



Les mouvements

Les recouvrements et découverts latéraux

Submersibilité latérale dans l'estuaire

Submersibilité latérale dans l'estuaire

Résumé

Entre Nantes et Saint-Nazaire, la Loire déborde sur la plaine alluviale dès que son niveau dépasse l'altitude de 2,70 m IGN69, définie comme la ligne de rive. Le niveau d'eau en Loire dépend de la marée, du débit du fleuve et de facteurs atmosphériques. La ligne de rive est systématiquement franchie lorsque le coefficient de marée est supérieur à 94 ; cependant, des surcotes d'origines atmosphériques ou hydrologiques favorisent des débordements lors de coefficients de marée plus faibles. Entre 1996 et 2011, 4 pleines mers sur 10 en moyenne débordent. La hauteur de débordement varie de quelques centimètres jusqu'à 1,51 mètre lors du passage de la tempête Xynthia, le 28 février 2010. 90 % des débordements n'excèdent pas 0,75 mètre.



Situé en arrière de la ligne de rive contemporaine, le bourrelet de rive de 1850 structure les modalités de submersion en protégeant les espaces régulés des submersions fréquentes, mais non des submersions exceptionnelles. Paradoxalement, lorsqu'une submersion exceptionnelle se produit, ce bourrelet constitue un obstacle à la vidange "rapide" des eaux piégées dans une cuvette topographique en pied de coteau. A contrario, sur les espaces ouverts, contigus aux berges actuelles, le ressuyage s'observe après chaque débordement.

Objectif définition

Entre Nantes et Saint-Nazaire, la plaine alluviale représente une superficie de 18 840 hectares. Elle est bordée par le Sillon de Bretagne au nord et la voussure du Pays de Retz au sud. Bien que peu marqué, son relief forme une contrepenne depuis les berges jusqu'au fond de vallée avec un dénivelé atteignant par endroits 2,50 mètres.

Plus de la moitié de la plaine alluviale se situe à une altitude inférieure à celle de 2,70 mètres IGN69 définie comme la ligne de rive et sa totalité à une altitude inférieure à 4,21 m IGN69, correspondant à la cote maximale atteinte à Cordemais entre 1996 et 2011, lors du passage de la tempête Xynthia, le 28 février 2010.

Les modalités de submersion et d'évacuation du trop-plein d'eau diffèrent selon qu'elles s'exercent sur les points hauts et proches du lit mineur ou sur les points bas, plus éloignés.

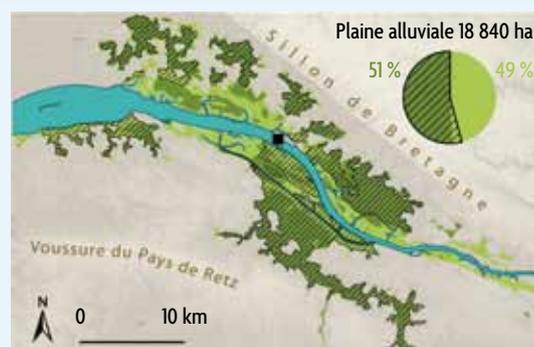
8 710 hectares sont des espaces directement connectés à la Loire sur lesquels les eaux de la Loire débordent librement lorsque leur niveau franchit la ligne de rive. Ils sont qualifiés d'ouverts et correspondent principalement aux anciennes îles et anciens bras de Loire, ainsi qu'au bourrelet de rive cartographié en 1850. L'altitude de ces espaces est majoritairement supérieure à celle de la ligne de rive, ce qui leur confère une capacité de ressuyage rapide après chaque débordement.

10 130 hectares sont les secteurs de marais traversés par un réseau hiérarchisé de canaux, douves, rigoles, dans lesquels le niveau d'eau est régulé par plus de 250 ouvrages hydrauliques. Situés en arrière des espaces "ouverts", leur altitude est majoritairement inférieure à celle de la

ligne de rive. Les entrées et sorties d'eau y sont contrôlées par des manœuvres sur les ouvrages. En rive sud, le canal maritime et sa digue protègent les marais situés en arrière contre les submersions.

CARTE L1 D1 - 1

Topographie simplifiée de la plaine alluviale



- Altitude supérieure à 2,70 m IGN69
- Altitude inférieure à 2,70 m IGN69
- Marais régulé hydrauliquement
- Ligne de rive à 2,70 m IGN69
- Marégraphe de Cordemais

Sources : Litto3D®IGN /BD TOPO®IGN/GIP Loire Estuaire

Le niveau de débordement peut être apprécié en théorie, par les pleines mers prédites et en réalité, par les pleines mers observées.

