

Retour d'expérience sur les travaux post-Xynthia en Pays de la Loire

Feedback on post-Xynthia constructions in Pays de la Loire

F. Leseur¹, F. Pondevie¹

¹ DREAL Pays de Loire, Nantes, frederic.lesueur@developpement-durable.gouv.fr

Résumé

Les 27 et 28 février 2010, les Pays de la Loire ont été touchés par la tempête Xynthia. Cet épisode particulièrement violent et dévastateur restera gravé dans les mémoires, par le nombre de ses victimes et par l'ampleur des dégâts causés. Ces dégâts ont nécessité des réparations d'urgence puis des confortements et/ou rehausses pérennes des digues. À des degrés divers, ces travaux ont concerné environ 180 km de digues, et tous ne sont pas encore réalisés. Pour ces opérations, les gestionnaires sont accompagnés par le Service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques de la DREAL des Pays de la Loire (Ministère de la transition écologique et solidaire), qui procède aussi à des inspections réglementaires et techniques des digues. Il est fait le constat que l'efficacité et la pérennité des travaux ne sont pas à la hauteur de ce qui était attendu.

Cette publication présente un retour d'expérience sur ces opérations. Par type d'ouvrage, elle fait le point sur les problèmes rencontrés par l'emploi de certains matériaux et/ou certaines méthodes de mise en œuvre, et explique sommairement les raisons de ces difficultés. Dans la mesure du possible, ces expériences aboutissent à des pistes potentielles d'amélioration pour tous les acteurs.

La publication rappelle l'intérêt des reconnaissances topographiques et géotechniques préalables, et la nécessité de mener le plus loin possible les investigations, les analyses et les calculs en phase avant-projet, pour les configurations à venir et pour la phase de leur réalisation. La publication aborde aussi l'importance de la communication auprès du public afin que leurs propres actions ne nuisent pas à la pérennité des ouvrages.

Mots-Clés

Digue, travaux, tempête, expérience, recommandation.

Abstract

On February 27 and 28, 2010, the region of Pays de la Loire was hit by the storm Xynthia. This particularly violent and devastating episode will remain etched in memory by the number of its victims and by the extent of the damage caused. This damage generated necessitated emergency repairs and then reinforcements and/or permanent extensions of the regional levees. To varying degrees, this work involved about 180 km of levees, all have not yet been completed. The administrators are accompanied Management is supported for these operations by the Service of control of the and safety of the hydraulic structures of the DREAL of Pays de la Loire (Ministry of Ecological and Solidarity Transition), which also carries out regulatory and technical inspections of the levees. These actions sometimes show that the efficiency and sustainability of the work are not up to what was initial expectations expected.

This publication presents feedback on these operations. By type of construction, it takes stock of the problems encountered by the use of certain materials and/or certain methods of implementation and explains briefly the reasons for these difficulties. These experiences lead to potential improvements for all actors involved as far as possible.

This publication recalls the interest raises awareness of the importance of prior preliminary topographical and geotechnical reconnaissance, and the need to conduct, as far as possible, the investigations, analyzes analyses and calculations in the upstream phase for the future configurations and for the phase of their realization implementation phase. This publication also treats raises the importance of communication communicating these issues to the public at large so that their own actions do not harm the sustainability of the works.

Key Words

Levee, constructions, storm, experience, advice.

Introduction

Dans la nuit du 27 au 28 février 2010, les côtes ligériennes ont été balayées par la tempête Xynthia, qui a généré de nombreuses victimes et de nombreux dégâts, y compris sur les ouvrages de défense contre la mer. Ces ouvrages ont fait l'objet de travaux d'urgence (plus ou moins adaptés), puis de confortements et/ou rehausses essentiellement menés dans le cadre de Programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI).

Lors de ces opérations, diverses difficultés ont été rencontrées qui justifient d'en tirer un bilan et de proposer quelques recommandations.

La présente publication aborde diverses situations en expliquant les difficultés rencontrées, en cherchant à en établir les causes et les conséquences, et surtout en veillant à en tirer des leçons pour les opérations à venir.

Cette contribution n'est pas un jugement sur les pratiques des uns et des autres : il s'agit juste de partager des constats pour progresser ensemble.

Diagnostic après tempête

Au moment de la tempête Xynthia et en région Pays de la Loire, peu de digues littorales ou ouvrages assimilés étaient classés au titre du décret du 11 décembre 2007 [1], peu avaient bénéficié d'un diagnostic initial et aucun n'avait fait l'objet d'une étude de dangers. La connaissance de la géométrie et de la géotechnique des ouvrages étaient donc relativement faibles.

Cadre des travaux d'urgence

Après le passage de Xynthia, les digues détériorées ont fait l'objet de travaux d'urgence qui se sont souvent déroulés selon des méthodes et avec des matériaux déterminés par les entreprises, sans intervention de maîtres d'œuvre et encore moins de maîtres d'œuvre agréés. Ceci a eu au moins deux conséquences.



Travaux d'urgence, la Faute-sur-Mer

La première est qu'il n'y a pas eu d'analyse des ouvrages

détériorés (taille des brèches, profils des ouvrages après surverse, natures et couches de matériaux dans le corps de digue...). Le retour d'expérience [2] réalisé par le CEREMA n'a pas pu faire état de tout ce qui s'était réellement passé pendant et après la tempête et il n'y a pas eu d'analyses des ouvrages détériorés (certains ayant été recouverts directement après la tempête pour être confortés). Cette connaissance manque, notamment pour l'appréciation de la stabilité des ouvrages et les conditions possibles de leur dégradation.

La seconde est que des travaux provisoires n'ont pas encore été repris par des confortements définitifs et que la connaissance fine des réparations effectuées (nature des matériaux, mise en œuvre...) n'est pas disponible. L'appréciation des performances de ces réparations est donc difficile voire impossible. La seule information disponible est que certaines réparations montrent des pathologies.

