

La tempête Xynthia du 28 février 2010 : comment météorologie, astronomie et géologie auraient pu et dû permettre d'en prévoir la gravité

04/03/2010

Auteur(s) :

Olivier Dequincey

ENS Lyon /DGESCO

Pierre Thomas

Laboratoire de Sciences de la Terre, ENS de Lyon

Publié par :

Olivier Dequincey

Résumé

Conjonction vent, dépression, vives eaux, équinoxe, hausse du niveau des océans... et anthropisation inconsciente sur des terres inondables : caractère hautement prévisible des inondations et de la gravité des dégâts liés à la tempête des 27-28 février 2010.

Table des matières

- [La tempête : vent et dépression](#)
- [Les marées : vives eaux et équinoxes.](#)
- [Les digues et la montée du niveau des océans](#)
- [Le message des photographies aériennes et des cartes topographiques et géologiques](#)
- [Conclusion](#)

La tempête , nommée Xynthia, du 28 février 2010 a provoqué d'importants dégâts liés à la force du vent, mais aussi des inondations importantes liées à des dépassements de digues. Voyons la conjonction d'événements prévisibles qui ont engendré ces inondations et surtout la gravité de leurs conséquences humaines.

La tempête : vent et dépression

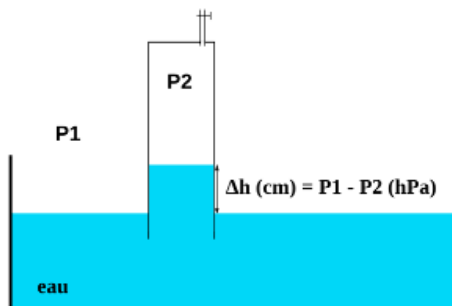
La tempête de samedi/dimanche 27/28 février était annoncée. Les départements côtiers étaient en vigilance rouge pour Météo-France. Elle a été comparée à la tempête du 26 décembre 1999 : vents du même ordre de grandeur, mais un peu plus faibles, on n'attendait "que" des vitesses de 160 km/h et non pas 180-200.

Remarquons que les vents d'Ouest "poussent" la mer vers les terres sur les côtes Sud-atlantiques françaises et occasionnent un niveau de l'océan supérieur à ce qu'il serait avec des vents d'Est qui "chasseraient" l'océan au large (voir les phénomènes d'upwelling et les conséquences des phénomènes El Niño).

Autre phénomène favorable à des inondations, une tempête est associée à une dépression atmosphérique. Rappelons qu'une atmosphère "normale" ou "moyenne" est à une pression de 1013 hPa au niveau de la mer et que cette pression correspond à une hauteur d'environ 10,33 m d'eau (hauteur maximale à laquelle on peut remonter de

l'eau avec une simple pompe à vide), ou 760 mm de mercure. Ainsi, si 1013 hPa correspondent à environ 10,33 m d'eau, 1hPa correspond à environ 1 cm d'eau. On retrouve cette équivalence en reprenant la définition du Pascal. En effet, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$, 1 N correspond environ au poids de $0,1 \text{ dm}^3$ d'eau (ou 0,1L) soit 10^{-4} m^3 d'eau. Ainsi, 1 Pa correspond à $10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^2$ d'eau, soit à la pression exercée par 0,1 mm d'eau. D'où la correspondance précédente de 1 cm d'eau pour 1 hPa.

Ainsi, lors d'une dépression de 970 hPa (dimanche à 1h du matin sur les Pays de la Loire), il y a un déficit d'environ 40 hPa par rapport à une atmosphère moyenne. Cela correspond à la création d'un "pompage" de 40 hPa, c'est-à-dire à une montée du niveau de l'eau de l'ordre de 40 cm.



Source - © 2010 Olivier Dequincey

Figure 1. Relation pression - hauteur d'eau.

On place une colonne dans l'eau, on laisse le robinet du fond ouvert. Alors la pression est la même dans la colonne et à l'extérieur.

On aspire (ou on pompe) une partie de l'air contenu dans la colonne. La pression P2 devient inférieure à la pression P1 et de l'eau monte dans la colonne au-dessus du niveau de l'eau dans le récipient. Une relation simple relie hauteur d'eau et différence de pression : $\Delta h \text{ (cm)} = P1 - P2 \text{ (hPa)}$.

