

## Propositions d'adaptation des marinas et ports de plaisance à l'élévation du niveau marin d'ici 2050-2100

Jean-Marc BEYNET<sup>1</sup>, Jean-Claude PICCIO<sup>2</sup>

1. Ingénieur conseil en aménagements littoraux et portuaires maritimes et fluviaux  
35 rue de Peyrouse, 30320 Marguerittes, France.  
*beynet.consult@gmail.com*
2. Ingénieur conseil, 40 impasse des Posidonies, 30240 Le Grau du Roi, France.  
*jcpiccioconsult@free.fr*

### Résumé :

En Europe, et en particulier en France, plusieurs marinas et ports de plaisance ont été réalisés dans les années 1960-70, époque à laquelle on ne se préoccupait pas encore des risques d'élévation du niveau marin dans les décennies à venir, en raison du dérèglement climatique généré par nos rejets de CO<sub>2</sub> et méthane dans l'atmosphère. Actuellement, suite aux rapports successifs du GIEC, en particulier le dernier (2021), on constate déjà une élévation moyenne de 20 cm depuis 1970 et il est certain que le niveau marin va encore augmenter, et de façon plus rapide, dans les décennies à venir. Pour que les marinas et ports existants restent fonctionnels, des adaptations devront être mises en œuvre sur les infrastructures de protection extérieure en les surélevant par exemple pour limiter les franchissements (KOPPE, 2018). Dans certains cas, il sera judicieux de profiter de ces travaux d'adaptation pour inclure des dispositifs houlomoteurs de production d'énergie, dans les digues de protection. Il va être nécessaire de surélever également les ouvrages intérieurs comme les quais et pontons fixes type estacades sur pieux et des solutions à base de profilés pultrudés paraissent intéressantes pour ces ouvrages intérieurs des ports. Quant aux marinas, si les planchers du rez-de-chaussée des habitations sont calés trop bas, il sera difficile de les adapter. Dans de tels cas, une certaine protection contre la submersion marine pourrait être apportée temporairement lors des épisodes de marée barométrique, par des batardeaux positionnés dans des glissières devant les seuils des portes et baies vitrées.

**Mots-clés :** Marinas, Ports de plaisance, Adaptation élévation niveau marin, Digues, Quais, Pontons fixes, Estacades sur pieux, Gabions, Profilés pultrudés.

### 1. Elévation prévisible du niveau marin sur la période 2050-2100

L'élévation du niveau marin est inéluctable, comme le montre le graphe issu du rapport AR6 du GIEC paru le 9 août 2021 (figure 1). L'élévation constatée depuis 1970 a été de 20 cm environ jusqu'à nos jours, soit sur les cinquante dernières années.

