

# Analyse fréquentielle des niveaux marins pour l'estimation des surcotes extrêmes et des tendances sur le long terme (changement climatique) Marseille Endoume (1885-2003)

*Pierre Gaufres\*, Guy Woppelmann\*\*, François Sabatier\*\*\**

Le recul tendanciel du littoral camarguais observé au cours du XX<sup>e</sup> siècle contraint les aménageurs, les gestionnaires et la communauté scientifique à réfléchir activement sur le fonctionnement morphologique des plages sableuses (Provansal *et al.*, 2003) et les forçages météo marins (Sabatier *et al.*, 2003). L'érosion et la submersion marine exigent de caractériser les niveaux marins extrêmes (historiques, a minima centennaux) pour les PPR littoraux.

Au plan national, l'analyse fréquentielle des niveaux marins extrêmes a été réalisée par le SHOM sur les façades Atlantique et Manche à partir d'une étude statistique pour les besoins de la navigation essentiellement (Simon, 1994). Plus récemment, suite aux tempêtes de décembre 1999 et à l'inondation de la centrale nucléaire du Blayais (Gironde), EDF a été amené à recalculer les conditions de calage altimétrique des plateformes des centrales nucléaires. Les variations récentes des facteurs météorologiques à Brest ont été étudiés (Pirazzoli, 2000), mais aucune étude exhaustive et comparative des données marégraphiques côtières n'a été effectuée à ce jour pour la façade méditerranéenne française.

Cette étude a pour objectif de définir une méthodologie de calcul des valeurs extrêmes de surcotes en Méditerranée et caractériser les événements de tempête associés en terme fréquentiel. Elle s'inscrit dans la continuité des travaux de sur l'impact des tempêtes sur le littoral oriental du delta du Rhône (Bruzzi, 1998), sur le contrôle de la mesure de niveau marin à Marseille (Woppelmann, 1997) et sur l'inférence statistique des niveaux marins extrêmes (Walton, 2000).

---

\* CETMEF, Centre d'études techniques maritimes et fluviales, 2 bd du Président-Kennedy, BP 543, 13092 Aix-en-Provence cedex 02, France

\*\* CLDG, Centre littoral de géophysique, Université de La Rochelle, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle cedex 1, France

\*\*\* CEREGE, Centre européen de recherche et d'enseignement en géosciences de l'environnement, Europol de L'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 04, France

## Le phénomène de surcote

L'interface hydrosphère/atmosphère est en perpétuelle interaction. Ces mouvements résultant de la superposition de plusieurs phénomènes généralement indépendants peuvent se distinguer par leurs échelles de temps :

- des phénomènes à faible pas de temps : les vagues et les houles, les seiches, les tsunamis.
- des phénomènes à pas de temps moyen, de l'ordre de grandeur de la journée : la marée astronomique, les surcotes.
- des phénomènes à évolution très lente : la variation séculaire du niveau marin (eustatisme).

Existent aussi à côté de ces variations temporelles des variations spatiales du niveau marin dues aux effets stériques (température et salinité), aux mouvements du sol (isostasie, subsidence), aux effets géophysiques (géoïde...). Dans le cadre de cette étude les parties extrêmes du spectre : vagues, houles et variations de très longue période ne sont pas traitées.