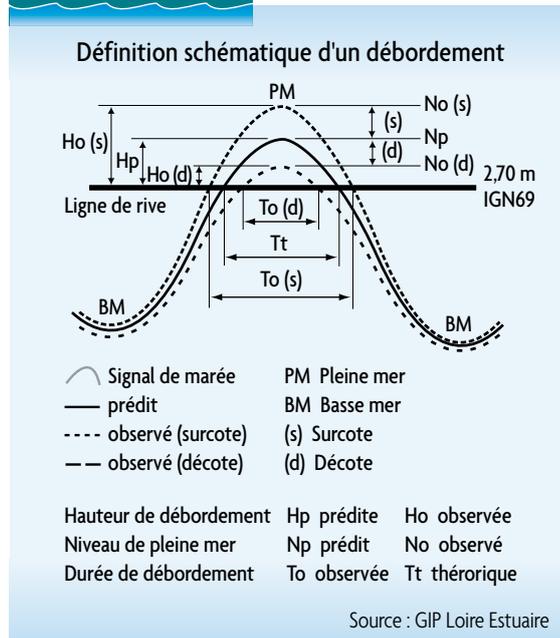
Les pleines mers astronomiques prédites (ou "théoriques") sont les pleines mers dont la cote est indiquée dans les annuaires des marées du Grand Port Maritime de Nantes - Saint-Nazaire.

Elles sont calculées pour un débit fluvial de 200 m³/s, la veille à Montjean-sur-Loire, par vent nul et pression atmosphérique moyenne (1013 hectopascals).

Les pleines mers observées (ou "effectives") sont les pleines mers mesurées de manière instantanée aux marégraphes situés en différents points de l'estuaire. Par conséquent, elles intègrent l'action :

- de facteurs atmosphériques au large, agissant sur l'amplitude de la houle ;
- de facteurs atmosphériques locaux : pression, vent agissant également sur les vagues ;
- du débit de la Loire.

FIGURE L1 D1 - 1



La variation de ces facteurs provoque des **surcotes** lorsque le niveau de pleine mer observé est supérieur au niveau de pleine mer

prédict, ou à l'inverse, des **décotes** lorsque le niveau observé est inférieur au niveau prédict.

Les débordements s'expriment en niveau (cote de la pleine mer en mètre IGN69), ou en hauteur (différence entre la cote de la pleine mer et la ligne de rive à 2,70 m). La durée du débordement est la période d'une pleine mer durant laquelle le signal de marée est supérieur à la cote 2,70 m. Le cycle de débordement est la répétition successive de pleines mers débordantes.

L'indicateur s'appuie sur le niveau des pleines mers observé au marégraphe de Cordemais et ne mentionne les pleines mers prédites que pour évaluer le poids des surcotes, et donc le poids des facteurs atmosphériques et du débit du fleuve, lors des débordements.

L'eau qui déborde est plus ou moins saumâtre et plus ou moins turbide. Les submersions de la plaine alluviale par la Loire contribuent ainsi à la diversité des habitats. Les dépôts de vase en faible quantité améliorent la qualité fourragère des prairies, par contre, en trop grande quantité, ils peuvent la déprécier.

La première version de l'indicateur éditée en 2005 présente le phénomène des submersions à travers une analyse conduite sur trois années hydrologiques d'octobre 2000 à septembre 2003. La submersibilité de la plaine alluviale y est appréhendée par la projection, à dire d'expert, de niveaux d'eau sur la microtopographie.

L'objectif de la présente fiche est de développer l'analyse statistique sur la période d'octobre 1996 à septembre 2011. La diversité des situations, leur traduction dans l'espace et leur dynamique sont quant à elles mesurées à partir de l'exploitation de trois images satellites et d'une campagne de photographies aériennes, acquises après des situations de débordements contrastés.

Interprétation

Quatre pleines mers sur dix débordent

Entre octobre 1996 et septembre 2011, 4 173 débordements au-delà de la ligne de rive sont observés, soit en moyenne 278 pleines mers sur 705 par année hydrologique (quatre pleines mers sur dix).

83 % des débordements se produisent en situation de surcote et en moyenne sur la période 1996-2011, le nombre de débordements observés est de 17 % supérieur au nombre de débordements prédits.

