il est proposé d'exploiter les renseignements du bulletin dans une base de données pour en tirer des enseignements par des comparaisons entre pays. À partir de quelques essais d'utilisation de cette base dans une approche comparative des données de la France avec quelques pays, l'analyse se heurte vite au nombre insuffisant de données suffisamment homogènes entre elles. Les annexes renseignées par les pays sont par ailleurs le reflet, à un instant T, d'une situation en pleine évolution. Il est ainsi envisagé un formalisme numérique des annexes par pays pour que de nouveaux pays puissent contribuer en complétant le recensement et que les données puissent être mises à jour sur un pas de temps qui resterait à définir. Il serait aussi important d'identifier certaines données de référence pour lesquelles les définitions et modes de calcul devraient être formalisés et partagés afin de faciliter leur exploitation ultérieure.

Remerciements

Les auteurs remercient les membres du comité technique "Levees" de la CIGB qui ont œuvré à la production du bulletin ainsi que les membres du groupe miroir français qui ont apporté leur appui à ce comité. Ils remercient plus spécifiquement Marcel Bottema, Robert Slomp, Frédéric Leseur et Christian Holzgang pour leur contribution à la traduction en français.

Références

- [1] Mazoyer (1892). *Note sur les digues insubmersibles de la Loire Centrale*, 21p + plans
- [2] ICOLD European Club (2018). *European and US Levees and Flood Defences/Characteristics, Risks and Governance*
- [3] Cerema (2018). *Cartographie des ouvrages et aménagement littoraux*. Géolittoral
- [4] Hédou F., Leclerc B., Deniaud Y., Costa S. (2020). « Consolidation des connaissances nationales sur le trait de côte et son évolution ». In : XVI^e Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil. Le Havre : Éditions Paralia, 2020
- [5] Cerema (2014). *Coût des protections contre les inondations fluviales*. Cerema, 2014. 162 p. ISBN : 978-2-37180-003-8
- [6] Cerema (2018). *Coût des protections contre les aléas littoraux*. Cerema, 2018. 248 p. ISBN : 978-2-37180-283-4
- [7] MEDDE (2012). *Première évaluation nationale des risques d'inondation – EPRI 2011*
- [8] METES (2019). *Base de données historiques sur les inondations*. <https://bdhi.developpement-durable.gouv.fr>
- [9] Tourment R., Benahmed N., Nicaise S., Mériaux P., Salmi A., Rougé M. (2018). *Lessons learned on the damage on the levees of the Agly river. Analysis of the sand-boils phenomena – ICOLD*, Vienna 2018.
- [10] Tourment R. Beullac B. Deniaud Y. Ledoux P. Leseur F. Mallet T. Patouillard S. (2021). « *The new French regulation on flood protection works: consequences on risk management* ». 4th European Conference on Flood Risk Management
- [11] MEDTL (2015). *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*.
- [12] CFBR (2015). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*.
- [13] CFBR (2021). *Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai - Partie I & II - Cadre général*. ISBN : 979-10-96371-17-4.
- [14] CIRIA (2013). *The International Levee Handbook*. London: CIRIA
- [15] Cerema (2019). *Guide international sur les digues*, ISBN 978-2-37180-403-6

12 Mise en perspective de la situation des digues en France par comparaison avec les ouvrages de protection contre les inondations d'autres pays dans le monde

[16] CIRIA, CUR, CETMEF (2009). *Guide Enrochement - L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - Version française du Rock Manual* (2e édition) Compiègne. 1302 p. ISBN : 978-2-11-098518-7