Mis à part les phénomènes de haute fréquence, les variations du niveau de la mer dans les échelles de temps allant de quelques heures à quelques jours sont le résultat de deux processus : des phénomènes aléatoires d'origine essentiellement météorologique appelés surcotes se superposent à des mouvements réguliers et prédictibles d'origine astronomique : les marées. En Méditerranée française, le marnage maximal est de l'ordre de 0,40 m (conditions micro tidales de type semi-diurne à inégalité diurne). Les surcotes résultent de l'influence des forçages météomarins sur la surface océanique. Le phénomène consiste en une fluctuation locale et temporaire du niveau marin provoquée par le vent et la pression atmosphérique essentiellement. L'élévation du niveau de la mer due à de faibles pressions est appelée « effet barométrique inverse » : une baisse de pression un hectopascal génère une hausse d'un centimètre environ du niveau marin si le système dépressionnaire est stationnaire et après un temps suffisamment long pour obtenir l'équilibre. Cette valeur, observée loin des côtes et en eau profonde, peut être plus ou moins élevée selon la topographie du fond et la vitesse de déplacement de la perturbation. À proximité du littoral, les effets dynamiques prennent de l'ampleur et le vent, principal agent, amplifie la surcote. Il exerce une force de traînée à la surface de l'eau et incline localement le plan d'eau. Les surcotes se propagent sous la forme d'ondes qui interagissent de manière complexe au gré de la bathymétrie locale et de la morphologie côtière ; on parle d'onde de tempête (en anglais *storm surge*). Enfin, les courants géostrophiques générés par les vents sont influencés par la force d'entraînement de Coriolis et déviés à droite dans l'hémisphère Nord. Ainsi, en Méditerranée Occidentale française, l'effet conjugué de l'orographie sur les vents parallèles à la côte et de la force

de Coriolis sur les courants augmente localement le niveau marin. Dans cette zone, les surcotes sont les causes de variation du niveau marin les plus importantes (extrema historiques de 1 à 2 mètres observés lors de tempêtes). L'indépendance des phénomènes de surcote et de marée sur la plupart des sites a été mise en évidence par (Pugh et Vassie, 1978), ce qui permet de considérer la surcote comme une variable aléatoire, préalable essentiel à l'analyse statistique fréquentielle, notamment en Méditerranée française. Au plan fréquentiel, les surcotes sont des signaux de moyenne fréquence comparativement aux houles et sèches, et correspondent à des perturbations locales qui se décorrèlent très vite dans le temps. On observe une montée et une chute rapide de la surface océanique en réponse aux forçages météorologiques. La surcote en un lieu se calcule alors comme la différence arithmétique entre la hauteur réelle du niveau de la mer observé et de la marée astronomique calculée; elle constitue donc un résidu apériodique, aléatoire (en anglais *non-tidal component* ou *meteorological residual*). Lorsque cette différence est négative, on parle de décote.

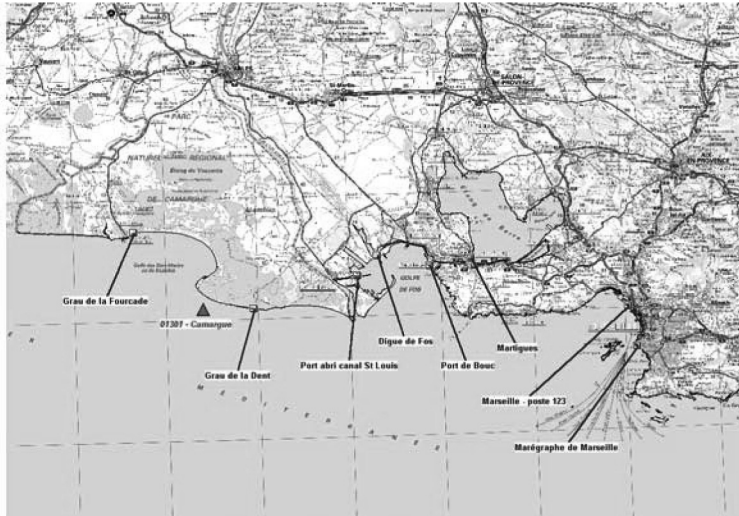
## Méthode

### *Données utilisées - Le marégraphe de Marseille Endoume*

Les variations du niveau de la mer sont mesurées à l'aide de marégraphes côtiers, parfois depuis le XIX<sup>e</sup> siècle. Ces observations in situ, complétées aujourd'hui par l'altimétrie spatiale, sont très utiles car elles constituent une référence historique en fournissant la variation relative du niveau de la mer par rapport à la côte. À l'échelle de la façade méditerranéenne française, le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), organisme national en charge pour la France de la prédiction de la marée, a instrumenté les sites de navigation ayant des enjeux stratégiques (Sète, Marseille, Toulon, Nice, Monaco, Ajaccio). Ces sites de mesures ont été complétés par des instruments installés par les gestionnaires du littoral, mais les séries disponibles se limitent à deux ou trois décennies au maximum (figure 1).