Première étude de dangers

En Pays de la Loire, Xynthia a conduit à une accélération du classement des ouvrages de protection, qui a imposé la réalisation de diagnostic initial de sûreté et d'étude de dangers. Les objectifs et conditions techniques de réalisation de ces études n'ont pas été clairement définis par les textes législatifs et réglementaires, notamment sur le niveau de connaissance à avoir des performances mécaniques des ouvrages. Les considérations économiques ont fait que ces études se sont déroulées avec peu de données géotechniques : les diagnostics ont été essentiellement visuels, et les études de dangers ont été souvent menées avec des approches forfaitaires (performance des ouvrages, modes de défaillances).

À cela s'ajoute une confusion fréquente entre niveau de protection [3] et niveau de crête [4], le premier étant souvent assimilé au second alors qu'il ne reflète pas de la réelle capacité d'une digue à résister aux contraintes qui la sollicitent.

Les premières études de dangers n'ont donc pas toujours permis d'établir l'efficacité des ouvrages. L'absence de connaissance fine des conséquences de Xynthia sur les digues n'a pas permis de rédiger des consignes de gestion à la hauteur des enjeux (peu de surveillance formalisée, pas toujours par du personnel compétent, peu de prise de conscience de l'importance des visites techniques approfondies).

Recommandations

Concernant la qualité des données géométriques et géotechniques, l'arrêté du 7 avril 2017 [5] introduit la nécessité d'un diagnostic approfondi qui ne devrait plus être un simple diagnostic visuel. Pour autant, l'obligation de recourir à une connaissance des ouvrages issue d'essais in-situ et de laboratoire n'est toujours pas imposée. Le décret du 12 mai 2015 [6] renvoie clairement au gestionnaire la responsabilité de définir (donc de garantir) le niveau de protection de ses ouvrages. Avec les éléments naturels

contribuant à la défense de la zone protégée le cas échéant. Il est donc dans son intérêt d'avoir une connaissance précise de ses ouvrages, qui ne peut passer que par un levé topographique, des essais et un diagnostic géotechnique et/ou de génie-civil, et des calculs justifiant la réalité du niveau de protection annoncé. À défaut d'obligation réglementaire, il est conseillé aux gestionnaires d'investir dans ce diagnostic approfondi, qui produira également des données nécessaires en cas de travaux à dimensionner. Il importe aussi que les modes de défaillance soient étudiés dans les études de dangers selon la réalité des ouvrages et non selon des méthodes forfaitaires, et que les prémices de ces défaillances soient détaillées dans les consignes pour qu'elles puissent être repérées et suivies lors des visites périodiques.

Travaux sur perrés maçonnés et bétonnés

Les perrés maçonnés sont parmi les ouvrages les plus anciens de la région. Ils ont souvent une forte valeur patrimoniale et paysagère.

Dégradation des perrés maçonnés

Les perrés maçonnés ont été bâtis pour protéger des ouvrages anthropiques ou des cordons dunaires de l'action des vagues et/ou du marnage. L'étanchéité du parement est d'autant plus importante qu'elle permet d'éviter l'érosion interne. La stabilité générale des ouvrages est donc directement liée à la performance des perrés, tant pour la mécanique que pour l'étanchéité.

Ces perrés ne sont pas des murs de soutènement : ils ne sont pas auto-stables. Leur pérennité est donc liée à la pérennité des structures qu'ils protègent. Ces ouvrages doivent donc être abordés de manière globale selon l'analyse fonctionnelle préconisée par l'IRSTEA [7].

Les perrés maçonnés sont sur des sols meubles. La stabilité du pied est assurée soit par des ensembles pieux-platelage bois, soit par des palplanches en bois. Ces fondations sont sensibles à l'action de l'eau et de l'air, et doivent leur pérennité à leur enfouissement. Celui-ci peut être compromis en cas d'érosion de pied dans les chenaux ou d'abaissement du profil de plage (qui génère aussi des vagues plus hautes et des franchissements plus importants).

Les désordres rencontrés après Xynthia avaient souvent des causes plus anciennes : dégradation des joints avec ou sans végétation, affouillement du pied, franchissements et érosion du talus arrière des digues ou des cordons dunaires.

Réparation des perrés maçonnés

Les réparations effectuées sur ces ouvrages consistent généralement en des reprises du parement et/ou reprise du pied. Les travaux liés à la reprise des parements aval seront abordés avec les travaux de remblais.

La reprise des parements nécessite un retrait complet de la végétation, un dégarnissage des joints, une reprise éventuelle du parement, un rejointoiement. Diverses difficultés ont été

rencontrées. La première concerne le dégarnissage des joints, mené sur une profondeur de 1 à 2 cm. Il est suivi d'un rejointoiement mené sur la même profondeur. L'expérience montre que ces réparations ne sont généralement pas durables.



Mauvaise qualité du rejointoiement, Noirmoutier

La seconde concerne le traitement des vides. L'absence d'étanchéité dans le parement maçonné entraîne le départ de fines. Ce phénomène est amplifié par la présence de végétation et/ou l'absence de moellons dans le parement. Lorsque des moellons sont manquants, la réparation ne pose pas de difficultés. C'est moins évident quand les fuites de matériaux ne se font que par les joints et/ou vers l'arrière. Il est donc nécessaire de veiller à ce que ces vides soient bien repérés et bien traités.

La troisième difficulté concerne le traitement des dispositifs de pied. Lorsque l'ouvrage d'origine n'est pas modifié, les structures de pied sont généralement simples. Mais il arrive que la plage ait connu des profils bas par le passé, qui ont entraîné des interventions dont la documentation n'est pas disponible. Ainsi il arrive que des structures complexes soient mises à nu, ne facilitant pas la pose de protection supplémentaire de pied.

