

RENFORCEMENT DE LA PROTECTION DE LA CENTRALE DU BLAYAIS CONTRE L'INONDATION : APPORTS CONJOINTS DES MODELISATIONS NUMERIQUE ET PHYSIQUE

Denis AELBRECHT, Michel BENOIT, Jean ALLILAIRE
Tel. : 01 30 87 74 12 ; Fax : 01 30 87 81 09 ; E-mail : denis.aelbrecht@edf.fr

EDF R&D – Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE)
6, quai Watier - BP 49 - 78401 CHATOU Cedex - FRANCE

RESUME

La tempête du 27/12/1999 a occasionné une inondation partielle du Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) du Blayais, situé en Gironde, sans conséquence pour la sûreté des installations. L'intensité du phénomène et l'importance du paramètre houle ont conduit EDF à ré-évaluer les conditions hydrauliques extrêmes agissant sur le CNPE du Blayais en vue de renforcer les lignes de défense (digues de protection) contre ce risque. La caractérisation statistique et par modélisation numérique des aléas hydrauliques à prendre en compte (marée, houle, surcotes), couplée à une modélisation expérimentale en canal à houle, ont permis de définir rapidement et avec les meilleures garanties de sûreté un nouveau dispositif de protection. Les études en canal à houle ont été achevées en octobre 2000, alors que les travaux qui ont suivi sur le site (digue de front de Gironde) ont été terminés en mars 2001.

ABSTRACT

A partial flooding of the Blayais nuclear power plant occurred in the Gironde estuary during the storm of 27/12/1999, without compromising the overall safety of the systems. The strength of the phenomena, and the key role of wind-waves, lead EDF to review the extreme hydraulic forcings that act on the plant, in order to enhance the protection of the plant against the flooding risk. Statistic and deterministic (modelling) evaluations of relevant hydraulic hazards (tide, storm surges, wind-waves), in addition to a physical modelling in a wave flume, enabled to design in a rapid and reliable way new protective structures (sea-wall). Studies were completed in October 2000, and main related works have been achieved in the field in March 2001.

I - LA TEMPETE « MARTIN » DU 27 DECEMBRE 1999

Les deux tempêtes de fin décembre 1999 qui ont affecté l'ensemble du territoire français ont été d'une intensité particulièrement exceptionnelle, encore dans la mémoire de chacun. La seconde tempête, baptisée « Martin », qui a traversé rapidement la France d'Ouest en Est dans la nuit du 27 au 28 décembre 1999, a provoqué une augmentation très importante du niveau de mer dans l'estuaire de la Gironde : on parle de phénomène de *surcote météorologique*. Celle-ci, conjuguée à des vagues d'amplitude tout aussi exceptionnelle, a conduit à l'inondation d'une partie de la plate-forme du Centre Nucléaire de Production d'Electricité (CNPE) du Blayais, sans toutefois remettre en cause la sûreté globale des installations. On rappelle en Figure 1 la localisation du CNPE du Blayais sur l'estuaire de la Gironde.

I.1 - Caractéristiques météorologiques de la tempête « Martin »

La première tempête (appelée « Lothar ») des 25 et 26 décembre 1999 était associée à une dépression atmosphérique (minimum de 960 hPa à 07h00 le 26/12/99 en Normandie) se déplaçant rapidement le long du 49° parallèle Nord (axe : Finistère Nord - Paris - Nancy) à une vitesse estimée à 100 km/h. Les vents maxima (rafales) associés à cette dépression ont dépassé 170 km/h en région parisienne. La seconde tempête (appelée « Martin ») s'est déplacée quasiment à la même vitesse, sur un axe approximatif Ouest-Est à environ 200 km au Sud de la première tempête (axe : Nantes - Romorantin - Dijon). La dépression a atteint 965 hPa en son centre. Des vents exceptionnellement violents ont accompagné cette dépression, principalement sur ses flancs Ouest et Sud. Des rafales de plus de 200 km/h ont été enregistrées sur l'île d'Oléron.

C'est la deuxième tempête qui a impacté le CNPE du Blayais. D'après les informations recueillies à la station météorologique de Bordeaux-Mérignac, station située à environ 50 km au Sud du CNPE du Blayais, on a observé une augmentation très rapide de l'intensité des vents, les maxima y ayant atteint près de

150 km/h le 27/12/99 vers 17 heures (heures locales en TU+1). La direction de provenance des vents a évolué dans la journée du 27/12/99, passant du Sud vers 04h00, au Nord-Ouest vers minuit.