Le marégraphe de Marseille dans l'Anse Calvo (Endoume), en service depuis février 1885, fait partie du réseau du GLOSS (Global Sea Level Observing System) de 1<sup>re</sup> catégorie et constitue l'une des plus anciennes chroniques au monde au pas horaire (IOC, 1997). La richesse de cette série est unique en Méditerranée française (figure 2). Ainsi, la longueur remarquable de la chronique autorise l'exploration comparative des outils d'analyse fréquentielle, permet l'élaboration d'une méthodologie pour la caractérisation des valeurs extrêmes et l'étude des tendances à long terme (stationnarité, impact du changement climatique). À l'origine conçu pour la définition du système altimétrique français par le Service du Nivellement

Figure 1 : Implantation des marégraphes côtiers - Baie de Marseille et Golfe de Fos

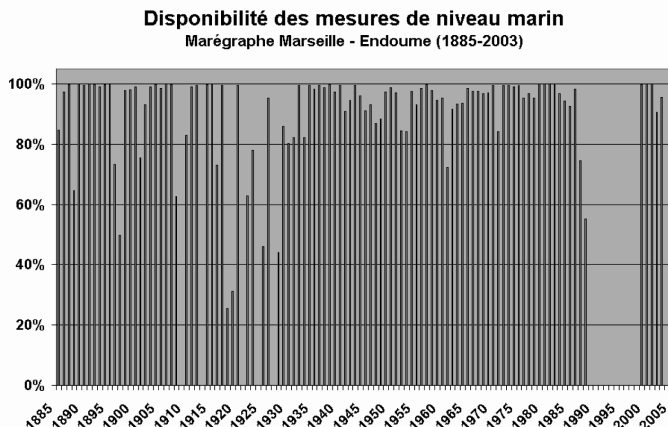


Général de la France (NGF), le marégraphe à flotteur de Marseille produit deux séries de mesures :

- les enregistrements sur rouleaux papier, appelés marégrammes, qui fournissent la variation temporelle du niveau de la mer en continu,
- les moyennes temporelles du niveau de la mer obtenues avec le totalisateur.

Le besoin de données numériques horaires a conduit l'Institut Géographique National (IGN), en collaboration avec le SHOM, à numériser les marégrammes et à mettre en place un Marégraphe Côtier Numérique (MCN) en juillet 1998.

Figure 2 : Disponibilité de la série horaire Marseille Endoume (1885-2003).



### ***Précision et incertitudes***

Dans le cadre du rattachement géodésique des marégraphes par géodésie spatiale dans un système de référence mondial, il a été constaté lors des étalonnages successifs de l'appareil un cycle d'hystérésis ainsi que des frottements mécaniques (Woppelmann, 1997). L'analyse du niveau de stabilité de la référence interne du marégraphe peut atteindre l'ordre de grandeur de la tendance à l'élévation eustatique, d'où l'importance des étalonnages de l'instrument.

Un bilan de la qualité des observations du marégraphe de Marseille (1885-1988) a été réalisé mettant en évidence un certain nombre d'erreurs (manipulation des rouleaux, doublons, calages). Il ressort de ce travail que les données du marégraphe historique sont entachées d'une erreur altimétrique de l'ordre de 7 mm qui doit avoir pour origine la numérisation, mais peut également être la résultante de beaucoup d'autres phénomènes notamment mécaniques du système. L'estimation de la précision des hauteurs horaires des marégrammes est de 12 millimètres par rapport au totalisateur. Globalement, l'instrument permet de garantir une précision altimétrique de l'ordre de 3 mm avec une bonne stabilité dans le temps. Au niveau temporel, une dérive temporelle importante est relevée allant jusqu'à une heure: entre 1885 et 1960 une légère pente de l'ordre de -30 secondes par an est attribuée à une dérive probable de l'horloge. L'intérêt de l'instrument réside dans la fiabilité des mesures de référence du totalisateur qui ont été l'objet d'étalonnages réguliers et d'une attention particulière pendant des décennies.