La quatrième difficulté est liée à la plage, quand la partie basse des ouvrages est bien ancrée dans le sable. Il se pose alors la question de savoir si dégarnir la plage sur 1 m à 1,50 m est suffisant, ou s'il est nécessaire d'aller jusqu'au pied de l'ouvrage. Normalement, les travaux sont précédés d'une phase avant-projet suivie ou réalisée en parallèle d'une mise à jour de l'étude de dangers. Dans celle-ci, l'environnement de l'ouvrage et son évolution ont dû être abordés : caractérisation de la cellule hydrosédimentaire, bilan sédimentologique, conclusions au pied des ouvrages. L'étude de dangers a donc dû conclure sur la pérennité du profil de plage. Cette approche est au moins nécessaire pour les calculs des débits franchissants, de la stabilité des ouvrages et pour la détermination du niveau de protection. C'est donc à l'étude de dangers de répondre à la question posée. Si la plage est stable ou en accrétion, ancrer les travaux de 1 à 1,50 m est suffisant. Si la plage n'est pas stable ou est en érosion, il faut déterminer les échéances pour savoir quand et

comment il convient de faire les travaux.

Il est aussi possible de faire des reconnaissances en pied d'ouvrage pour aller voir l'état des parements et sonder l'ouvrage là où il est normalement recouvert de sable.

D'autres formes que les perrés maçonnés existent, plus ou moins originales. Il y a les perrés en béton armé, ouvrages plutôt massifs, sur lesquels l'essentiel des pathologies restent superficiels (épaufrures suites à défaut d'enrobage, aciers apparents, dégradations de surface). Le traitement de ces structures ne pose pas de difficultés. Elles peuvent cependant connaître les mêmes problèmes de pied que les perrés maçonnés.



Perré en béton armé, la Tranche-sur-Mer

Il y a des ouvrages plus originaux, comme ceux formant la digue Ouest de la Faute-sur-Mer. Il s'agit de contreforts ancrés dans un cordon dunaire, recevant des plaques de béton armé maintenues sur les contreforts à l'aide de poutres en bois vissées. Aux problèmes liés au béton s'ajoutent ceux d'étanchéité entre les plaques ou dus à l'absence de plaques. Cette situation justifie la nécessité de se doter d'un plan de contrôle de la végétation, car les végétaux n'auraient jamais dû pousser dans ce genre de structure. Concernant les réparations, le plus simple est certainement de reconstituer un masque sur le parement aval (béton projeté, enrochements). Le traitement des vides derrière le parement reste complexe et potentiellement onéreux, mais néanmoins nécessaire.



Perré composite, la Faute-sur-Mer

Recommandations

Concernant le dégarnissage et le rejointoiement, il est nécessaire de viser une profondeur allant de 4 à 6 cm, ce qui nécessite de creuser les joints (de façon mécanique ou hydraulique). Il importe de s'assurer de cette profondeur et de la propreté du support avant rejointoiement : le suivi de chantier doit être méticuleux et il importe que le maître d'œuvre agrée les joints dégarnis avant rejointoiement.

Concernant les vides, deux difficultés sont à traiter. Leur repérage : l'idéal serait de pouvoir procéder à une reconnaissance in-situ. Vu les grandes surfaces à inspecter, les méthodes géophysiques présentent quelques avantages (un radar géologique directement sur le parement). À défaut, il faut au moins prévoir un sondage manuel à exécuter durant le dégarnissage, mais cette méthode n'est pas infaillible et ne permet pas de dimensionner correctement le marché de travaux. Une reconnaissance lors des études préalables reste la meilleure solution. Selon la taille des vides, il peut être parfois nécessaire d'ouvrir le parement. Sinon l'injection peut être envisagée, à deux conditions : prévoir des cannes d'injection dans les joints (pas dans les moellons), prescrire les conditions de pression et de débit pour bien rester dans un comblement et/ou un collage du parement.

Concernant les dispositifs en pied, il est intéressant de profiter de l'existence d'une reconnaissance géophysique pour les aborder et se renseigner sur leur éventuelle complexité. Même si la cartographie obtenue n'est pas précise, cette reconnaissance permettra au moins de savoir si l'ouvrage a un simple parafeu ou s'il y a d'autres structures.

Quelle que soit la tendance sédimentaire et quel que soit l'ouvrage, l'évolution du profil de plage sera à suivre pour s'assurer de la pérennité du niveau de protection. Ce suivi renseignera sur l'éventuelle nécessité de prolonger vers le bas les réparations effectuées sur le parement.

Enfin, il est nécessaire que les travaux d'urgence soient suivis d'un compte-rendu détaillé adressé au préfet. Ce compte-rendu doit être précis et doit inclure des photographies prises avant les travaux pour comprendre l'origine et les mécanismes de dégradation. Le document du CEREMA sur les travaux d'urgence [8] doit être respecté pour que ceux-ci soient réalisés selon de bonnes pratiques.

Concernant les ouvrages avec carapace, il importe que la rigidité de celle-ci soit compatible avec les éventuels mouvements de la digue et/ou de sa fondation. De plus, les aléas marins génèrent des forces et contraintes qui sont peu compatibles avec des ouvrages complètement rigides.