I.2 - Caractéristiques hydrauliques observées en Gironde

Les niveaux de la mer en Gironde réagissent aux différents forçages suivants :

- propagation de la *marée astronomique* d'Atlantique (échelle de temps semi-diurne + modulations bimensuelle et saisonnière)
- *surcote marine*, induite par l'historique des conditions météorologiques sur l'Océan Atlantique, et potentiellement amplifiée par les conditions météorologiques locales sur l'estuaire (vent et gradient de pression atmosphérique)
- *débites des fleuves Garonne et Dordogne* : échelle de temps de quelques heures à quelques jours, influence graduelle suivant la position dans l'estuaire (influence négligeable au droit du CNPE du Blayais devant les autres forçages)
- la *houle et les clapots* : échelle de temps de quelques secondes ; l'influence des houles océaniques décroît de l'aval vers l'amont de l'estuaire, mais la houle peut être localement amplifiée ou des clapots peuvent être levés par les conditions locales de vent sur l'estuaire (on parle alors de « mer de vent »).

Marée astronomique et surcote observées le 27/12/1999 :

Les conditions de marée astronomique le 27/12/99 correspondaient à une situation moyenne (coefficient de marée 77). Grâce au travail de reconstitution des données effectué par le Port Autonome de Bordeaux (PAB), nous avons pu évaluer les surcotes de Pleine Mer (PM), définies comme la différence entre Pleine Mer observée et Pleine Mer astronomique prédite par le SHOM¹, pour la marée du soir du 27/12/99 (cf. tableau 1).

Station	Niveau PM prédit par le SHOM (en m / zéro étiage)	Niveau PM observé (en m / zéro étiage)	Surcote de PM (en m)
Le Verdon (entrée estuaire)	4.95 à 21h05	6.50 *	1.55 *
Pauillac (réf. Blayais)	5.05 à 21h48	7.06 (à 21h52) soit 4.47 m NGF O	2.01
Bordeaux	4.80 à 22h35	7.05 **	2.25 **

Tableau 1 : Niveaux de Pleine mer le 27/12/99 et évaluation des surcotes de Pleine Mer associées

* : Marégraphe du Verdon H.S. - Valeur reconstituée par le PAB après analyse

** : Estimation par PAB d'après courbe marégraphique (marégraphe en butée supérieure)

Le niveau de pleine mer atteint lors de la tempête du 27/12/1999 dépasse significativement les valeurs historiques observées à Pauillac, à la fois en niveau absolu (précédent record de 6.70 m étiage le 14/03/1937) et en surcote (précédent record de 1.14 m le 07/02/1996).

Sur la base d'une estimation statistique des surcotes extrêmes effectuée en 1997 par EDF-LNHE, cette surcote de 2 m serait probabilisée à une fréquence d'occurrence de l'ordre de 10⁻³/an (risque millénaire).

Débites des fleuves Garonne et Dordogne :

D'après les informations recueillies auprès du PAB, on a pu noter, d'après les niveaux observés sur la Garonne (station de la Réole) et sur la Dordogne (station de Pessac), c'est-à-dire hors influence dynamique de la marée, que ces fleuves n'étaient pas en crue le 27/12/99. Par ailleurs, on a montré grâce à une modélisation hydraulique de l'estuaire que ces débits étaient sans influence significative sur les niveaux de Gironde au droit du CNPE du Blayais (influence croissante des débits fluviaux en remontant l'estuaire).

¹ SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

La houle et les clapots :

Aucun dispositif de mesure ne permet d'évaluer l'intensité atteinte par les vagues le 27/12/99 au niveau du CNPE du Blayais. Il semblait peu probable que la houle océanique du large (i.e. provenant de l'Atlantique) ait pu se propager depuis l'entrée de l'estuaire et impacter le CNPE situé très en amont de l'embouchure. Cette première analyse a été confirmée par la suite grâce à la modélisation numérique. En revanche, l'intensité des vents et le fetch disponible dans la direction du vent lors de la tempête peuvent lever une mer de vent locale que nous avons estimée par expertise, d'après [1]. Les données météorologiques montrent que le vent moyen sur 10 min (à bien distinguer du vent en rafales) a été de l'ordre de 100 km/h pendant plusieurs heures. D'après [1], pour une profondeur de l'ordre de 7 m et un fetch effectif de l'ordre de 6 à 10 km (suivant la direction du vent), un clapot de hauteur *significative*² H_s de l'ordre de 1.5 à 2.0 m (hauteur crête à creux), et de période de l'ordre de 3.5 à 4.0 s, a pu être levé. Ceci signifie que des hauteurs de vague *maximales* ont pu atteindre de l'ordre de 2.5 m, voire 3.0 m.

Conclusion sur les forçages : les phénomènes observés le 27/12/1999 au niveau du CNPE du Blayais sont d'origine essentiellement maritime.

I.3 - Conséquences sur les protections contre l'inondation au CNPE du Blayais

Nota : Les cotes hydrographiques dans l'estuaire sont données par rapport au zéro étiage (équivalent du zéro hydrographique intégrant l'influence des fleuves en estuaire). A Pauillac (station marégraphique de référence pour le CNPE du Blayais), le zéro de l'étiage est à la cote -2.59 m NGF Lallemant ou NGF O (soit $Z_{NGF} = Z_{\text{étiage}} - 2.59 \text{ m}$). Par commodité, on explicitera par la suite toutes les cotes en m NGF O.