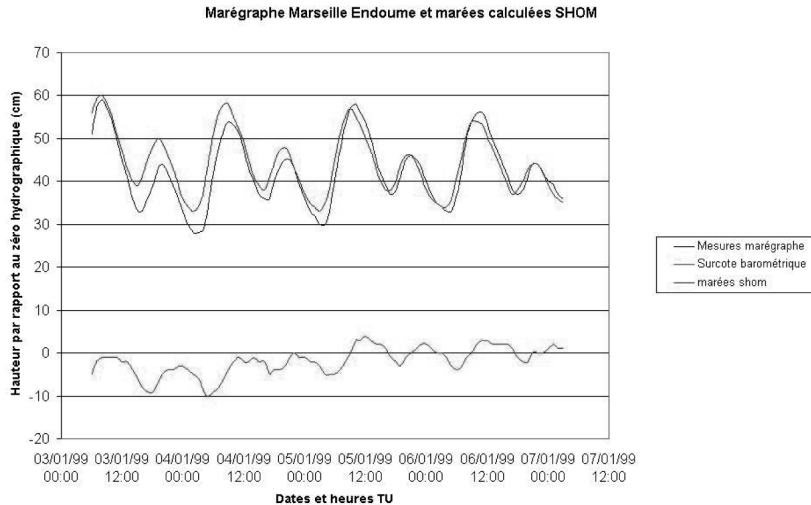
### ***Contrôle de la série - Prétraitement des données***

L'étude consiste à retraiter les enregistrements de marégraphie côtière, extraire de la donnée de niveau marin la marée astronomique, et analyser la distribution en fréquence du résidu (surcote). Les données de niveau marin ont été fournies par le SHOM et l'IGN pour la série (1885-1988), SONEL depuis 1998 ([www.sonel.org](http://www.sonel.org)), et sont en cours de validation conjointement par le SHOM, l'IGN et le LAREG pour les questions citées plus haut. Afin d'extraire le signal météorologique de la donnée brute, la marée prédite à Marseille a été fournie par le SHOM. Les enregistrements marégraphiques sont traités à partir du format suivant (figure 3) où la première colonne représente l'année, la seconde le numéro de la station, la troisième le numéro du jour dans l'année (de 1 à 365 ou 366), les suivantes le niveau marin (référence zéro hydrographique soit -0,297 IGN69). Compte tenu des lacunes (codées 9999), le volume de données horaires exploité est un peu inférieur au million de valeurs.

Dès les premières années de mesure, le contrôle de la série de valeurs confirme le décalage temporel variable par rapport à la marée astrono-



Figure 4: Influence périodique du signal astronomique sur la surcote (janv. 1999)



ultérieurement diffusés avec les méthodes préconisées, une fois la série complète consolidée et validée.

### Outils statistiques d'ajustement et de contrôle

Comme évoquée en introduction, la méthode développée par le SHOM pour le calcul des valeurs extrêmes de niveau marin en Atlantique et Manche (Simon, 1994) n'est pas applicable en Méditerranée. En effet, d'une part l'échantillonnage des niveaux marins correspondant aux pleines mers n'est pas adapté car le phénomène se développe et s'évanouit en quelques heures, d'autre part la définition même de la variable retenue est différente: surcote de pleine mer = différence entre niveau maximal observé et prévu pour une pleine mer. Ainsi, au pas de temps horaire (911 650 valeurs) quelques outils d'inférence statistique sont testés sur la série de Marseille Endoume dans l'objectif de décrire les queues de distribution et estimer la magnitude des événements extrêmes. L'ajustement consiste à trouver une fonction analytique représentant au mieux la fonction de répartition de la variable surcote, autrement dit la fréquence relative cumulée ou probabilité de non-dépassement. Il fait appel classiquement à deux méthodes statistiques :

- *L'analyse fréquentielle des maxima annuels* consiste à classer les plus fortes valeurs annuelles de l'échantillon, associer une fréquence empirique puis choisir parmi les lois usuelles (Gumbel, Weibull, Jenkinson), celle qui s'ajuste le mieux à la série. L'avantage de cette méthode est sa simplicité de mise en œuvre ; en revanche, elle présente l'inconvé-

nient de ne retenir qu'une seule valeur par année. L'information riche des années de tempête n'est pas valorisée alors que les valeurs faibles des années calmes sont sélectionnées pour l'ajustement.