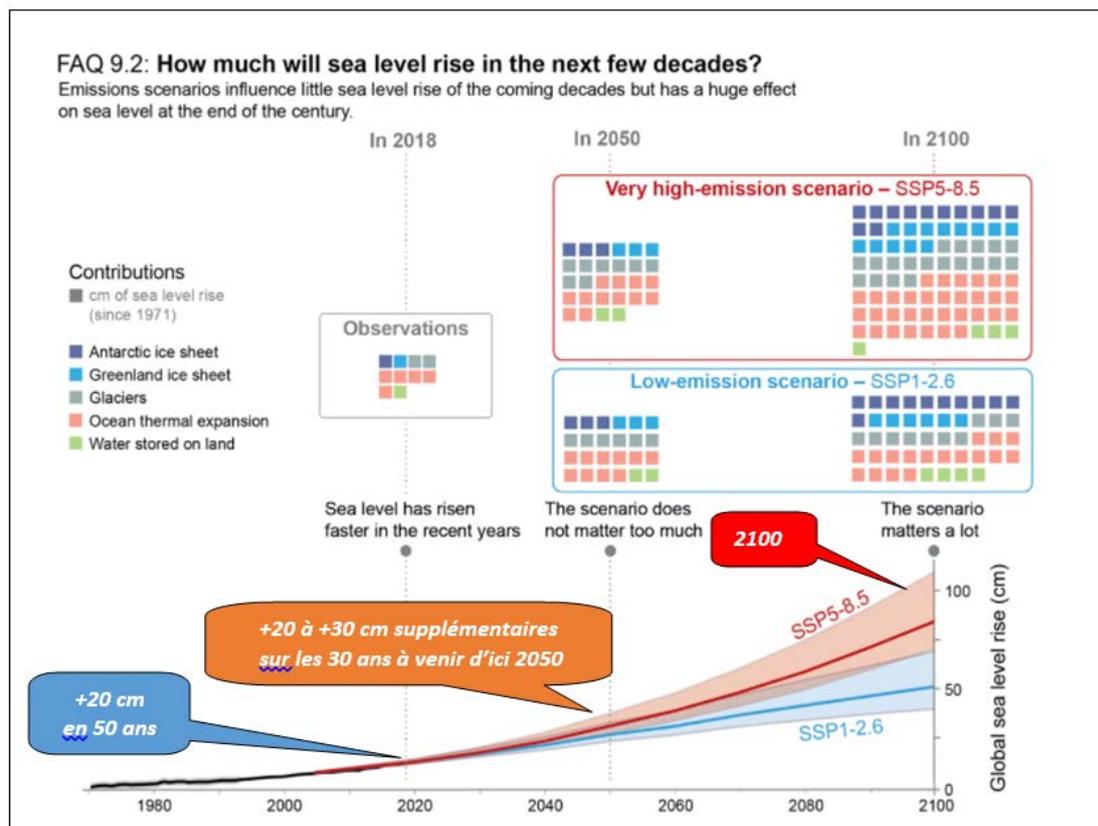


Figure 1. Elévation prévisible du niveau marin (Selon AR6 du GIEC, août 2021).

Et le niveau de la mer devrait s'élever encore de +20 à +30 cm supplémentaires d'ici 2050, (soit au total +40 à +50 cm, par rapport à 1970) et même beaucoup plus d'ici 2100. Cependant, comme cela est mis en évidence sur le graphe de la figure 1, l'évolution à court terme, et même jusqu'en 2050 environ, dépend peu de nos émissions actuelles de GES. En revanche, à l'horizon 2100, ces émissions peuvent en changer considérablement l'amplitude.

Actuellement il est trop tôt pour se projeter à la fin du siècle, d'une part parce que c'est encore loin (8 décennies) et d'autre part, car l'incertitude sur l'élévation du niveau de la mer est trop importante pour définir et optimiser les travaux d'adaptation. Cette incertitude dépend directement de l'évolution des rejets de CO<sub>2</sub> et méthane de la génération actuelle dans l'atmosphère. Comme l'a dit le philosophe Henri Bergson : « *L'avenir n'est pas ce qui va arriver, mais ce que nous allons faire* ».

Par contre, il est conseillé de se préparer dès à présent à l'élévation du niveau marin d'ici 2050, d'une part car la valeur est connue de manière assez précise (à 10 cm près) et d'autre part, l'échéance n'est pas si éloignée, si on tient compte du temps nécessaire pour réaliser les études d'abord, puis les travaux ensuite.

## **2. Collecte archives/bibliographie et levés topographiques à réaliser**

Avant de proposer des adaptations aux infrastructures portuaires actuelles, il sera nécessaire de bien connaître l'existant en collectant les archives (si elles existent), comme par exemple les plans de récolement, appelés aussi parfois DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés). A défaut de pouvoir rassembler de telles archives, il est généralement possible sur les côtes françaises de visualiser la topographie et la bathymétrie sur Litto3D® (SHOM-IGN), avec une précision altimétrique de 20 cm en principe. Même si des archives permettent de connaître les niveaux des digues au moment de leur réalisation il y a une cinquantaine d'années, le MNT de Litto3D® présentera de l'intérêt, ne serait-ce que pour s'assurer qu'il n'y a pas eu de tassement notable du profil en long des digues extérieures de protection depuis leur édification.

Il sera intéressant également de consulter la bibliographie qui existe déjà sur le sujet de l'adaptation des infrastructures portuaires face à l'élévation du niveau marin (CEREMA, 2012 ; SCOTT *et al.*, 2013 ; LACROIX *et al.*, 2019 ; AIPCN, 2020 ; BEYNET *et al.*, 2020 ; VALERO, 2020).