La protection contre l'inondation des sites nucléaires fait l'objet d'une Règle Fondamentale de Sûreté (RFS I.2.e du 12/04/1984 [2]), à valeur rétroactive pour les sites antérieurs à 1984 comme c'est le cas pour le CNPE du Blayais. Cette protection repose sur la définition d'une cote de sécurité nommée « Cote Majorée de Sécurité » (CMS). Cette CMS est définie, pour les sites en estuaire sous influence dimensionnante maritime, par la conjonction du niveau maximal de Pleine Mer astronomique (i.e. de coefficient 120) avec la surcote maritime de probabilité millénaire, dont on retient la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70 %. La houle n'est pas intégrée dans la définition de la CMS. Au début des années 1980, les études hydrauliques (étude statistique des surcotes + modèle hydraulique à « casiers » des zones inondables de l'estuaire) avaient abouti à une CMS de +5.00 m NGF O. Une marge de sécurité avait conduit à définir la cote des digues de protection à +5.20 m NGF O, à comparer aux 4.47 m NGF O atteints le 27/12/99 par la conjonction marée et surcote (cf. Tableau 1).

On observe donc que les seuls effets de la marée et de la surcote n'ont pu conduire à une inondation partielle du site. ***C'est la conjugaison de ces phénomènes avec les vagues qui a conduit à des franchissements importants.***

Avant les essais sur modèle physique, on a tenté d'évaluer par expertise l'ordre de grandeur des franchissements (exprimés en m³/s/mètre linéaire (ml) de digue) survenus le 27/12/99 en utilisant les abaques issues de [3], en les extrapolant au-delà des limites disponibles dans la littérature. On aboutit à un débit de franchissement de l'ordre de 0.050 m³/s/ml de digue au plus fort de la tempête

Enfin, les gros enrochements naturels formant la carapace de la digue n'ont globalement pas été déstabilisés par la tempête, sauf localement.

² la hauteur de houle *significative* H_s est un paramètre synthétique représentatif d'un état de mer. Il correspond à la moyenne du tiers supérieur de l'ensemble des hauteurs de vagues.

II - RE-EVALUATION DES ALEAS EXTREMES DE SURCOTE ET DE HOULE

L'intensité exceptionnelle de cet événement a conduit EDF à ré-évaluer les paramètres hydrauliques qui conditionnent le risque d'inondation sur le CNPE du Blayais, en intégrant la tempête du 27/12/99, et notamment l'effet des vagues, dans l'évaluation des aléas extrêmes à prendre en compte. L'objectif est *in fine* de renforcer toutes les lignes de défense du site contre ce type de risque, à la fois bien sûr les dispositifs fixes de protection (prévention du risque), mais aussi les systèmes d'alerte (détection du risque) et les procédures de conduite associées (actions de mitigation face au risque).

II.1 - Marée astronomique et surcote extrêmes

Pour ré-évaluer la CMS du site, intégrant les paramètres marée + surcote, une modélisation hydrodynamique bidimensionnelle (2D) de l'estuaire a été mise en œuvre au moyen du logiciel TELEMAC-2D développé par EDF-LNHE. Ce logiciel a montré à de nombreuses occasions ses capacités à reproduire de façon satisfaisante les processus de génération/propagation des surcotes marines dans les zones côtières et estuariennes [4].

Deux modèles ont été réalisés avec TELEMAC-2D, i.e. avec ou sans prise en compte des zones de débordement dans les marais inondables, de façon à quantifier l'effet de ces débordements au cours de la propagation de l'onde de marée + surcote. Ces modèles ont été validés sur des marées de vives eaux sans surcote, puis sur l'événement du 27/12/99. Ensuite, sur la base des principes réglementaires énoncés dans la RFS I.2.e [2], on a exploité ces modèles dans les conditions hydro-météorologiques suivantes :

- **Condition de débit des fleuves Garonne et Dordogne** : On fixe des valeurs moyennes des débits fluviaux : 740 m³/s en Garonne ; 360 m³/s en Dordogne. Cette hypothèse « moyenne » est justifiée par le fait que le critère dimensionnant est le critère purement maritime au sens de la RFS I.2.e [2].

- **Condition de marée astronomique** : On retient une condition de marée astronomique maximale (dite marée de coefficient 120). Cette marée atteint un niveau de Pleine Mer d'environ 3.15 m NGF O au Verdon.