- *L'analyse fréquentielle des valeurs supérieures à un seuil* ou méthode du renouvellement, en anglais POT (Peaks-Over-Threshold) conduit habituellement à de meilleurs ajustements que la méthode par maxima annuels car elle prend en compte l'ensemble de l'information disponible (Lang *et al.*, 1999). Le choix du seuil de référence conditionne la qualité des résultats (Mousavi, 1997) mais correspond à une réalité physique mesurable sur terrain (submersions marines, débordements, brèches du cordon dunaire).

La sélection de l'une ou l'autre de ces méthodes et des différentes lois statistiques ajustées dépend du comportement de la série historique et de l'objectif de l'analyse.

## Résultats

Les principaux résultats de deux lois (Gumbel, 1958) et (Jenkinson, 1969) sont décrits ci-dessous pour l'analyse des maxima annuels. La loi de Gumbel (deux paramètres) est utilisée largement en environnement et constitue au plan théorique l'asymptote des lois de distribution de type GEV. Sur la série (1885-2003), 15 années complètes de données manquantes ont été exclues de l'analyse. L'ajustement de Gumbel (GEV I,  $k = 0$ ) est réalisé avec la méthode du maximum de vraisemblance et la méthode des moments. Selon le test d'adéquation du test Khi-deux de Pearson (dispersion), l'ajustement est validé à 1 %. Globalement, l'ajustement de Gumbel est de bonne qualité pour les événements de période de retour inférieure à  $T = 50$  ans, au-delà on note une tendance nette à surestimer (figure 5). Les deux surcotes les plus fortes s'éloignent de l'ajustement et la valeur maximale sort de l'intervalle de confiance à 95 % (méthode des moments).

La technique d'ajustement utilisant la loi de Jenkinson (figure 6) se révèle être au regard du test d'adéquation (khi-carrée) équivalente à Gumbel. Toutefois, graphiquement la qualité de l'ajustement s'avère bien meilleure pour la queue de l'échantillon ce qui s'explique par un nombre de paramètres de calage plus important (trois). En contrepartie, pour les valeurs extrêmes ( $T > 100$  ans), l'intervalle de confiance s'élargit fortement et rapidement la loi de Jenkinson n'est plus pertinente car le quantile est estimé de façon certaine (à 95 %) sur une plage trop large. Le calage de la loi de Jenkinson (trois paramètres) permet de discuter de l'adéquation des lois de type GEV à la série expérimentale. Le troisième paramètre de calage ( $k = 0.153$ ) est significativement différent de zéro ce qui confirme que la loi de Gumbel ( $k = 0$ ) n'est pas la loi théorique adaptée à cette



Figure 5: Ajustement loi Gumbel  
Méthodes du maximum de vraisemblance et des moments