Le coefficient de marée à partir duquel l'eau déborde sur la plaine alluviale est théoriquement de 72. Toutes les pleines mers observées débordent à partir du coefficient 94. Les surcotes rendent possibles des débordements lors de coefficients inférieurs, y compris en période de mortes eaux. Ainsi, le plus faible coefficient au cours duquel la pleine mer a débordé est de 41, le 14 novembre 2002.

TABLEAU L1 D1 - 1

Nombre annuel de pleines mers débordantes entre 1996 et 2011

| | PM* débordantes observées | PM* débordantes prédites |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Minimum (année 2004-05) | 224 | 215 |
| Maximum (année 1997-98) | 330 | 278 |
| Moyenne (1996-2011) | 278 | 237 |

PM* : pleine mer

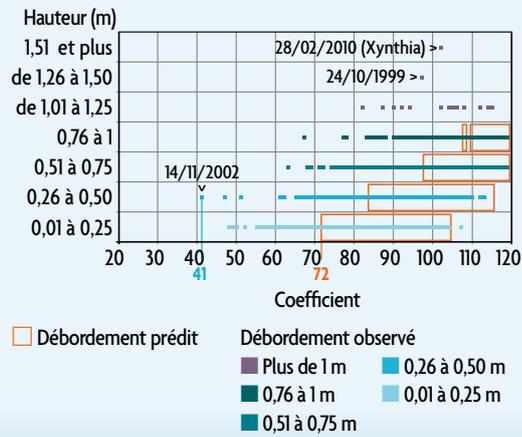
Sources : GPMNSN/GIP Loire Estuaire

Bien que la hauteur des débordements prédits ne dépasse jamais le mètre, 18 débordements sont mesurés au-delà du mètre sur la période 1996-2011 et jusqu'à 1,51 m lors de la tempête Xynthia le 28 février 2010.

Sur la période 1996-2011, 90 % des débordements observés ne dépassent pas 0,75 m. L'année 2000-01 est une année humide, marquée par une hydraulicité record ; le régime de crue, soutenu de novembre 2000 à mai 2001 amplifie le nombre de débordements, notamment ceux compris entre 0,51 et 0,75 m, pour atteindre exceptionnellement une pleine mer sur deux en moyenne sur l'année, et jusqu'à pratiquement 7 pleines mers sur 10 en novembre.

GRAPHIQUE L1 D1 - 1

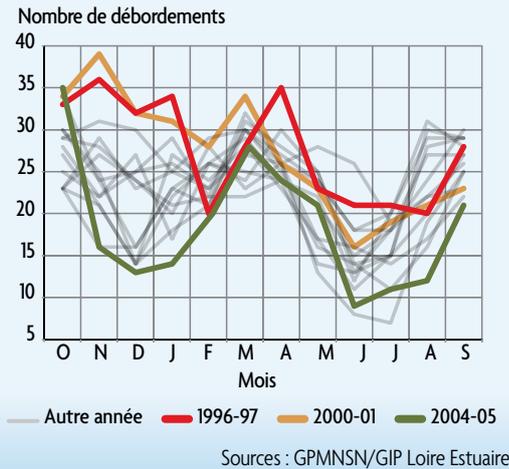
Distribution des hauteurs de débordement suivant le coefficient de marée entre 1996 et 2011



Les débordements les plus fréquents et les plus hauts se produisent lors des vives eaux d'équinoxe, aux mois de mars et d'octobre, au cours desquels les surcotes sont particulièrement fréquentes. De 1996 à 2011, 3/4 des débordements de plus d'un mètre se sont produits au cours de ces deux mois. A l'inverse, au solstice de juin, l'attraction du soleil sur la terre et son effet sur la marée est minimale : les débordements sont alors moins fréquents (une pleine mer sur quatre en moyenne) et n'excèdent jamais 0,75 m.