- **Condition de surcote millénaire à l'entrée de l'estuaire** : L'objectif est de définir une surcote de probabilité millénaire assortie d'un intervalle de confiance à 70%. Nous avons donc ré-évalué cette estimation statistique, en utilisant la méthode du renouvellement [5] préconisée par la RFS I.2.e, sur une période couvrant les années 1959 - 2000 et intégrant l'événement de 1999 dans l'échantillon. La difficulté principale réside dans le traitement de l'événement atypique de 1999 (on parle de « horsain »). L'analyse nous a conduit à retenir une valeur de surcote millénaire au Verdon de 1.67 m. Par ailleurs, on a pu montrer grâce à la modélisation 2D que l'influence de la dynamique de la surcote sur le niveau de Gironde atteint au niveau du CNPE du Blayais était négligeable (caractère instationnaire de la surcote). On considère donc ici que la surcote de 1.67 m imposée au Verdon est constante dans le temps (sur la durée de la marée).

- **Condition de vent sur l'estuaire** : Les conditions de vent associées aux phénomènes de surcotes importantes sont complexes. Elles sont caractérisées par l'intensité - ou profondeur - de la dépression atmosphérique, par sa trajectoire, par l'étendue du gradient de pression, et par la vitesse de déplacement de la dépression. Ces facteurs conditionnent l'intensité, la direction et la persistance des vents. Par ailleurs, il n'y a pas de relation univoque entre statistique de surcote à Blayais et condition statistique de vent moyen sur l'estuaire. En d'autres termes, on peut très bien observer une surcote d'occurrence millénaire à Blayais en présence d'un vent moyen maximal centennal, en ordre de grandeur. Or la prise en compte d'un vent local extrême sur l'estuaire est importante, puisque celui-ci peut amplifier le phénomène de surcote. En conséquence, on a retenu ici un champ de vent (vent moyen sur 10 min). correspondant à la chronique des vents observés le 27/12/1999, en pondérant l'intensité du vent moyen-10min. de sorte qu'elle atteigne 120 km/h au pic de la tempête. Cette valeur est choisie en cohérence avec le choix adopté pour caractériser les conditions de houle sur l'estuaire [2] (cf. § II.2 ci-après).

- **Résultats** : Le modèle TELEMAC-2D avec débordement a donc été appliqué sous les conditions hydro-météorologiques décrites ci-avant. On observe que le niveau maximal en Gironde atteint la cote de 5.11 m NGF O, valeur de référence pour la CMS du site.

II.2 - Vagues extrêmes

Pour évaluer les conditions extrêmes de vagues levées sur l'estuaire de la Gironde, nous avons mis en œuvre un modèle de houle à l'aide du logiciel TOMAWAC, développé au LNHE au sein du système hydro-informatique TELEMAC [4]. TOMAWAC est un modèle spectral d'états de mer destiné à reproduire l'évolution spatiale et temporelle du spectre directionnel d'énergie de la houle à partir d'une discrétisation de type éléments finis appliquée à des domaines géographiques de grande ou moyenne emprise. TOMAWAC

est dit de "troisième génération" puisqu'aucune paramétrisation de la répartition en fréquence ou en direction du spectre n'est imposée.

Ce modèle de houle a permis de montrer que les conditions de vague au droit du CNPE du Blayais :

- sont quasi-indépendantes des conditions de houle du large en Atlantique (influence décroissante de l'aval vers l'amont de l'estuaire), même en situation extrême (H_s océanique centennale supérieure à 9 m) ;
- sont directement fonction des conditions de vent local agissant sur l'estuaire (direction ; intensité) : on parle alors de *clapot* ou *mer de vent* ; par ailleurs, il suffit d'environ 30 minutes pour lever le maximum de clapot, à fetch et intensité de vent fixés.

Après une confrontation satisfaisante avec les estimations effectuées par expertise pour l'événement de 1999, on a exploité le modèle pour différentes conditions de vent moyen-10min. (direction et intensité), choisies d'après une analyse statistique des vents sur l'estuaire, effectuée à notre demande par Météo-France :

Période de retour (années)	Vent moyen-10min. (km/h)	Borne sup. à 70 % (km/h)
10	82	90
50	96	112
100	100	115
200	108	120

Tableau 2 - Statistique des vents moyens-10min extrêmes estimés pour l'estuaire de la Gironde (étude Météo-France pour EDF)

Vis-à-vis du processus de génération des vagues pour le CNPE du Blayais, on étudiera uniquement les provenances Sud-Ouest (SO, 225°N), Ouest (O, 270°N), Nord-Ouest (NO, 315°N), Nord/Nord-Ouest (N/NO, 337.5°N) et Nord (N, 0°N). Ces directions, les plus pénalisantes vis-à-vis de la génération de la houle, sont également représentatives de l'événement du 27/12/1999 observé au CNPE du Blayais, où les vents associés au passage de la dépression sont successivement passés du secteur Sud-Ouest à Nord/Nord-Ouest lors de la tempête. De plus, le vent moyen observé le 27/12/99 constitue probablement la valeur historique pour la direction considérée. Sa période de retour est comprise entre 100 et 200 ans.