Si on souffle (injecte) de l'air dans la colonne d'eau, on peut abaisser le niveau d'eau dans la colonne sous le niveau d'eau du récipient. La relation reste la même entre variation du niveau d'eau et différence de pression.

Une dépression sur l'océan correspond à la colonne sur le récipient d'eau de la figure ci-dessus.

La dépression annoncée amenait donc à une élévation "connue" du niveau de l'eau d'environ 40 cm (par rapport à un niveau sous pression atmosphérique moyenne) par simple effet de pression. Cette élévation a été largement augmentée par les forts vents d'Ouest, eux aussi annoncés.

Les marées : vives eaux et équinoxes.

Au rythme semi-diurne des marées ("2 marées hautes et 2 marées basses par jour" environ) s'ajoutent d'autres rythmes dont un rythme "mensuel" lié aux phases de la Lune et un rythme annuel lié à la déclinaison du Soleil (position du Soleil à midi à l'équateur).

Les deux "astres" ayant des effets de marée significatifs sur Terre sont la Lune et le Soleil. La Lune est moins massive que le Soleil mais beaucoup plus proche de nous. En conséquence, les effets de marée liés à la Lune sont environ trois fois supérieurs à ceux engendrés par le Soleil. Les plus fortes marées (hautes ou basses) ont lieu lorsque les effets lunaire et solaire se cumulent, ce qui a lieu lors des alignements Terre-Lune-Soleil (nouvelle Lune) et Lune-Terre-Soleil (pleine Lune)... à quelques heures près, du fait d'un effet de retard lié à l'obstacle des continents, effet plus ou moins important selon le lieu considéré.

De même, les effets de marée solaires sont plus importants lorsque la force d'attraction solaire est perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre, ce qui a lieu lors des équinoxes (~21 septembre et ~21 mars).

Ces effets sont bien connus et bien calculés. D'autres paramètres locaux entrent en jeu pour expliquer les amplitudes des marées en un point donné. L'amplitude des marées est exprimé sous forme d'un coefficient de marée (variant de 20 à 120, une marée moyenne étant affectée d'un coefficient de 70, une marée de vive eau de 95 à 120 selon qu'elle est moyenne ou exceptionnelle). Ces coefficients sont calculés et largement diffusés longtemps à l'avance. Ils sont par exemple disponibles sur le site du [Service Hydrographique et Océanographique de la Marine \(SHOM\)](#), en utilisant l'outil [prédiction des marées](#).

Calcul de la marée

Annuaire des marées (Coefficients)

FEBVRIER 2010						
Date	Coeff.	Plenne mer	Basse mer	Coeff.	Plenne mer	Basse mer
dim 28	102	1154	953	89	1005	1005
dim 29	87	1022	920	76	1005	1005
dim 29	86	1022	920	84	1005	1005
dim 28	102	1154	953	106	1005	1005

MARS 2010						
Date	Coeff.	Plenne mer	Basse mer	Coeff.	Plenne mer	Basse mer
dim 1	118	1244	1104	114	1005	1005
dim 2	114	1204	1064	106	1005	1005
dim 3	102	1022	920	89	1005	1005

Source - © 2010 SHOM

Figure 2. **Coefficients de marée à La Rochelle-Pallice, du 25/02 au 04/03 2010.**

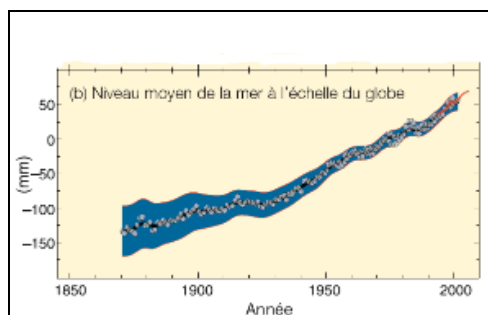
Dimanche 28 au matin, jour de pleine Lune, la marée haute avait un coefficient de 102, soit une "grosse" marée à 3 semaines de l'équinoxe.