GRAPHIQUE L1 D1 - 2

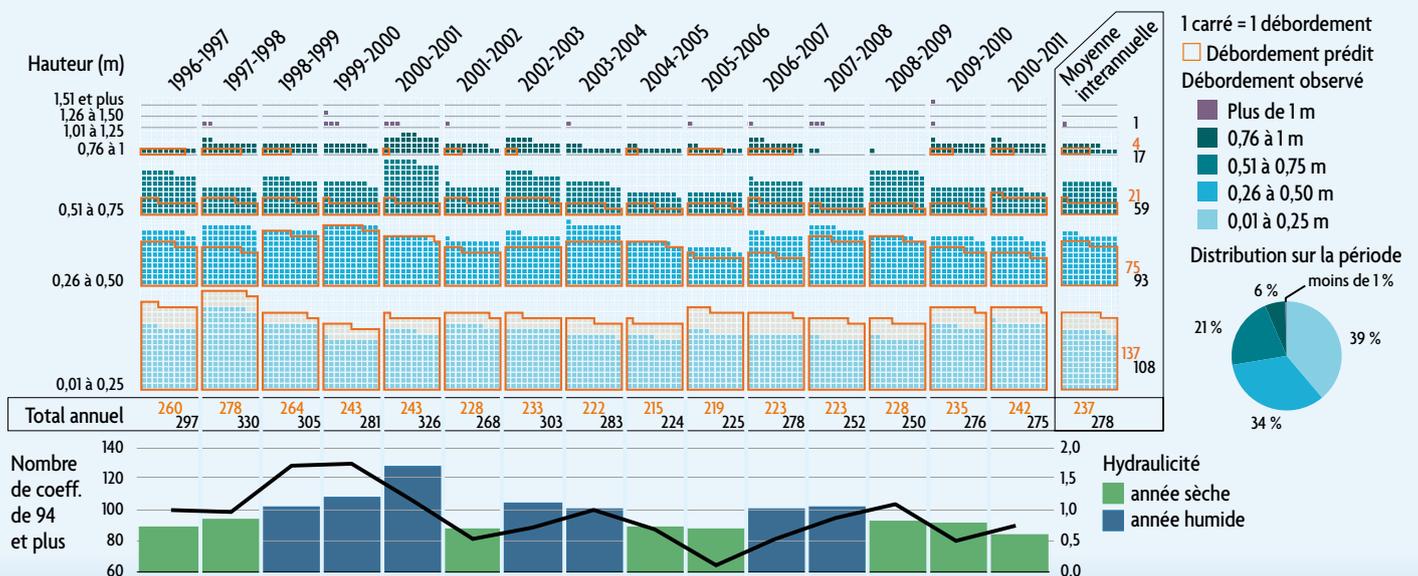
Distribution mensuelle du nombre de débordements observés entre 1996 et 2011



Entre 1996 et 2011, le nombre de débordements par classe de hauteur décroît plus la hauteur augmente, sauf en 1999-2000, 2003-04 et 2007-08. En effet, tous les quatre ans la lune est à son apogée et les coefficients de vives eaux n'excèdent pas 114. Les débordements supérieurs à 0,50 m sont alors moins nombreux laissant place à des débordements plus faibles (0,26 à 0,50 m).

GRAPHIQUE L1 D1 - 3

Distribution des débordements observés et prédits entre 1996 et 2011



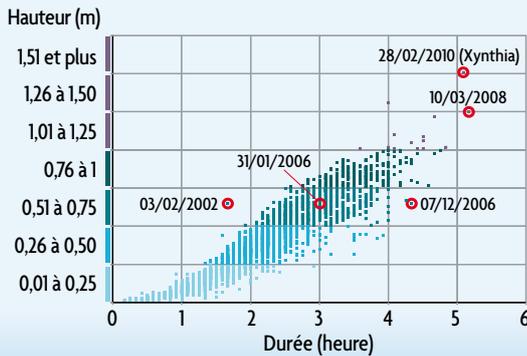
La prégance du vent sur la durée des débordements

La durée pendant laquelle l'eau déborde dépend du niveau de la pleine mer, mais aussi des paramètres susceptibles de modifier la forme de l'onde de marée, c'est-à-dire les facteurs qui créent et entretiennent la surcote ou la décote. Les surcotes résultent d'une combinaison de facteurs dont le poids respectif est difficile à mesurer. Pour autant, la pression atmosphérique et le débit du fleuve ont une plus grande inertie que la houle au large ou le vent.

Entre 1996 et 2011, un débordement dure en moyenne 2 heures. Lorsque les coefficients de vives eaux exceptionnelles se conjuguent à des conditions météorologiques et hydrologiques de surcote, la durée de débordement peut dépasser 5 heures (10 mars 2008 et 28 février 2010, tempête Xynthia), dont plusieurs heures (3h25 le 10 mars 2008) au-delà de 3,70 m, soit 1 m au-dessus de la ligne de rive.