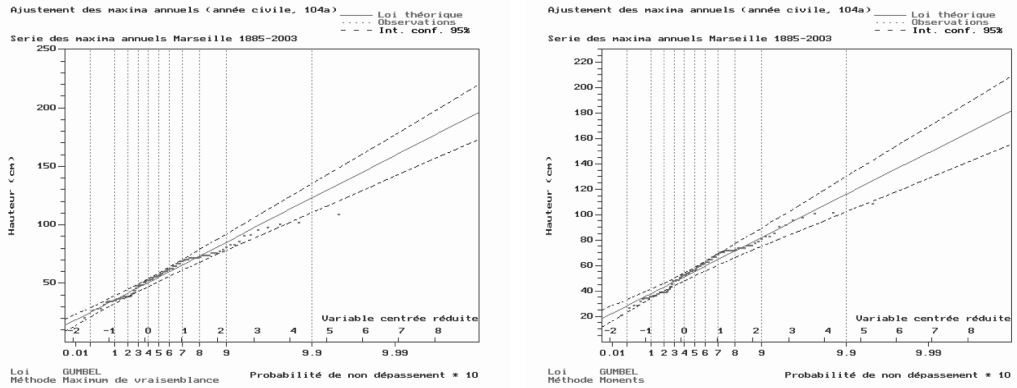
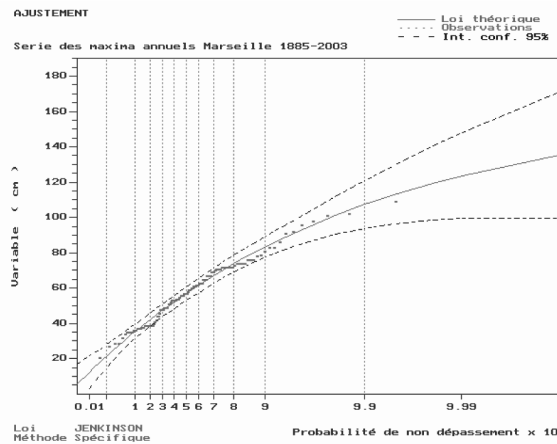


Figure 6: Ajustement loi Jenkinson

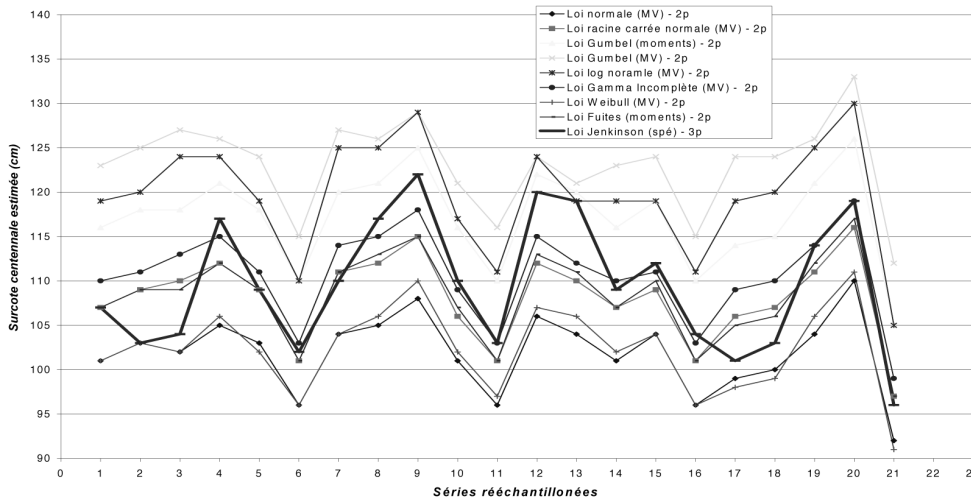


série. Enfin, le paramètre  $k$  de Jenkinson est positif, ce qui permet de trancher le débat sur la tendance des extrêmes : la série des maxima annuels a un comportement hyperexponentiel de type GEV 2 ( $k > 0$ ), caractéristique également des pluies et des débits en hydrologie continentale.

Une analyse de la robustesse (figure 7) des différentes lois testées (Normale, racine carrée normale, Gumbel, Log Normale, Gamma, Weibull, Poisson-Exponentielle, Jenkinson) est décrite (Gaufrès *et al.*, 2005) en utilisant la technique du Bootstrap (Palm, 2002). Le rééchantillonnage avec