Travaux sur ouvrages en remblais

Sols en place

L'essentiel des digues ligériennes est positionné sur des cordons dunaires stabilisés, ou construites pour gagner des terrains sur la mer. Ces ouvrages sont donc construits sur des sols meubles, plus ou moins compressibles. La réalisation des travaux est donc tributaire des conditions météorologiques. Trop humides, les chantiers sont impraticables. Et la qualité

des remblais sera médiocre. Cette traficabilité difficile s'ajoute à la spécificité des travaux maritimes qui oblige à tenir compte des horaires et des coefficients de marée. Inversement, trop secs, la liaison entre les sols en place et les matériaux d'apport n'est pas optimale et l'interface mal traitée devient un lieu de cisaillement préférentiel ainsi qu'un lieu privilégié pour l'érosion interne.

La stabilité générale des ouvrages fait normalement l'objet de calculs qui intègrent la réalité du sol support, y compris en phase chantier. Par exemple, la stabilité générale d'un talus est à vérifier avec la configuration « ouvrage terminé ». Mais si le sol est compressible, il est utile de vérifier la stabilité de la digue en phase chantier avec les contraintes imposées par les engins. De même, si le rivage ou la rivière est proche, la stabilité de l'ensemble digue plus berge est à vérifier. La Charente-Maritime a connu au moins un chantier où des glissements se sont produits pendant les travaux [9].



Surcharges en phase de travaux, Villeneuve-en-Retz

Recommandations

Lors des études préalables ou du diagnostic approfondi, la reconnaissance des sols doit aller jusqu'au sol support. Ceci est nécessaire pour le dimensionnement des ouvrages et pour prévoir la revanche en prévision des tassements. C'est également nécessaire pour aborder les conditions du chantier et pour approcher le risque sismique.

Côté dimensionnement, ne pas se limiter à la configuration future de l'ouvrage, avec des charges d'exploitation qui ne comprennent qu'un tracteur et son épaveuse : lors des travaux, des engins plus lourds et/ou des vibrations seront appliquées au remblai qui devra y résister.

D'autre part, il est fréquent que les zones de travaux maritimes soient aussi des zones à enjeux environnementaux. Pour pouvoir travailler dans les meilleures conditions, il est parfois nécessaire de faire un débroussaillage préventif afin de s'assurer que les oiseaux aillent nicher ailleurs (quitte à prévoir des espaces refuges). Le sol support est aussi porteur d'une végétation qui parfois intéresse la stabilité des remblais à venir (herbes et graminées) : au démarrage des travaux il peut être intéressant de prévoir un décapage des 10-15 premiers cm et de les mettre en réserve. En fin de travaux, ces matériaux et les graines bancarisées pourront être remis en place sur l'ouvrage, ce qui facilitera la reprise

du végétal ainsi que la qualité environnementale du milieu à venir.

Remblais d'apport

Les ouvrages à construire ou à conforter nécessitent l'apport de matériaux. Si les digues fluviales sont souvent construites avec un corroi en argile complété de matériaux nécessaires à leur stabilité générale, les digues littorales ligériennes sont plutôt construites avec des matériaux homogènes. À cela deux raisons : l'indisponibilité de matériaux divers dans un périmètre réduit et le fait que les digues soient sollicitées sur des durées plus courtes en maritime qu'en fluvial (à l'échelle de la marée ou de la tempête) entraînant une exigence d'étanchéité moindre). Les matériaux doivent donc satisfaire plusieurs fonctions en même temps : l'imperméabilité relative (par rapport au fluvial), la stabilité générale, la végétalisation, voire des fonctions mécaniques comme la tenue des parements aval en cas de franchissements voire de surverse. À ceci s'ajoute le critère économique qui limite la distance pour avoir le matériau idéal. Il en résulte quelques difficultés...

Côté matériaux, il est difficile de disposer de matériaux répondant à toutes les fonctions. Quelquefois les matériaux ont une fraction sableuse importante et, conjuguée à des pentes trop fortes, les talus ont du mal à tenir (parfois avant même la réception des travaux). Parfois les matériaux sont des déblais de chantier, contenant plus ou moins d'éléments grossiers voire des débris...



Matériaux hétérogènes, la Faute-sur-Mer

D'autres fois, les matériaux utilisés sont très chargés en matières organiques qui vont pourrir en laissant des vides propices au développement d'érosion interne.

L'adéquation entre la nature des matériaux et la géométrie du remblai n'est pas toujours adaptée. Si les consignes du guide des terrassements routiers (GTR) [10] permettent à l'entreprise d'adapter le compactage du matériau à son état hydrique, il y a peu de phases d'exécution durant lesquelles le maître d'œuvre réinterroge les pentes de talus en fonction des caractéristiques des matériaux proposés par l'entreprise, ce qui conduit à des problèmes de stabilité. Inversement, peu de

prescriptions techniques comprennent des fuseaux granulométriques.

Il arrive aussi que des confortements aient été menés sans maître d'œuvre donc sans prescriptions techniques.



Matériau peu adapté, travaux sans maîtrise d'œuvre, Bouin

D'autres difficultés résultent d'un mauvais traitement de l'interface entre les matériaux en place et le confortement. Lorsqu'un confortement est monté le long d'un parement aval sans traitement préalable, les mêmes problèmes d'interfaces qu'avec le sol support se posent. Généralement, la pérennité d'un tel confortement est compromise.

Recommandations

Il importe que les matériaux d'apport présentent bien les caractéristiques des hypothèses de calculs. À minima, les dossiers de consultation des entreprises doivent contenir des fuseaux granulométriques en plus de la classe GTR. Le dossier doit aussi prévoir la fourniture par l'entreprise des résultats d'essais (pour agréer les matériaux d'apport) ainsi que la réalisation d'essais in-situ pour qualifier leur mise en œuvre (avec définition de la performance).

Il est aussi nécessaire de prévoir une bonne liaison entre les matériaux en place et ceux apportés. L'apport doit être ancré dans l'existant. Cela suppose un décapage de la terre végétale et la création d'une bêche d'ancrage dans le sol support (ou la scarification de l'existant en cas de rehausse). La première couche d'apports doit être compactée avec la « dernière couche » de matériaux en place.