GRAPHIQUE L1 D1 - 4

Distribution des hauteurs de débordement suivant leur durée entre 1996 et 2011



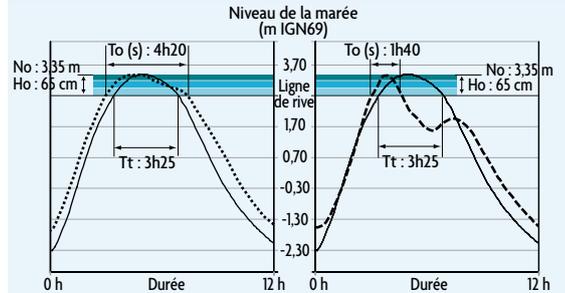
Sources : GPMNSN/GIP Loire Estuaire

Le 7 décembre 2006, les rafales de vent persistantes à plus de 65 km/h et la forte houle en

provenance du large pendant toute la durée de la pleine mer soutiennent l'effet de surcote et font durer le débordement pendant 4h20 contre 3h25 sans surcote le 31 janvier 2006.

GRAPHIQUE L1 D1 - 5

Effet du vent sur la durée de débordement



- Signal de marée
- sans surcote ni décote (31 janvier 2006, coeff. 106)
- avec surcote de 0,46 m (7 décembre 2006, coeff. 85)
- - - avec surcote de 0,96 m (3 février 2002, coeff. 76)

Sources : GPMNSN/SHOM/GIP Loire Estuaire

A hauteur égale (0,65 m), pression atmosphérique équivalente (1 008 hPa) et débit de Loire comparable, (883 et 955 m³/s), le débordement du 7 décembre 2006 dure 3 fois plus longtemps que celui du 3 février 2002. Théoriquement non débordante, la pleine mer du 3 février, de coefficient 76, subit une forte surcote de près d'un mètre consécutive à des rafales atteignant 100 km/h et à un vent moyen soutenu orienté sud-ouest. Mais deux heures après le pic de pleine mer, le vent est quasiment nul, et l'effet de la surcote s'annule brutalement. **A niveau équivalent, le volume d'eau qui déborde et l'expansion de la submersion sur la plaine alluviale varient.**

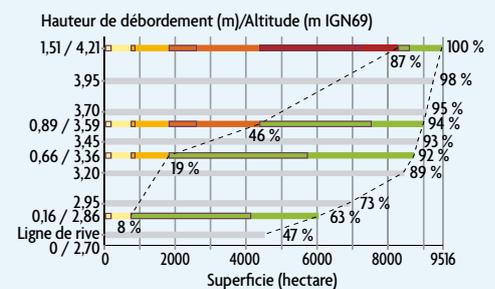
Le rôle du bourrelet de rive de 1850

Quatre situations de débordement contrastées ont été cartographiées et peuvent être comparées sur une emprise commune de 9 516 hectares. Dans la plaine alluviale, jusqu'à un certain niveau des eaux, le bourrelet de rive de 1850 forme un obstacle aux submersions des marais régulés, expliquant l'écart important entre la proportion des surfaces submersibles et la proportion des surfaces submergées (en eau et/ou ressuyées) lors des débordements inférieurs au mètre.

Les espaces situés entre la ligne de rive actuelle et la ligne de rive de 1850, en connexion directe avec la Loire, sont submergés partiellement pour un débordement de 0,16 m (situation du 16 septembre 1996), soit en moyenne 215 pleines mers par an sur 705. Ils sont submergés en totalité lors d'un débordement de 0,66 m (situation du 16 avril 2003), soit en moyenne 35 pleines mers par an.

GRAPHIQUE L1 D1 - 6

Proportion des surfaces submersibles et submergées au cours de 4 débordements



- Zone en eau et/ou ressuyée
- 16 septembre 1996
- 16 avril 2003
- 18 avril 2003
- 3 mars 2010 (Xynthia j+3)
- Zone submersible
- Zone submersible hors d'eau
- Marais régulé hydrauliquement