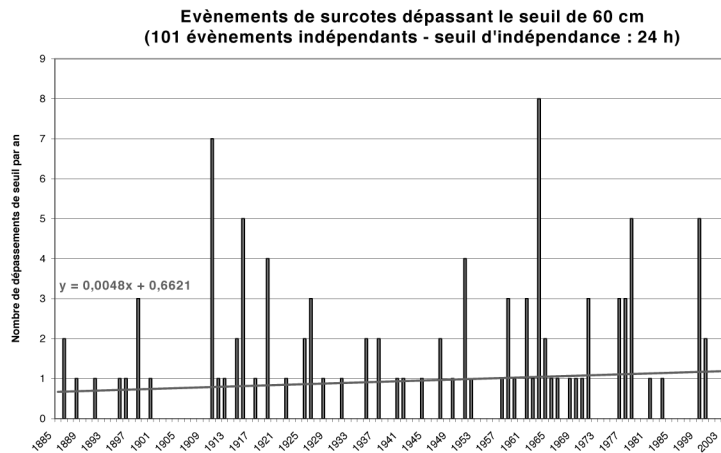
20 échantillons de même taille (104 ans) permet de vérifier la sensibilité des lois à trois paramètres et la robustesse des lois à deux paramètres qui gardent toutes leur position relative les unes par rapport aux autres. Ainsi, l'ajustement de Gumbel dont l'usage est fortement répandu pour l'analyse des valeurs extrêmes, surestime systématiquement, de même les ajustements de Weibull ou Poisson-Exponentielle fournissent les valeurs de quantile centennal les plus faibles.

Figure 7 : Robustesse des ajustements des maxima annuels pour le quantile centennal  
Méthode du Bootstrap



Concernant l'évolution séculaire du climat de surcote à Marseille, les échantillons de l'analyse sup-seuil fournissent les occurrences de dépassement de seuils indépendants. En première approche (figure 8), l'analyse de tendance à partir d'une régression linéaire des événements seuillés ne permet pas de conclure à une évolution climatique nette sur la série étudiée (+1.1% aux seuils 30 et 45 cm, +0,5 % et +0.1 % respectivement aux seuils 60 et 80 cm). Ce premier résultat, qui doit être confirmé par une analyse fine de stationnarité, est conforme aux conclusions obtenues avec la plupart des longues séries marégraphiques disponibles dans le monde, pour lesquelles il n'a jamais pu être distingué d'évolution notable des surcotes d'origine météorologiques en fréquence ou en magnitude. Enfin, l'analyse de tendance séculaire de la variable surcote doit également intégrer l'évolution de la durée des épisodes ainsi que l'évolution éventuelle des forçages météomarins qui en sont à l'origine (vent, pression).

Figure 8 : Répartition des occurrences de surcotes indépendantes supérieures au seuil 60 cm



## Conclusion

Le traitement statistique de la plus longue série de données marégraphiques en Méditerranée française a mis en évidence des anomalies de mesures et contribue aux travaux de validation en cours des données du marégraphe historique. Les incertitudes, inférieures toutefois à l'intervalle de confiance à 95 % des ajustements pour le quantile centennal, permettent de comparer les méthodes d'inférence classiques des extrêmes. Ainsi, l'analyse par maxima annuels à Marseille précise les résultats obtenus par Walton (2000) : toutes les lois usuelles testées sont applicables pour les fréquences courantes ( $T < 50$  ans) et les lois à trois paramètres (Jenkinson et Gamma) garantissent un meilleur ajustement pour l'intervalle [50 ans, 100 ans]. En queue de distribution, les lois de type GEV 2 sont recommandées (comportement hyper exponentiel de la série) et les lois à trois paramètres ne sont plus pertinentes compte tenu de l'intervalle de confiance croissant. L'analyse de robustesse, réalisée avec la méthode du Bootstrap, confirme la sensibilité des lois à trois paramètres. L'ajustement par valeurs supérieures à un seuil (POT) conduit à des résultats de meilleure qualité, mais nécessite plus de soin dans le traitement de la donnée. Si l'analyse seuillée est réalisée avec rigueur, cette méthode est recommandée notamment pour les petits échantillons. La taille importante de la série marégraphique de Marseille et l'analyse de robustesse par Bootstrap permettent d'étendre les résultats aux plages limitrophes du Golfe de Marseille et du delta du Rhône (figure 1). Ce dernier secteur, dont les dynamiques marines à moyen-long terme organisent les déplacements de la ligne du rivage en cellule de dérive littorale, connaît

d'importants problèmes d'érosion. De plus, le risque de submersion marine à court terme est particulièrement sensible dans ce secteur (Sabatier et al., 2005) où des surcotes marines inférieures à 0.7 mètres peuvent se traduire par des inondations sur plusieurs kilomètres à l'intérieur des terres (tempêtes de 1982 et 1997). Ainsi, la définition d'outils statistiques performants définis dans cette présentation permettra à l'avenir de gérer efficacement les risques littoraux et suscite des perspectives pour la caractérisation de leur évolution liée au changement climatique dont les effets pourraient se manifester à l'avenir par une augmentation du nombre, de l'intensité ou de la durée des événements extrêmes.