Les marées les plus fortes sont celles du mardi 2 mars. Des coefficients de 102 (puis inférieurs) n'apparaissent qu'à partir de jeudi 4 mars. Difficile d'évacuer l'eau tant que les marées hautes sont bien supérieures à celle ayant permis le passage des digues, même si ce n'est pas le seul critère.

Il était clairement prévu une marée haute de vive eau au-delà de la "moyenne" le dimanche 28 février vers 4h00 du matin.

Les digues et la montée du niveau des océans

Les digues submergées n'étaient pas récentes, certaines dataient de la fin du XIX^{ème} siècle. Si l'on regarde les enregistrements disponibles depuis 1870 (marégraphes et altimétrie satellitaire pour les dernières décennies) on constate que le niveau moyen des océans a monté d'environ 20 cm de 1870 à 2005. Ainsi, toute marge de sécurité prévue à l'époque de la construction des digues a été amputée de 20 cm pour les plus anciennes.

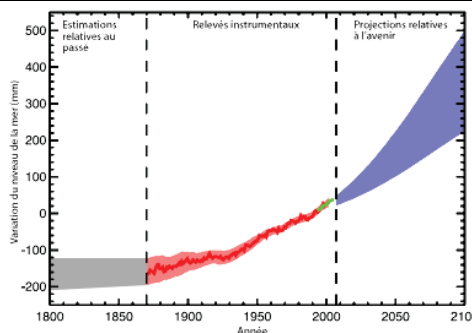


Source - © 2007 [GIEC, Rapport de synthèse](#), fig. RID1, modifié

Figure 3. **Mesures historiques du niveau moyen des océans.**

De 1870 à 2005, le niveau moyen des océans a augmenté de 20 cm.

En bleu, données des marégraphes ; en rouge, mesures par satellite.



Source - © 2007 [GIEC, Rapport de synthèse 2007](#), FAQ5.1, fig. 1, modifié

Figure 4. **Mesures historiques et projection du niveau moyen des océans.**

De 1870 à 2005, le niveau moyen des océans a augmenté de 20 cm. Une augmentation supplémentaire minimale de 20 cm est projetée pour le siècle à venir.

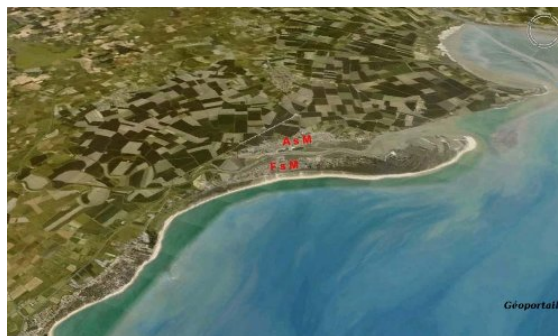
En gris, estimations anté-1870 ; en rouge, données des marégraphes ; en vert, mesures par satellite ; en bleu projection selon différents scénarios d'évolution du climat pour le XXI^{ème} siècle.

Remarquons que les digues endommagées devront non seulement être reconstruites, mais aussi, être surélevées afin de prendre en compte l'élévation du niveau moyen de l'océan depuis leur construction et l'augmentation future de ce niveau. Les estimations futures vont de 20 à 50 cm d'élévation au cours de ce siècle, selon les scénarios et modèles climatiques utilisés.

Le message des photographies aériennes et des cartes topographiques et géologiques

Les deux communes où il y a eu le plus de décès sont celles de la Faute sur Mer et de l'Aiguillon sur Mer. La photographie aérienne suivante montre le contexte géomorphologique de ces deux communes, bâties sur polders et

sur cordons littoraux ou dunaires.



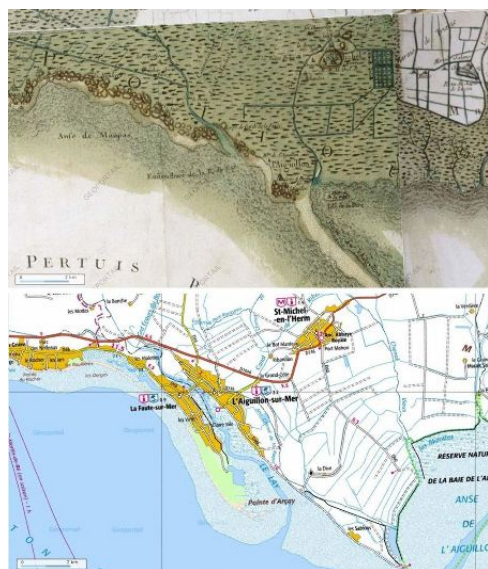
Source - © 2007 IGN /Géoportail

Figure 5. Photographie aérienne du secteur de l'Aiguillon sur Mer (AsM) et de la Faute sur Mer (FsM).