Dans les calculs, nous avons attribué à un vent moyen-10min extrême V une des directions mentionnées ci-avant (SO, O, NO, etc), sans diminuer la probabilité de ce vent V établie pour toutes les directions confondues (hypothèse conservative).

- Résultats :

Le modèle a été exploité dans les différentes conditions de vent décrites ci-dessus, en fixant la cote du plan d'eau moyen au niveau de la CMS. On a reproduit sur la Figure 2 les résultats des simulations pour un vent de Nord-Ouest et pour trois intensités différentes en vent moyen-10.min. (70, 100 et 120 km/h). Pour chaque simulation, on a confronté nos résultats à une évaluation par expertise à partir de [3]. On en conclut que les valeurs trouvées par les deux approches - expertise et modélisation numérique - sont tout à fait cohérentes. Les écarts sont dus à la complexité géographique et bathymétrique de l'estuaire, qui modifie la propagation des vagues jusqu'à leur arrivée au droit du CNE du Blayais. Les valeurs dimensionnantes de H_s à 300 m du CNPE déduites de ces calculs sont de l'ordre de 2.60 m à 2.70 m, avec des périodes associées de l'ordre de 5.5 à 6.0 s. Pour de telles valeurs de H_s , les hauteurs de vagues maximales peuvent atteindre de 4 à 4.5 m.

III - DIMENSIONNEMENT DE LA NOUVELLE DIGUE EN CANAL A HOULE

Une fois les nouvelles conditions hydrauliques extrêmes ré-évaluées, notamment à l'aide des outils numériques du système TELEMAC, l'optimisation du dimensionnement de la digue de protection en front de Gironde a pu être effectuée grâce à la modélisation expérimentale en canal à houle. Les incertitudes liées au comportement mécanique de tels ouvrages et à leur efficacité pour réduire les volumes de franchissement à ces intensités de phénomènes (forte sensibilité aux paramètres hydrauliques) d'une part, et les limites d'utilisation des abaques de dimensionnement disponibles dans la littérature d'autre part, faisaient de la

modélisation physique expérimentale la seule technique disponible pour garantir un niveau de confiance dans l'optimisation finale de l'ouvrage.

L'objectif de l'étude d'optimisation est de quantifier les paramètres suivants :

- stabilité des enrochements composant la carapace de la digue ;
- volumes de franchissement par la houle par-dessus l'ouvrage ;
- efforts sur les structures coiffant la berme de l'ouvrage (mur anti-houle).

III.1 - Hypothèses. Echelles. Dispositif expérimental

- **Le canal à houle** : Les essais ont été effectués dans un des canaux à houle d'EDF-LNHE, long de 70 m, 1,50 m de large et 1,50 m de profondeur maximale. Ce canal est équipé d'un générateur de houle aléatoire, animé d'un mouvement de translation (type " piston ") et d'un système d'absorption active de la houle permettant de garantir la consigne de houle incidente imposée en entrée. Le batteur engendre une houle aléatoire - ou houle irrégulière - caractérisée par une hauteur significative et une période de pic selon un spectre de type Jonswap [3].

- **Choix des échelles** : La nécessité d'une bonne reproduction des effets de la houle pour la mesure des efforts et de la stabilité des enrochements, ainsi que d'un linéaire suffisant de digue pour la mesure des franchissements, nous a conduit à choisir l'échelle en espace de $[L] = 1/20^{\text{ème}}$. Le modèle est représenté en similitude de Froude sans distorsion. Les échelles de temps $[T]$, de volume $[V]$, et de débit $[Q]$ s'en déduisent directement :

$$[T] = [L]^{1/2} = 1/4,5$$

$$[V] = [L]^3 = 1/8000$$

$$[Q] = [V]/[T] = [L]^3 / [L]^{1/2} = [L]^{5/2} = 1/1800$$

Le terrain existant en front de Gironde est composé essentiellement d'un talus d'argile avec ajout d'une protection frontale en enrochements allant de 600 kg à 1000 kg. Les pentes de la carapace existante s'échelonnent suivant les endroits le long du front de Gironde de 1/1,36 à 1/2,7.

La pente du terrain devant la centrale est relativement douce et la profondeur maximale observée à 300 m au large du CNPE est de - 3.30 m NGFO, pour une cote devant le pied d'ouvrage de + 2.50 m à + 3.10 m NGFO. Afin de représenter au mieux la forme des vagues et de ne pas les perturber avant leur arrivée sur l'ouvrage, nous avons représenté la bathymétrie jusqu'à la cote « fictive » de - 14 m NGFO de façon à retrouver en canal des conditions de profondeur infinie. Ce niveau sera gardé sur toute la distance séparant le générateur de houle du raccord avec la pente des fonds.