## **3. Propositions d'adaptation des ouvrages extérieurs de protection**

Dès 2010-2012, dans le cadre du projet Sao Polo, le CETMEF/CEREMA soulignait que si la mer monte de 1 m d'ici 2100, il faudra surélever les digues de près du double. Philippe Sergent, directeur scientifique du CEREMA l'expliquait ainsi à l'époque :

*« Lorsque la houle se met à déferler, son amplitude est d'autant plus grande que le fond est lointain. Du fait de l'élévation de la mer, la profondeur augmenterait d'un mètre au droit de la digue, la vague serait donc plus haute qu'initialement. Cet effet s'ajoute à la hausse du niveau de la mer, si bien que lorsque le niveau de la mer augmente d'un mètre, la sur-hauteur de digue nécessaire, à protection égale, est de 2 m pour les digues en enrochements. Ainsi, même si les tempêtes futures ne diffèrent pas de ce qu'elles sont aujourd'hui, la hauteur de houle augmentera du fait de la seule élévation du niveau de la mer... »*

Pour l'horizon 2050, pour limiter leur franchissement, les digues de protection devront donc être surélevées de +1 m environ. Si on veut les adapter plus tard pour l'horizon 2100, il est conseillé de faire en sorte que la conception de la surélévation nécessaire d'ici 2050 puisse s'intégrer dans l'élévation supplémentaire future de 2100. Cela pourrait être possible de manière assez simple en disposant dans un premier temps, une rangée de gabions (avec cages en fils d'acier à faible teneur en carbone + galvanisation longue durée et gaine de protection polymérique additionnelle) de section 1 m x 1 m sur la crête de digue existante, du côté intérieur de préférence.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

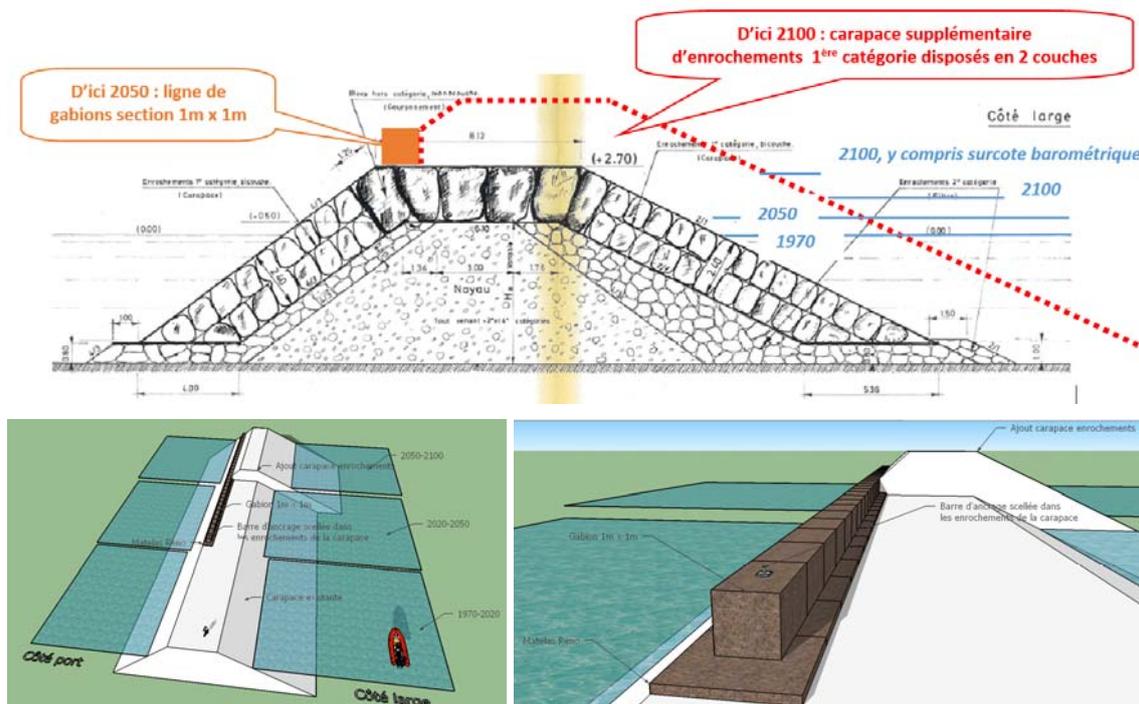


Figure 2. Profil en travers type et perspective des principes d'adaptation au niveau marin d'un ouvrage extérieur de protection aux horizons 2050 d'abord, puis 2100 ensuite (© Beynet, 2022). Adaptations données à titre indicatif, sur l'exemple de la Digue Sud de Port-Camargue (Source du profil en travers initial : Archives CCI Gard).