### **Remerciements**

Ce travail est réalisé dans le cadre du programme IMPLIT (IMPact des événements extrêmes – tempêtes et surcotes – liés au Changement Climatique sur les hydrosystèmes du Littoral méditerranéen français) financé par le GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique) du MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable). Les auteurs remercient B. Simon (SHOM) et P. Bonnetain (IGN) pour l'accès aux observations, D. Fournier, G. Glaziou et B. Vion (Ministère de l'Équipement) pour leur contribution au traitement des données.

### **Bibliographie**

- BRUZZI C., 1998. *Les tempêtes et l'évolution morphosédimentaire des plages orientales du delta du Rhône*. Thèse Sci. : Université de Provence (Aix-Marseille I), 325 p.
- GAUFRÈS P., SABATIER F., 2005. Extreme storm surges distributions at Marseilles, In *Proceedings of the Seventh International Conference on the Mediterranean Coastal Environment*, MEDCOAST 05, Water Level Changes, Vol. 2, pp 1235-1246
- GUMBEL E.J., 1958. *Statistics of Extremes*, Columbia University Press, New York.
- JENKINSON A.F., 1969. Statistics of extremes. Estimation of maximum floods – In *Tech. Note No.98. World Meteorological Organization*, Geneva, pp 183-227.
- IOC, 1997. *Global Sea Level Observing System (GLOSS) implementation plan – 1997* Intergovernmental Oceanographic Commission, Technical Series, No. 50, 91 p
- LANG M., OUARDA T., BOBÉE B., 1999. Towards operational guidelines for over-threshold modeling, In *Journal of Hydrology*, 225, pp 103-117.
- MOUSAVI S., 1997. *Composition des lois élémentaires en hydrologie régionale : application à l'étude des régimes de crue*, thèse Université Joseph Fourier, Grenoble, 164 p
- PALM R., 2002. Utilisation du bootstrap pour les problèmes statistiques liés à l'estimation des paramètres, In *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 6 (3), pp 143-153
- PIRAZZOLI P.A., 2000. Surges, atmospheric pressure and wind change and flooding probability on the Atlantic coast of France, *Oceanologica Acta*, 23, 643-661.
- PROVANSAL M., VELLA C., ARNAUD-FASSETTA G., SABATIER F. et MAILLET G., 2003. Role of fluvial sediment inputs in the mobility of the Rhône delta coast (France). In *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, pp 271-282.

- PUGH D.T., VASSIE J.-M., 1978. Extreme sea levels from tide and surge probability, In *Proceedings of the 16th Coastal Engineers Conference*, Vol. I, Hamburg American Society of Civil Engineers, New York, pp 911-930.
- SABATIER F, SUANEZ S., 2003. Évolution of the Rhône delta coast since the end of the 19<sup>th</sup> century, In *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4, pp 283-300.
- SABATIER F, PROVANSAL M., et FLEURY 2005. Discussion of: PASKOFF, R., 2004. Potential Implications of Sea-Level Rise for France. *Journal of Coastal Research*, 20 (2), pp. 424-434. In *Journal of Coastal Research*, 21, 4, pp 860-864.
- SIMON B., 1994. *Statistique des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France*, rapport d'étude SHOM n° 0001/04, DPNM, Ministère de l'Équipement, 78 p.
- WALTON T. L., 2000. Distributions for surge extremes, In *Ocean Engineering*, 27, pp 1279-1293
- WOPPELMANN G., 1997. *Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale*. Thèse sci. Obs. de Paris, 255 p.