L'échelle qui détermine le poids des blocs à disposer sur le modèle est imposée par les règles de dimensionnement des digues à talus (cf. [6] et [7]), inspirées de la formule d'Hudson. Cette échelle $[W]$ est donnée, en fonction des échelles de masse volumique $[\rho_{\text{bloc}}]$ et de densité réduite $[d'_{\text{bloc}}]$ par :

$$[W] = [\rho_{\text{bloc}}] [d'_{\text{bloc}}]^{-3} [H]^3$$

Le tableau suivant indique les données à prendre en compte :

	$\rho_{\text{ bloc }} (\text{kg/m}^3)$	$d'_{\text{ bloc }} (\text{densité réduite dans l'eau})$
Nature	2400 - 2600	1.34 - 1.53 (eau de mer)
modèle	2400 - 2600	1.40 - 1.60 (eau douce)

On calcule en moyenne $[d'_{\text{ bloc }}]^{-3} = 0.9$, et comme $[H] = [L] = 1/20$, on a : $[W] \approx 0.9 [L]^3 \approx 1,13 \cdot 10^{-4}$. Les enrochements utilisés pour la modélisation sont les suivants :

	Poids nature	Poids modèle
enrochements existants	600 à 1000 kg	70 à 115 g
enrochements nouvelle carapace	1500 à 2700 kg	170 à 310 g

- Mesure et comptage des franchissements :

* Mesure du volume d'eau de franchissement : Un dispositif de comptage de franchissements dus aux vagues derrière l'ouvrage permet de mesurer le volume d'eau franchissant l'ouvrage dans un intervalle de temps donné et pour un nombre de vagues connu. Ce dispositif est composé d'un bac en PVC disposé sur l'arrière de l'ouvrage. Le volume d'eau arrivant dans le bac au cours de l'essai est ensuite mesuré, puis converti en débit de franchissement à l'échelle nature par mètre linéaire de digue (en m³/s/ml).

* Comptage des vagues franchissant l'ouvrage : Le comptage des franchissements s'obtient au moyen d'une sonde résistive sensible aux passages de l'eau et située sur le dessus de la berme de l'ouvrage à contrôler. Cette mesure est ponctuelle en un lieu donné, mais permet de connaître en ce lieu le nombre de passages de l'eau dépassant un certain seuil, dans notre cas ce seuil a été fixé à 20 cm (nature).

- Mesure des efforts :

Afin de mesurer les efforts s'exerçant sur le mur de protection situé à l'arrière de la berme de la digue, un dispositif équipé de capteurs a été installé. Ce dispositif mesure l'ensemble des efforts supportés par une portion de linéaire de mur, déduction faite de la pression hydrostatique lorsque le niveau d'eau au repos atteint une cote supérieure à celle du pied du mur. Le dispositif mis en place mesure les efforts totaux exercés sur le mur.

- **Mesure des taux de dommages** : Le taux de dommages est évalué par comptage des blocs de carapace déplacés après chaque essai (rangées de blocs colorées), et rapporté au nombre total de blocs de carapace.

III.2 - Résultats des essais. Travaux réalisés

Un essai sur le modèle dure environ 25 minutes, soit l'équivalent « nature » d'une durée de 2 heures. Les premiers essais d'étalonnage ont permis de vérifier la représentativité du modèle. En particulier, on a vérifié que les débits de franchissement pour l'événement du 27/12/1999 variaient de 0,02 à 0,06 m³/s/ml suivant l'intensité de la hauteur de houle incidente (pour H_s = 1,8 à 2,1 m), alors qu'une évaluation à 0,05 m³/s/ml avait été obtenue par expertise pour cette tempête (cf. § I.3).

Puis, des conditions d'entrée de houle et de niveau de Gironde extrêmes (CMS = marée+surcote) ont été imposées à partir des études de caractérisation décrites au § II. Un grand nombre d'essais a été réalisé pour étudier la sensibilité des résultats à des variations des conditions d'entrée (étude paramétrique), et évaluer ainsi la marge dégagée par le dimensionnement.

Deux types de profils ont été testés : un profil courant (cf. Figure 3) et un profil singulier au droit du rejet en Gironde pour lequel le mur pare-houle est incurvé, et dont le chargement en enrochements doit être limité pour des raisons géotechniques.

Profil de digue optimisé : Les critères d'optimisation adoptés sont :

- Aucun dommage ou dommages insignifiants sur les enrochements de la carapace
- Débit de franchissement inférieur à 10⁻⁴ m³/s/ml (soit un facteur de réduction de 500 par rapport à l'événement du 27/12/99, alors que les conditions hydro-météorologiques sont encore plus sévères que celles du 27/12/99).
- Efforts limités en tête des ouvrages (mur anti-houle)

A titre d'illustration, on donne sur la Figure 4 une vue de l'interaction entre une vague maximale d'un train de vagues et le profil singulier muni du mur pare-houle incurvé, observée lors d'un test de sensibilité, pour une condition de niveau de Gironde supérieur à la CMS de 0.9 m.