Lorsqu'il s'agit de conforter l'existant par épaulement, le talus aval doit être préparé : décapage, création de redans pour ancrer l'épaulement dans l'existant. Qu'il s'agisse de confortement ou de création de digue, tous les sols supports de mauvaise qualité doivent être purgés, substitués, ou traités, ce qui justifie aussi la précision des reconnaissances et études préalables.

Pour garantir le bon compactage, il importe de travailler en remblais excédentaires : il faut créer un remblai plus large que le profil final, car le compacteur ne peut pas aller jusqu'au bord (manque d'épaulement du matériau, sécurité du

conducteur). Une fois le remblai terminé, il est procédé au dégraissage du talus : le pelleur vient retirer par le haut les matériaux excédentaires et dresser la pente du talus selon le profil attendu.

Si le maître d'œuvre agréé n'est pas géotechnicien, il doit être prévu une mission G4 de suivi géotechnique d'exécution [11].

Optimisation des matériaux du site

La question de l'optimisation des matériaux du site peut se poser moyennant une caractérisation de leurs performances et des conditions de leur réemploi.

Les matériaux sableux sont d'emblée à exclure, autant pour leurs piètres performances en digues que pour le maintien de la qualité environnementale des milieux d'extraction. Les matériaux présents autour des polders et dans les secteurs de schorre ou de mizotte [12] sont certes directement à côté des chantiers, mais ils posent trois problèmes. Le premier est que ce sont des matériaux très fins donc sensibles à l'érosion et nécessitant des pentes plutôt faibles. Ce sont des matériaux sensibles aux variations hygrométriques, donc difficiles à travailler et très sensibles à la dessiccation. Enfin, leur teneur en eau nécessite du ressuyage avant réemploi, ce qui impose des espaces de ressuyage et du temps (et la présence de sels les rend peu traitables, et ferait des ouvrages trop rigides).

Le réemploi de matériaux du site nécessite de bien réfléchir à leurs performances et à l'impact que cette réutilisation peut avoir sur le chantier (coût, délai, organisation). Inversement, des matériaux peuvent être valorisés : une carapace en béton démolie peut être concassée sur place pour servir de filtre pour les enrochements qui la remplaceront.

Travaux d'enrochements

En Pays de la Loire, les enrochements servent à la construction ou au confortement. Dans ce second cas, les enrochements sont mis en amont (lutte contre les érosions et limitation des débits franchissants par dissipation de l'énergie des vagues) et parfois en aval (confortement de talus à la pente trop forte).

Taille des blocs

Les problèmes les plus courants sont liés à la taille. Trop petits, ils sont instables en cas d'agitation et le parement peut subir des mouvements qui peuvent poser des problèmes lorsque la stabilité générale est compromise. Ils peuvent aussi poser des problèmes en milieu urbain où la crête de l'ouvrage est parfois occupée par des aménagements qui ne supportent pas de mouvements de leur fondation. Il est aussi arrivé que des petits blocs ou des graviers « polluants » soient projetés par-dessus la digue en tempête, créant des projectiles dangereux. C'est arrivé sur la digue du Génie (l'Aiguillon-sur-Mer) pendant Xynthia, heureusement sur un tronçon où il n'y avait pas d'habitations à l'arrière.

Trop gros les enrochements sont parfois difficiles à manier et

les conditions de filtre ne sont pas toujours respectées à cause de l'écart trop important dans les tailles de matériaux.

Mise en œuvre

Certains parements amont ont été dressés avec peu d'angularité : si l'esthétique de ces parements est intéressante (aspect de perré), l'absence d'angularité annule le rôle de dissipation des vagues, ce qui génère de forts débits franchissants. Il faut donc tendre vers la rugosité du calcul.



Parement « lisse » en enrochements, Bouin

Certains parements n'ont pas été ordonnés et les blocs ne sont pas stables. Il importe de veiller à ce que le parement enroché soit bien architecturé par le grutier. Certains parements cumulent les problèmes, avec des blocs non ordonnés et la présence d'éléments plus fins susceptibles d'être projetés. Il est alors difficile d'exiger la reprise complète ce qui serait économiquement intenable...

En cas de bétonnage, il convient de veiller tant à la qualité du béton utilisé qu'à ses conditions de mise en œuvre : s'il n'est pas adapté au milieu marin et/ou s'il n'est pas mis en œuvre avec la bonne plasticité, le résultat attendu ne sera pas atteint. C'est au maître d'œuvre de prévoir les conditions pour obtenir un résultat satisfaisant.



Digue du Devin, Noirmoutier

Une autre source de difficulté peut provenir de la pente des enrochements. La question de la pente est liée à la question

de la taille et de leur mise en œuvre, et il convient de vérifier si la pente et la blocométrie choisie s'accordent. C'est autant vrai pour les ouvrages en création que pour les confortements où la pente est fixée par l'ouvrage existant. Comme pour les ouvrages en remblais, les conditions foncières et les conditions économiques ont tendance à inciter les maîtres d'ouvrage à demander des ouvrages avec des pentes trop fortes. Au-delà des problèmes de stabilité, ces fortes pentes ont aussi comme inconvénients de limiter la dissipation de l'énergie et de favoriser la réflexion des vagues, donc l'érosion de pied.



Enrochements abrupts ayant tendance à tomber, Saint-Brévin-les-Pins

Une autre difficulté des enrochements est leur entretien, surtout pour lutter contre le développement de végétaux : une forte pente ne facilite pas l'accès à l'ouvrage.