Si les enrochements du couronnement sont trop irréguliers, un matelas Reno<sup>®</sup> de 15 cm d'épaisseur et de 2 m de largeur pourrait être disposé sur la crête pour « lisser » les irrégularités avant de disposer la ligne de gabion. Par ailleurs, si des tests sur modèle réduit révèlent que les gabions ne seront pas suffisamment stables aux impacts des vagues, ces derniers pourraient être ancrés au moyen d'une tige préalablement scellée dans les enrochements de la carapace avant remplissage des cages de gabion (PLASTRE *et al.*, 2016). Ils pourraient aussi être maintenus par des chaînes scellées dans la carapace. Une telle surélévation est assez facile à réaliser et n'aura en principe pas à être déposée préalablement à l'élévation supplémentaire en second temps, nécessaire d'ici 2100, qui elle, sera beaucoup plus haute, de l'ordre de 2 à 3 m probablement en fonction de la diminution (ou pas) des rejets de CO<sub>2</sub> et méthane dans l'atmosphère, par notre génération actuelle et par celles qui suivront.

Ces travaux à réaliser d'ici 2100 seront de plus grande ampleur que ceux à programmer d'ici 2050. Ils pourraient être mis à profit en intégrant dans la conception de la surélévation des digues, un ou plusieurs caissons houlomoteurs destinés à produire une part d'énergie renouvelable grâce aux houles qui viennent impacter le talus extérieur de la digue. Selon le Guide du CEREMA, il existe plusieurs types de dispositifs : « à franchissement » (prototype OBREC) ou bien de type « batteur inversé » (OYSTER,

WaveRoller, bioWAVE, WRASPA), ou encore de type « flotteur oscillant » (SDE, Hyperbaric converter), ou enfin de type « colonne d'eau oscillante » (OWC). Le choix et l'optimisation d'un éventuel dispositif de récupération de l'énergie de la houle dépendra de chaque site et devra faire l'objet d'une évaluation « coût-bénéfice ». Selon le Guide du CEREMA, *Systèmes houlomoteurs bords à quai, guide de conception en phase avant-projet*, un dispositif installé sur un linéaire de 100 m, avec une bonne exposition à la houle, peut potentiellement produire une énergie annuelle de 2 GWh environ, correspondant à une recette annuelle de 300 k€ environ (CEREMA, 2020).

#### 4. Propositions d'adaptation des ouvrages intérieurs (quais, pontons fixes type estacades sur pieux, etc.)

Les quais des marinas existantes ont parfois été réalisés par mise en œuvre de palplanches (exemple Port-Grimaud au fond du Golfe de Saint-Tropez dans les années 1970, ou plus récemment, la marina du Port-du-Roy à Aigues-Mortes). Dans d'autres cas, le dragage du bassin a été réalisé à sec à l'abri de batardeaux, permettant de construire les quais également à sec, en recouvrant un talus enroché et en coulant une semelle filante de fondation de poteaux régulièrement espacés, comme cela a été le cas à Port-Camargue, grande marina réalisée par la CCI de Nîmes, en prolongement de la Mission Racine en Languedoc-Roussillon (région Occitanie actuellement).



*Photos 1 et 2 : à gauche, réalisation à sec des quais des marinas de Port-Camargue et, à droite, ponton en 1970 (clichés © Hervé Collignon, Archives municipales de Nîmes).*

Ces poteaux et la longrine arrière supportent une dalle préfabriquée en béton armé qui constitue le quai proprement dit et dont la magistrale a été calée à + 1m NGF environ à l'époque. Au moment de la construction en 1970, la revanche moyenne était donc de 1 m, hors phénomène de surcote (marée barométrique).