On distingue très bien deux flèches littorales ou **cordons dunaires** qui s'avancent vers le Sud. Les 2 villages où il y a eu le plus de victimes (AsM et FsM) sont bâtis sur ces cordons.

Dans les terrains agricoles, on distingue nettement une vaste zone où les parcelles sont plus grandes et d'un vert plus sombre que dans les autres secteurs. Ces zones correspondent à des polders conquis sur la mer et dont l'altitude est inférieure à celle des marées hautes "normales". La carte géologique du BRGM indique que les dernières polderisations se sont échelonnées de 1725 à 1965.

Comparons les cartes IGN actuelles aux cartes de Cassini du XVIII^{ème} siècle grâce au Géoportail sur lequel ces deux cartes sont disponibles.



Source - © 2007 IGN /Géoportail, modifié

Figure 6. Comparaison entre la carte de Cassini et la carte IGN actuelle du secteur de l'Aiguillon sur Mer.

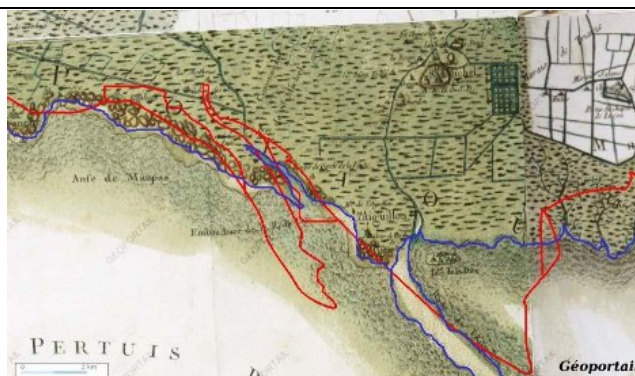
La différence de la ligne côtière entre ces 2 cartes séparées d'environ 250 ans saute aux yeux. Par exemple, la Faute sur Mer et son cordon littoral n'existent pas sur la carte de Cassini.



Source - © 2007 IGN /Géoportail, modifié

Figure 7. Comparaison détaillée entre la carte de Cassini et les photographies aériennes IGN actuelles du secteur Sud de l'Aiguillon sur Mer et la Faute sur Mer.

Sur la photo aérienne, les secteurs densément lotis et peuplés ont été entourés de jaune (l'Aiguillon sur Mer) et de rouge (la Faute sur Mer). La position de ces tracés a été reportée exactement sur la carte de Cassini. Au moins deux secteurs actuellement peuplés étaient situés sous la mer au XVIII^{ème} siècle. Les occupants de ces secteurs étaient-ils au courant ?



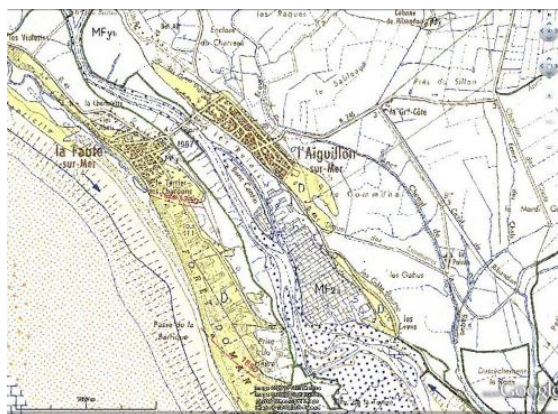
Source - © 2007 IGN /Géoportail, modifié

Figure 8. Report sur la carte de Cassini du tracé de côte actuel (rouge) par rapport à la côte du XVIII^{ème} siècle (renforcée en bleu).

La variabilité des côtes en deux siècles saute aux yeux et montre l'instabilité du trait de côte.

Les traits "doubles" indiquent des zones immergées à marée haute mais situées "à l'intérieur" des terres.