Recommandations

Le dimensionnement des enrochements doit être conforme aux règles du Rock Manual [13] et les conditions de filtre doivent être respectées. La blocométrie doit être garantie par le fournisseur (et vérifiée par le maître d'œuvre). Si les matériaux sont « pollués » par des éléments fins, le grutier doit les trier. Il est également censé trier ces blocs de façon à mettre les plus gros en bas et les plus petits en haut. S'il utilise des blocs plus petits pour le calage, il doit s'assurer que les blocs au-dessus les immobilisent bien. En fait, il s'avère utile de prévoir une planche d'essai pour valider les blocs (taille et couleur), l'adéquation entre taille et pente, et la capacité du grutier à les mettre en œuvre correctement. Comme après toute planche d'essai, les entreprises doivent conserver les conditions qui ont été validées par le maître d'œuvre. La stabilité et l'efficacité d'un parement en enrochements en milieu marin nécessite une pose en deux épaisseurs, comme le démontrent les essais menés dans le cadre du projet Sao Polo [14], et comme le rappelle le « Rock

Manual ».

Organisation de chantier

Particularités des travaux maritimes

Les travaux maritimes ne sont pas des travaux comme les autres à cause des conditions dans lesquelles ils doivent être réalisés et il importe que tous les intervenants aient quelques références en la matière... En effet, travailler en bord de mer signifie que le chantier est dans un milieu généralement à enjeux environnementaux, venteux, salins, houleux et soumis à la marée (surtout dans l'Ouest).

Concernant les enjeux environnementaux, les documents d'incidence ont traité des impacts de l'ouvrage et du chantier. Il est nécessaire de procéder à des inventaires en toutes saisons, donc à prévoir dès les études préalables pour avoir les résultats avec l'avant-projet (finalisation du dossier d'autorisation). Il importe également de préparer le site des travaux : débroussaillage préventif, piquetage des espaces sensibles, bancarisation de la terre et des végétaux, voire suivi environnemental.

Le vent concerne le son et la poussière : il sera un bon conducteur du bruit des brises-roches hydrauliques (des précautions seront à prévoir en milieu urbain). De même, un concasseur fait du bruit et de la poussière, comme des pistes de chantier sèches. Autant de situations à anticiper dès la conception du projet.

Concernant le salin, il faudra prévoir des matériaux adaptés dans la formulation des mortiers et des bétons. De même avec les enrobages, les produits de revêtements, la protection cathodique des aciers...

Le cas de la houle a déjà été abordé, avec la nécessité de disposer de données à la côte pour le dimensionnement des ouvrages. Mais la houle peut aussi impacter le choix des matériaux : par exemple un minimum de performance mécanique est attendu des enrochements pour qu'ils ne se brisent pas lorsqu'ils bougent en période de tempête.

Concernant la marée, elle va impacter l'organisation du chantier, surtout si des engins doivent rouler sur la plage (par exemple les travaux du Boutillon sur l'Île de Ré, avec le batardage mis en place au fur et à mesure de l'avancement du chantier). L'organisation du chantier doit s'adapter aux horaires et aux coefficients de marée, avec des temps d'aménée et de repli avant chaque pleine mer. L'entreprise doit anticiper pour tenir les délais, de même pour le maître d'œuvre s'il précise un délai lors de la consultation des entreprises. La base vie et les aires de stockage devront permettre la remontée de ce qui doit être remis à terre avant chaque pleine mer. Durant le chantier, il faudra s'assurer que l'entreprise suit bien les données hydrométéorologiques : le mieux semble de prévoir des consignes écrites propres au chantier, quitte à les affiner pendant la phase de préparation.

Les chantiers se trouvent souvent dans des lieux intéressant la saison touristique. Il est fréquent que des maîtres d'ouvrage prescrivent l'absence de travaux, d'engins et de zone de

chantier pendant la période estivale. Cela signifie peut-être que des aménées et replis supplémentaires seront à prévoir.

Risques de tempêtes

En période hivernale, le chantier est exposé aux tempêtes hivernales ainsi qu'à une traficabilité difficile. Ceci va générer l'obligation de suivre les données hydrométéorologiques, d'être en contact avec les autorités et d'anticiper les éventuelles crises.

Pour ce qui est du suivi des données hydrométéorologiques, les consignes écrites propres au chantier doivent établir qui les suit, quels sont les seuils d'alerte, quelles sont les mesures à chaque seuil. Un lieu de repli doit être prédéterminé. Si l'entreprise suit ces données, le gestionnaire de la digue ne peut pas se dédouaner de toutes ses responsabilités : il importe qu'il suive aussi ces données et fasse part au chantier de son expérience (points sensibles, situations à risque...) Il devra aussi veiller à transmettre les alertes qu'il reçoit.

Pour éviter toute ambiguïté, une première version de ces consignes écrites sera incluse dans le dossier de consultation des entreprises. S'agissant d'un document important, il peut être envisagé que la production d'une version vue avec l'entreprise soit un point d'arrêt prévu dans l'arrêté préfectoral autorisant les travaux. En cas d'inspection du service de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques (SCSOH), la connaissance et l'application de ces consignes pourra faire l'objet d'une mise en situation.

L'application de ces consignes et les performances de l'ouvrage en travaux font que le chantier devra rester en contact avec les autorités : en cas de difficultés et de risque, c'est au maire voire au préfet que reviendra la décision de mettre en œuvre les préconisations des plans de secours. De même, il importe que la préfecture soit renseignée sur le niveau de performance de l'ouvrage pour l'optimisation des moyens de secours.