Si des travaux d'adaptation ne sont pas entrepris d'ici 2050, cette revanche sera réduite à seulement 50 cm, ce qui est insuffisant lorsqu'on prend en compte les risques de

## *Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance*

marées barométriques, qui peuvent atteindre 70 à 80 cm, quelques jours par an en hiver, comme cela a déjà été le cas par exemple en 1982, 1997 et aussi 1999.

Il faut donc envisager la surélévation des quais de 40 à 50 cm, ainsi que les pontons fixes du type estacade sur pieux. Pour les pannes flottantes, c'est l'arase des pieux qu'il faudra revoir en soudant une virole supplémentaire en tête, de manière à conserver une marge de sécurité et éviter que les pontons se décrochent lors des marées barométriques. Pour surélever les ouvrages intérieurs comme les quais et pannes, des solutions qui mettent en œuvre des profilés pultrudés sont intéressantes. De tels profilés à base de résines, sont fabriqués par un procédé de pultrusion, qui est en fait la polymérisation à chaud d'un profilé étiré dans une filière. Ils peuvent contenir un pourcentage assez élevé de fibre de verre, ce qui leur apporte une résistance mécanique importante, comparable à celle des profilés métalliques. Par rapport à des profilés classiques en acier, ils présentent plusieurs avantages, comme par exemple leur excellente résistance à la corrosion (insensibilité aux chlorures de l'eau de mer) ainsi que leur légèreté. A inertie équivalente à des profilés en acier, les profils pultrudés sont environ trois fois plus légers. Ils peuvent donc généralement être manutentionnés à la main par deux personnes, ce qui est appréciable pour intervenir en réhabilitation de quais de marinas où des moyens mécaniques de manutention ne pourraient pas accéder facilement, même sur un ponton flottant.

Une telle solution a déjà été mise en œuvre à Port-Camargue dès 2001, après l'effondrement de certaines dalles qui avaient 30 ans d'âge (voir Photos 3 à 6). Notons, aussi que là où les quais ont été réalisés par des dalles préfabriquées en béton armé, si elles sont maintenues en place, ces dalles subiront des sous-pressions importantes à l'avenir en raison de l'augmentation du niveau de la mer et des clapots. Il sera souhaitable de les remplacer par des caillebotis ajourés, qui eux aussi pourraient être en matériaux à base de résines et fibres de verre.



*Photos 3 à 6 : Exemple de réhabilitation de quais en profilés et caillebotis pultrudés à Port-Camargue (Clichés © J.-C. Piccio, P. Ferrari, 2001).*

Notons enfin que pour les marinas et ports de plaisance dont les quais sont verticaux, limités par des rideaux de palplanches métalliques, il est souvent possible de les

réhabiliter eux aussi et de les surélever, en remplaçant les palplanches métalliques par des palplanches en PVC.

### **5. Protection partielle et temporaire du rez-de-chaussée des marinas**

Si les planchers du rez-de-chaussée des habitations sont calés trop bas, il sera difficile de les adapter. Dans de tels cas, une certaine protection contre la submersion marine pourrait être apportée temporairement lors des épisodes de marée barométrique, par des batardeaux positionnés dans des glissières devant les seuils des portes et baies vitrées. On peut espérer gagner ainsi quelques décimètres. Mais l'étanchéité ne pourra pas être garantie et cette protection ne sera que provisoire, quelques heures ou quelques jours par an, en saison hivernale, lors de la concomitance d'une marée barométrique avec une marée astronomique.