La carte géologique disponible sur Google earth et sa notice sont aussi riches d'enseignements.



Source - © 2010 BRGM / Google earth

Figure 9. Extrait de la carte géologique au 1/50.000 du BRGM de l'Aiguillon sur Mer.

La publication de la carte date de 1975. Le fond topographique sur lequel ont été reportés les tracés géologiques date de 1959. Cette carte est riche d'au moins trois enseignements.

(1) Ce secteur comprend 3 types de terrains : (a) des dunes (D, en jaune) ; (b) des argiles Mfyb qui dominent largement, et localement appelées « bri récent ». Ce sont des terrains constitués d'argiles, quasiment dépourvues de sable grossier et de graviers, correspondant à des zones conquises sur la mer depuis le III^{ème} siècle avant notre ère ; (c) des argiles des slikkes et des schorres (Mfza et MFzb).

(2) La modification du trait de côte peut se voir, par exemple au Sud de la Faute sur Mer, où les traits de côte de 1760 et 1850 sont indiqués par des traits rouge.

(3) Les deux villages de l'Aiguillon sur Mer et la Faute sur Mer tels qu'ils étaient en 1959, avant l'explosion de la pression immobilière en bord de mer, étaient bâtis sur des dunes. Ils étaient donc légèrement surélevés par rapport aux polders environnants, moins inondables, et avec des inondations moins graves en cas de fortes tempêtes.

Voici quelques extraits intéressants de la notice (p. 8 et 9) de cette carte géologique à propos de la formation du « bri récent ».

« **MFyb. Alluvions argileuses à Scrobiculaires, brunes (bri récent).** [...] Le bri récent semble s'être mis en place depuis le III^{ème} siècle avant Jésus-Christ [...] La chronologie des dernières étapes de la mise en place du bri récent est facile à établir puisque l'Homme a établi des séquences de polders, appelés localement prises [...] Les endiguements se sont succédés à un rythme relativement rapide de la période des Physiocrates à nos jours. »



Source - © 2010 BRGM / Google, modifié

Figure 10. Limites des dunes (d'après la carte géologique BRGM) reportées sur fond Google earth.

On voit très bien que des zones couvertes d'habitations permanentes ont été établies en dehors des dunes (flèches rouges). *A priori*, si la hauteur maximum de submersion ne doit pas être trop grande sur les zones de dunes, elle doit être beaucoup plus importante dans les zones extra-dunaires. Il serait riche d'enseignement de savoir si c'est dans ces zones loties en dehors des dunes que l'on a à déplorer le plus de victimes.

En plus de la construction récente d'habitations en dehors des dunes, des préoccupations sont clairement énoncées dans la partie hydrologie de la notice de la carte géologique du BRGM de 1975 (p. 11). Phrases riches en enseignement, pour ne pas dire prémonitoires.

« La défense contre la mer est préoccupante, surtout dans la région de l'Aiguillon, et a nécessité la construction d'une digue en maçonnerie en direction de la pointe de l'Aiguillon. Celle-ci est actuellement en mauvais état et chaque année les tempêtes ouvrent de dangereuses brèches. [...] L'étroitesse du cordon littoral [...] rend la situation précaire à tout assaut de la mer. [...] (L')envasement de l'estuaire [...] empêche le bon écoulement des eaux en hiver. »

Conclusion

Les conséquences des tempêtes sur le niveau de la mer sont connues, les marées sont prévues, l'augmentation du niveau des océans est connue, l'existence de digues mal entretenues est connue, la construction d'habitations en zone initialement réservée à des fins agricoles car inondables est connue. Les conséquences dramatiques de la tempête du 28 février 2010 étaient donc très largement envisageables. D'ailleurs, les populations ont été alertées dans de très nombreux endroits, même si les risques majeurs les plus souvent signalés étaient ceux liés aux forts vents. C'est la conjonction spatiale et temporelle de tous les éléments connus séparément qui était peut-être la plus difficile à prévoir à long terme : à quelques heures près, les inondations n'auraient pas eu lieu (à marée basse par exemple). Par contre, dès le samedi 27 février au soir, Météo-France avait prévu l'heure d'arrivée du maximum de la dépression en fin de nuit, pendant la grande marée !