Les tempêtes sont généralement prévisibles, et depuis Xynthia le dispositif « Vigilance Vagues Submersions » permet d'avoir une idée des conséquences à la côte des tempêtes prédites. En cas d'alerte l'entreprise peut décider de ne pas déployer son personnel et ses engins en pied d'ouvrage au cas où la situation se détériorerait brusquement. L'entreprise et le maître d'œuvre ont aussi à faire un point sur l'état de l'ouvrage en travaux et peuvent décider de mettre en œuvre des mesures conservatoires sur le terrain. Pour cela l'entreprise devra disposer, sur le chantier ou à proximité, d'un stock suffisant de matériaux pour ne pas laisser de point bas et/ou pour fermer toute ouverture dans les ouvrages avant que la tempête touche les côtes. Elle veillera aussi à avoir sur place ou à proximité tout le matériel nécessaire à la mise en œuvre de ces matériaux. De son côté, le maître d'œuvre aura identifié les éventuelles phases critiques et aura prévu pour mémoire des prix pour ces prestations. De même que les gestionnaires font remonter le bilan post-tempête à la préfecture et au SCSOH, les entreprises feront connaître, via les gestionnaires, la situation de leur chantier après la

tempête. Si des leçons sont à tirer, les consignes écrites doivent être complétées.

Retour sur la conduite des études

Niveau de précision des avant-projets

Tout ce qui n'a pas été prévu se traduit par des surcoûts et des augmentations de délais, éléments qui ne sont généralement pas appréciés des maîtres d'ouvrage. Si un chantier peut rapidement pâtir des tensions entre le maître d'œuvre et l'entreprise, la situation se complique quand des tensions apparaissent aussi entre le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre.

Pour éviter cela, il importe de pousser au maximum les études préalables et d'avant-projet, quitte à aller jusqu'à produire des éléments qui sont plutôt produits en phase projet dans d'autres opérations. Ceci est d'autant plus important que la loi prévoit que la demande d'autorisation environnementale soit déposée avec un dossier comprenant un avant-projet. C'est donc le contenu de cet avant-projet qui va conditionner l'autorisation et l'enquête publique. C'est aussi sur l'estimation d'avant-projet que le maître d'œuvre s'engage. Il importe donc de tout mettre en œuvre pour que tout soit bien fait conformément au dossier déposé (qui est présenté lors de l'enquête publique et que le préfet autorise), ce qui justifie d'aller parfois un peu plus loin que ce que prévoit la loi MOP et que les habitudes des bureaux d'études. Il est arrivé, en Pays de la Loire, que des travaux se terminent avec des avenants dépassant de presque 50 % le montant du marché initial. Il a aussi été constaté de la géophysique se faire après la géotechnique et ce à quelques jours seulement du début de l'enquête publique. Ces situations contribuent à créer de la défiance entre les intervenants.

D'expérience, les quelques rappels et recommandations suivants peuvent être formulés.

La première recommandation est donc de mener les études d'avant-projet au bout, quitte à produire certains calculs d'ordinaire traités en phase projet. Ce qui importe, c'est d'être relativement sûr du dimensionnement des ouvrages et de n'avoir laissé de côté aucune sollicitation ou incertitude susceptible de faire revenir sur l'implantation des ouvrages, leur nature et/ou leur dimension. Cela signifie que toutes les prospections topographiques, géophysiques et géotechniques auront été menées avant la phase avant-projet et l'auront nourrie. De même, il aura été fait le point sur tous les réseaux et canalisations en place, sur toutes les zones à sensibilité environnementale. Il en est de même du point de vue des sollicitations : si un modèle de propagation de la houle du large à la côte est à faire, il le sera dans le cadre de l'avant-projet. L'expérience montre qu'un tel modèle coûte moins cher que le surcoût engendré par les incertitudes hydrauliques. En cas de franchissements par des paquets de mer, ceux-ci devront être finement quantifiés, puis la stabilité de l'ouvrage sera vérifiée ainsi que la capacité de ressuyage des volumes entrants dans la zone protégée. Ces éléments

sont d'autant plus importants qu'ils conditionnent le niveau de protection.

Intégration des conditions du chantier

L'avant-projet devra également traiter de la phase travaux, surtout si le chantier doit générer sur l'ouvrage des contraintes plus importantes que celles qu'il connaîtra en phase d'exploitation. Si les travaux génèrent des vibrations (compactage, concassage), celles-ci devront être analysées sous l'angle de leur impact sur la stabilité de l'ouvrage et des abords.

Tout ce qui touche à l'organisation de chantier et qui est décrit supra devra aussi faire l'objet d'une analyse, et le dossier de consultation des entreprises sera rédigé avec toutes les précisions nécessaires afin d'éviter le maximum de surprises pendant les travaux (elles sont rarement bonnes pour le maître d'ouvrage).

Compréhension par les usagers

Bien que ces opérations soient destinées à maintenir voire augmenter la protection apportée aux populations, force est de reconnaître que l'accueil du public n'est pas toujours tel qu'on pourrait s'y attendre... Ce qui signifie notamment qu'il est collectivement nécessaire de faire un effort de pédagogie.

La situation courante est celle des arbres dans les digues : beaucoup de gens pensent encore qu'il s'agit là d'une bonne chose et que les racines tiennent la terre. Ce n'est pas le cas et les arguments ne manquent pas [15] pour démontrer qu'au contraire il importe de veiller à ce qu'aucun arbre ne pousse dans les ouvrages. Cette question se heurte parfois à la question paysagère, avec des paysages classés comprenant des arbres dans les digues et le souhait de certains services d'en replanter... Ce qui renvoie d'ailleurs à d'autres situations difficiles à gérer a posteriori : digues dans les périmètres « trame verte et bleue », digues en « espace boisé classé », digues en réserves naturelles ou dans les zonages Natura 2000, digues en « espace naturel sensible ». Si l'aspect paysager et environnemental de ces espaces est effectivement important, il importe cependant de veiller à ce que les classements ne viennent pas empêcher le bon entretien des ouvrages voire compromettre le niveau de performance.