Les tests s'effectuant en canal, avec une incidence de la houle nulle par rapport à l'ouvrage (houle frontale), on se trouve dans des conditions plus défavorables qu'en nature où les vagues les plus fortes se présentent en incidence oblique. Par ailleurs, à partir des résultats obtenus en laboratoire, un facteur correctif prenant en

compte les effets de rabattement par le vent sur l'amplification du débit de franchissement a été appliqué (facteur estimé d'après expertise à une valeur maximale et sécuritaire de 2).

Après plusieurs types de profils testés, en tenant compte des contraintes imposées par l'existant et la stabilité des sols, et en intégrant des marges significatives sur les paramètres dimensionnants, le choix s'est porté sur deux profils pour les parties courante et singulière. Le profil courant (Figure 3) comprend deux pentes de 2/1, séparées par une risberme horizontale de 6 m de largeur. La berme supérieure horizontale, à la cote 7.50 m NGF O, précède le mur droit anti-franchissement dont la cote d'arase est à +8.50 m NGF O. Cette protection est constituée d'enrochements naturels de 1.5 à 2.7 T. Le profil singulier au droit du rejet (cf. Figures 4 et 5) est muni d'un mur anti-franchissement incurvé et d'un cordon brise-lames éloigné de la digue, pour garantir des franchissements et des efforts limités, tout en permettant de ne pas trop charger le sol à cet endroit. La Figure 5 donne une vue globale des travaux réalisés sur la digue en front de Gironde.

IV - CONCLUSION

La mise en oeuvre conjointe des modélisations numérique et physique, liée par un travail d'expertise important, a permis, dans un temps très contraint, de (i) comprendre les phénomènes observés sur le CNPE du Blayais lors de la tempête du 27/12/1999, (ii) proposer de nouvelles conditions d'aléas hydrauliques extrêmes (marée+surcote, et vagues), et (iii) fournir un dimensionnement optimal d'une nouvelle protection contre l'inondation. Le recours à la modélisation expérimentale a constitué un atout indiscutable pour garantir un niveau de confiance dans les évaluations quantitatives de certains paramètres (en particulier le franchissement) et affiner le dimensionnement de la digue en front de Gironde en fonction des différentes contraintes (profil courant + profil singulier au droit du rejet). Ce travail s'est enfin accompagné d'une révision de l'ensemble des lignes de défense du site contre ce type de risque, au-delà de la protection passive par des dispositifs fixes : système d'alerte hydro-météorologique et procédures de conduite.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C.E.R.C. (1984). Shore Protection Manual, Volume I. *US Army Corps of Eng. Ed.*
- [2] Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) I.2.e (1984). Prise en compte du risque inondation. *Ministère de l'Industrie. Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires. 12 Avril 1984.*
- [3] GODA Y. (1985). Random Seas and Design of Maritime Structures. *Univ. Tokyo Press Ed, 324 p.*
- [4] BENOIT M., AELBRECHT D., BELLUE G., LUCK M., VIOLEAU D. (2001). Propagation des houles et des surcotes extrêmes vers les côtes et estuaires. Apports de la modélisation numérique. *Séminaire SHF - UOF « les Conditions maritimes extrêmes : prévision, évolutions, impacts » - Juin 2001. La Houille Blanche, N°2-2002, pp 86-89*
- [5] MIQUEL J. (1984). Guide pratique d'estimation des probabilités de crues. *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. N° 53. Editions EYROLLES, (Paris), 160 p.*
- [6] R. BONNEFILLE (1992). Cours d'hydraulique maritime. *Editions MASSON.*
- [7] FEUILLET J., COËFFE Y., BERNIER J., CHALOIN B. (1987). Le dimensionnement des digues à talus. *Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. N° 64. Editions EYROLLES, (Paris), 174 p.*

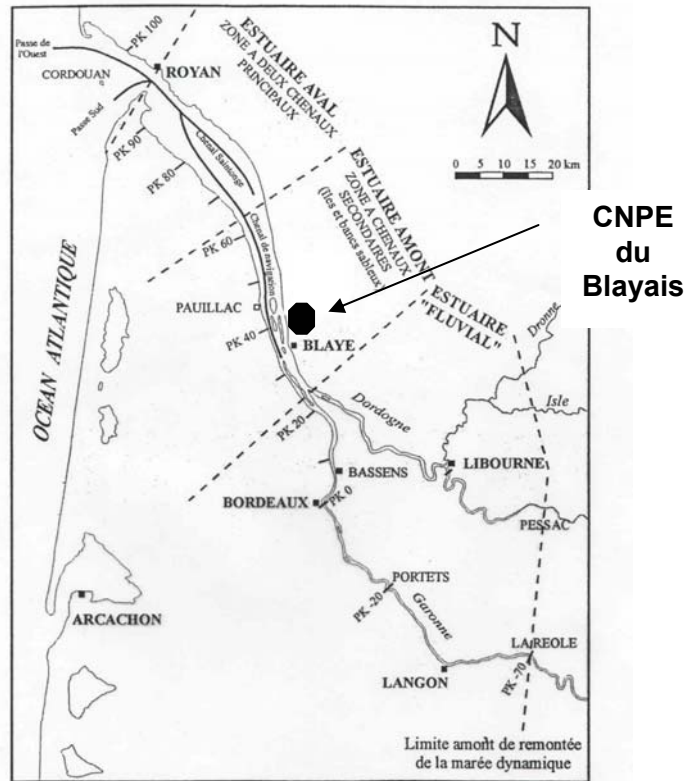


Figure 1 - Localisation géographique du CNPE du Blayais (carte d'après thèse de Sottolichio, 1999)