### **6. Conclusions**

Les marinas et ports de plaisance réalisés dans les années 1960-70, sont devenus vulnérables à l'élévation du niveau marin dans les décennies à venir, car lors de leur conception, le dérèglement climatique généré par nos rejets de CO<sub>2</sub> et méthane dans l'atmosphère n'était pas bien connu et l'élévation future du niveau marin n'avait pas été prise en compte. Il va être nécessaire de surélever la plupart des infrastructures portuaires pour rester hors d'eau dans les décennies à venir. Des solutions relativement simples sont envisageables pour s'adapter d'ici 2050. Nous venons de les décrire. Au-delà, en 2100, ce sera plus difficile, d'une part car on ne connaît pas aujourd'hui avec certitude de quelle valeur il faudrait les surélever et d'autre part, même si on arrive à augmenter la hauteur des ouvrages de protection et des quais intérieurs, on ne pourra pas facilement adapter le rez-de-chaussée des habitations des marinas. Des solutions évolutives existent pour les marinas du futur, comme par exemple l'habitat flottant et/ou l'habitat sur pilotis (BEYNET, *et al.*, 2020). Que ce soit aux horizons 2050 ou 2100, les solutions proposées ici sont données à titre indicatif, sans responsabilité des auteurs à ce stade. Avant d'être mises en œuvre, elles devront obligatoirement faire l'objet d'études complémentaires détaillées aussi bien pour le génie-civil portuaire, que pour l'hydrodynamique, en prenant en compte les conditions réelles (climats de houles) de chaque site. En plus de modélisations numériques, il se pourrait que des modélisations physiques soient nécessaires par exemple, pour vérifier les hypothèses de franchissement des digues à talus ainsi que la nature et la blocométrie pour assurer la stabilité des carapaces qui devront être ajoutées d'ici la fin du siècle.

### **Remerciements**

Les auteurs remercient les services d'archives de la CCI du Gard et de la ville de Nîmes pour la mise à dispositions de plans et photos.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

### 7. Références bibliographiques

- AIPCN/PIANC (2020). *Climate change adaptation planning for ports and inland waterways*. EnvirCom WG Report n°178, 2020. <https://www.pianc.org/publications/envicom/wg178>
- BECKER A.H. (2021). *Préparer les ports et les villes portuaires au changement climatique, atténuation et adaptation*, Publication AIVP, mars 2021. <https://www.aivp.org/newsroom/preparer-les-ports-et-les-villes-portuaires-au-changement-climatique-attenuation-et-adaptation/>
- BEYNET J.M., REDON J.P. (2020). *Propositions de conceptions évolutives des marinas du futur, en tenant compte de l'élévation prévisible du niveau des mers*. XVI<sup>ème</sup> Journées Génie-Côtier, Génie-Civil Le Havre, 2020. doi 10.5150/jngcgc.2020.046
- CEREMA (2012). *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 océans*, Projet SAO POLO GICC N°G.9-0006812, Coordinateur Philippe Sergent, août 2012.
- CEREMA (2020). *Systèmes houlomoteurs bords à quai, guide de conception en phase avant-projet*, IREX, Collection Connaissances.
- CNUCED (2020). *Adaptation des ports maritimes aux changements climatiques à l'appui du Programme de développement durable à l'horizon 2030*. Conseil du commerce et du développement, Réunion d'experts pluriannuelle sur les transports, la logistique commerciale et la facilitation du commerce, 8<sup>ème</sup> session, Genève 20-22 avril 2020.
- GIEC (2019). *The ocean and cryosphere in a changing climate*, Special Report. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- GIEC (2021). *AR6, Rapport du Groupe de travail n°1*, publié le 9/08/2021.
- KOPPE B. (2018). *Seaports and climate change – Impacts and adaptation options*, Revue Paralia, volume 11, pp s03.1–s03.12, doi : 10.5150/revue-paralia.2018.s03
- LACROIX D., MORA O., DE MENTHIERE N., BETHINGER A. (2019). *La montée du niveau de la mer : conséquences et anticipations d'ici 2100, l'éclairage de la prospective*. Rapport d'étude AllEnvi, Alliance nationale de recherche pour l'Environnement, Octobre 2019, 172 p. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00598/70975/>
- PLASTRE A., COTE B. (2016). *Ouvrages hydrauliques en gabions pour la sécurisation du bassin versant instable des Bouisses (06)*, Revue Travaux N°922, mars 2016. <https://www.maccaferri.com/fr/des-gabion-matelas-reno-pour-securer-le-bassin-versant-instable-des-bouisses/>
- SCOTT H., Mc EVOY D., CHHETRI P., BASIC F., MULLE J. (2013). *Climate change adaptation guidelines for ports – Enhancing the resilience of seaports to a changing climate report*, NCCARF, RMIT University 2013.
- VALERO C. (2020). *L'adaptation des ports maritimes aux conséquences du changement climatique*, ISEMAR (Institut supérieur d'économie maritime Nantes / Saint-Nazaire), Note de synthèse N°219, avril 2020.