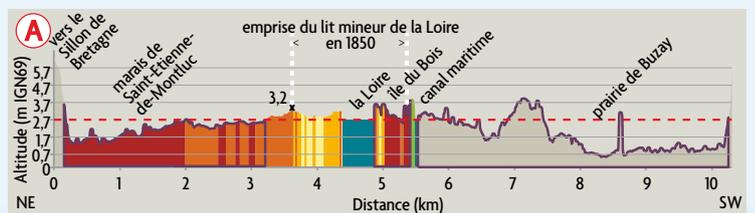
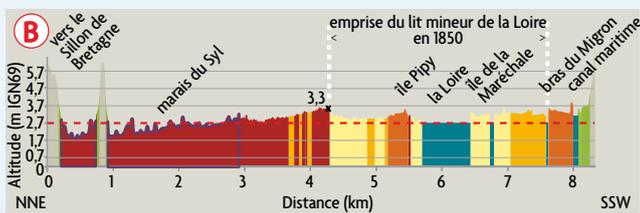
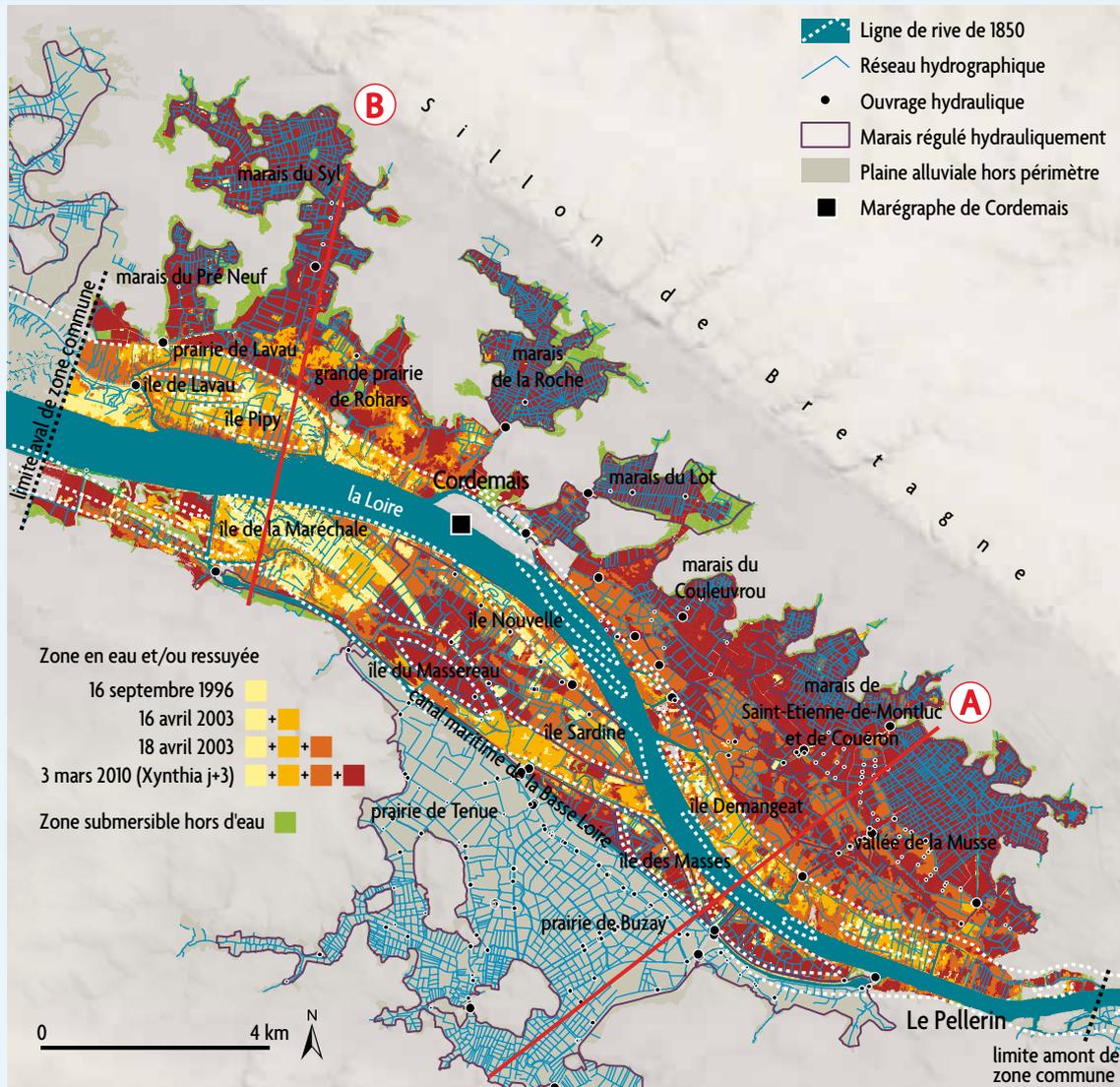
Sources : Litto3D®IGN/BD TOPO®IGN/Images SPOT2, Landsat 7, IRS/GIP Loire Estuaire

En amont de Cordemais, le relief du bourrelet de rive est moins marqué qu'en aval ; il est aussi plus proche du lit mineur actuel. Pour un débordement de 0,89 m (situation du 18 avril 2003),

soit en moyenne plus de 5 pleines mers par an, les marais de Saint-Etienne-de-Montluc sont davantage submergés que la prairie de Lavau.