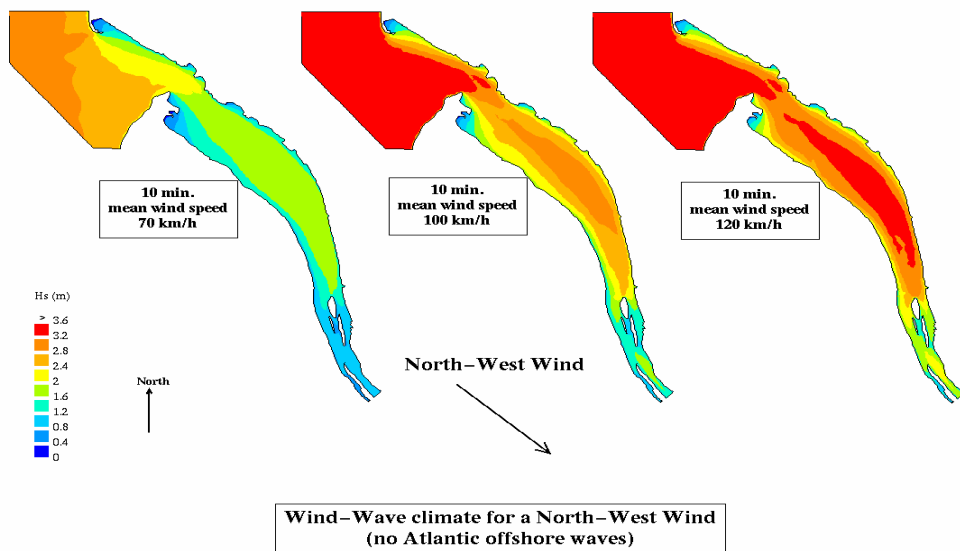


Figure 2 - TOMAWAC : Modélisation de la houle en Gironde pour différentes intensité de vent local de Nord-Ouest (pas de houle océanique imposée en entrée de l'estuaire)

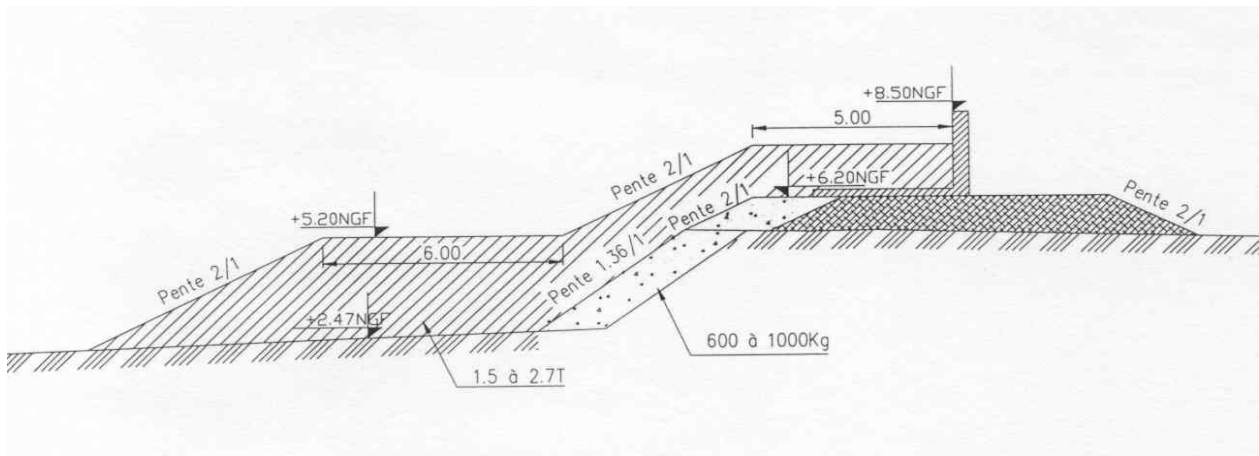


Figure 3 - Optimisation du profil de digue (profil courant)



Figure 4 - Vague maximale heurtant le profil singulier muni d'un dispositif pare-houle incurvé (test de sensibilité pour une condition de niveau de Gironde supérieur à la CMS de 0.9 m)



Figure 5 - Vue globale des ouvrages réalisés (profil courant et profil singulier au droit du rejet)