Il est également parfois difficile de faire comprendre que la stabilité d'une digue passe par le retrait de matériaux. C'est certes rare, mais il arrive que la stabilité au glissement nécessite de revoir la pente du parement aval à la baisse, ce qui se traduit par du déblai (matériau inutile à la stabilité et apportant une surcharge inutile). Cela signifie que le confortement d'une digue ne passe pas toujours par de l'apport de matériaux. Avant le déroulement des travaux, il importe que le maître d'ouvrage explique bien ce qui va se passer, ce qui nécessite que le maître d'œuvre lui explique la situation voire l'aide à communiquer. Dans le même ordre d'idée, il faut expliquer aux riverains des digues qu'on ne peut pas déblayer le pied aval pour augmenter son jardin ou

se stationner. De même, il importe que les riverains ne plantent pas d'arbres dans les digues. Inversement, le confortement aval d'une digue et les conditions de stabilité peuvent amener à prendre une emprise foncière supplémentaire chez les riverains.

En milieu urbain se pose aussi la question des barrières anti-crues. Lorsqu'elles doivent être mises en œuvre, il importe qu'il n'y ait pas de véhicule garé dessus. On peut s'en prémunir en faisant un marquage au sol particulier et en mentionnant le fait qu'il s'agit d'une barrière anti-crue. Une information régulière dans le bulletin municipal et sur site sera probablement à prévoir.

Globalement, la nature et les particularités des ouvrages hydrauliques sont assez méconnues de nos concitoyens, ce qui nécessite un effort de communication.

Conclusions

Les travaux maritimes et en particulier les travaux sur les ouvrages hydrauliques sont des travaux spécifiques qui nécessitent l'intervention de maîtres d'œuvre et d'entreprises spécialisés, tant dans la réalisation des ouvrages que dans les conditions dans lesquels ils sont conçus et réalisés.

Il est important de disposer d'études d'avant-projet poussées et de mener de vraies reconnaissances topographiques, géotechniques et hydrauliques, dont les coûts sont généralement moindres que ceux engendrés par le surdimensionnement issu de l'application de ratios ou forfaits nécessairement sécuritaires.

Une nouvelle fois les éléments de la présente publication ne prétendent pas donner de leçon : l'objectif est de faire le bilan de ces dernières années afin que collectivement des progrès soient réalisés dans l'intérêt de la protection des personnes et des biens.

Remerciements

Nos remerciements vont d'abord aux gestionnaires d'ouvrages hydrauliques qui, lors de nos inspections ou autres, nous ont permis d'analyser les opérations menées ces dernières années et d'en tirer le bilan que nous présentons ici.

Nos remerciements vont également aux membres de l'appui technique apporté au SCSOH (CEREMA et IRSTEA) qui, lors de formations ou de temps d'échanges, nous ont aidé à comprendre les ouvrages hydrauliques et ont suscité en nous l'envie d'en savoir toujours plus. Nous remercions également nos collègues des autres SCSOH qui, via notamment le groupe de travail national « ouvrages littoraux », nous font généreusement part de leurs propres expériences.

Nos remerciements vont enfin à Caroline Bondois et Thibaut Novarese, respectivement cheffe du SCSOH Pays de la Loire et chef de la Division risques naturels, hydrauliques et sous-sol, pour nous avoir permis de rédiger cette contribution et pour leur relecture bienveillante.

Références

- [1] Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007 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
- [2] Le retour d'expérience de la tempête Xynthia, CETE de l'Ouest (devenu centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), 2012.
- [3] Le niveau de protection est défini par l'article R.214-119-1 du code de l'environnement. Il est déterminé par la hauteur maximale que peut atteindre l'eau sans que la zone protégée soit inondée en raison du débordement, du contournement ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer. En milieu marin, les entrées d'eau par paquets de mer sont admissibles à condition qu'elles puissent être gérées par un système de ressuyage.
- [4] Le niveau de crête est une simple valeur topographique, souvent moyennée par tronçon ou par ouvrage, et ne tenant pas compte des performances mécaniques du tronçon ou de l'ouvrage.
- [5] Arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions.
- [6] Décret n°2015-526 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.
- [7] « *Méthodologie pour l'analyse fonctionnelle des ouvrages hydrauliques à grand linéaire* », par Félix H., Beullac B., Tourment R., Mériaux P., Peyras L. CFBR/AFEID, Études de dangers, 2011, 22 p. Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture)
- [8] Guide sur les « *Interventions d'urgence sur les dispositifs de protection contre les submersions marines* », CEREMA, 2018
- [9] « *Compte rendu de la réunion publique du 1 février 2016* », <http://www.littoral-esnandais.fr/wp-content/uploads/2016/02/C-R-r%C3%A9union-publique-du-1.2.2016.pdf>
- [10] « *Guide des terrassements routiers* » (GTR), Ministère de l'équipement, 1992
- [11] Norme NF-P94-500 sur les missions d'ingénierie géotechniques, 2013 ; et annexe 2 des « *Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai* », 2015
- [12] « Schorre : étendue naturelle plane à végétation basse située à proximité du bord de mer, inondée par les eaux salées lors des hautes marées » (Wikipédia). Dans le secteur du Marais poitevin, on parle également de « mizotte »
- [13] « *The Rock Manual* », 2007 ; ou « *Guide enrochement – version française du Rock Manual* », CETMEF, 2009
- [14] « *Projet Sao Polo – Stratégies d'adaptation des ouvrages de protection marine ou des modes d'occupation du littoral vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des océans* », Philippe Sergent, 2012
- [15] « *Caractérisation du développement des systèmes racinaires ligneux dans les digues* », Thèse de doctorat de Caroline Zanetti (2010), Université de Provence de Provence 1, CEMAGREF.