CARTE L1 D1 - 2

Cartographie des zones en eau au cours de 4 débordements



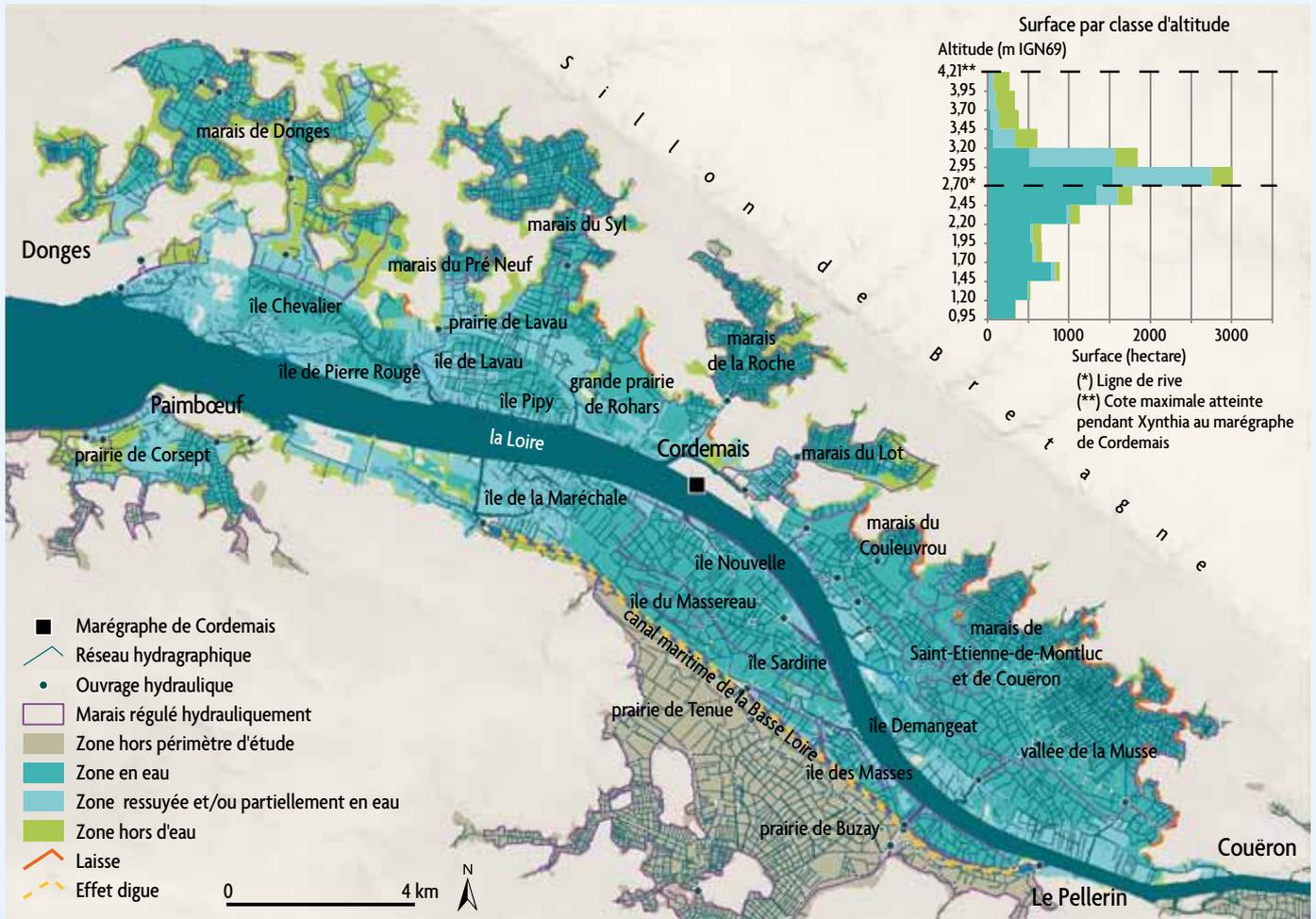
Sources : Litto3D®IGN /BD TOPO®IGN/GIP Loire Estuaire

Le 3 mars 2010, soit trois jours après le passage de la tempête Xynthia, la plaine alluviale cumule les effets de 12 débordements successifs dont 8 à plus de 0,75 m. Parmi eux, le plus important, celui du 28 février au matin, atteint un niveau de débordement de 4,21 m IGN69, et reste plus de deux heures à plus d'un mètre au-dessus de la ligne de rive.

Sur 11 610 hectares de plaine alluviale cartographiés, 6 710 hectares apparaissent en eau (soit 60 %), et 3 190 hectares ressuyés (soit 27 %).

Tous les secteurs en eau le 3 mars 2010 ne sont pas systématiquement imputables au seul passage de la tempête Xynthia ; pour certains d'entre eux, les marais étaient déjà en eau avant le 28 février 2010.

Cartographie des zones en eau le 3 mars 2010, soit 3 jours après le passage de la tempête Xynthia



Sources : Litto3D®IGN /BD TOPO®IGN/GIP Loire Estuaire

En rive sud, la submersion ne franchit pas le canal maritime dont les digues empêchent la submersion, plus au sud, des prairies de Tenue et de Buzay. En revanche, en rive nord, l'amplitude exceptionnelle du débordement ne permet plus au bourrelet de rive de 1850 d'exercer son rôle d'obstacle. Les marais de Saint-Etienne-de-Montluc et du Syl sont submergés dans leur totalité, jusqu'au pied de coteau.

A partir de l'analyse des photographies aériennes, 19 km de laisses, composées de déchets et débris végétaux, sont cartographiées, principalement orientées sud-ouest et ouest et dans une moindre mesure nord-ouest, c'est-à-dire dans le sens des courants de marée et des vents dominants. Leur altitude s'échelonne de 3,20 à 4,20 m IGN69, mais pratiquement 50 % du linéaire des laisses se situent à une altitude comprise entre 3,70 et 3,95 m, c'est-à-dire plus d'1 mètre au-dessus de la ligne de rive. Pour une telle cote, dans les zones les plus basses des prairies de Saint-Etienne-de-Montluc notamment, **la lame d'eau sur les prairies a pu atteindre 3 mètres au plus fort de la submersion**. 83 % des surfaces situées

en-dessous de la ligne de rive demeurent encore en eau 3 jours après l'événement. En effet, le bourrelet de rive de 1850 constitue un obstacle à l'évacuation rapide des eaux, alors piégées dans une cuvette topographique entre ce même bourrelet et le pied de coteau. Seule l'ouverture généralisée des ouvrages hydrauliques permet l'évacuation du trop plein d'eau par le réseau de canaux. Cette dernière est d'autant plus longue que le volume d'eau piégé est important et que les pleines mers suivantes limitent le temps d'écoulement.

Contrairement aux espaces régulés, les espaces "ouverts" se distinguent par un ressuyage rapide vers les canaux, les étiers et le lit de la Loire dès que le niveau en Loire est inférieur à 2,70 m IGN69. Les 3/4 des surfaces dont l'altitude est supérieure à celle de ligne de rive sont logiquement ressuyés le 3 mars 2010.

La submersion de la plaine alluviale n'apparaît donc pas seulement conditionnée par la hauteur et la durée du débordement. Elle l'est également par la répétitivité des débordements qui s'associe souvent à des sols gorgés d'eau, voire des surfaces déjà en eau favorisant alors

l'expansion de la submersion et limitant la capacité de la plaine à se ressuyer lors de chaque nouveau débordement. Entre 1996 et 2011, 289 des 4 173 débordements se produisent de manière isolée, tandis que les 3 884 autres s'inscrivent dans des cycles de débordements

successifs. Près de 7 cycles sur 10 sont des cycles longs, c'est-à-dire qu'ils se caractérisent par plus de 10 débordements successifs, jusqu'à atteindre un maximum de 20 pleines mers débordantes du 21 novembre après-midi au 1^{er} décembre 2000 matin.

Sources & Méthodes

Dans l'estuaire, entre Nantes et Saint-Nazaire, **le niveau de la marée est enregistré en continu toutes les cinq minutes en 5 stations marégraphiques (7 depuis juillet 2011), gérées par le Grand Port Maritime de Nantes - Saint-Nazaire.** En condition de vive eau de coefficient 94, la pleine mer à Saint-Nazaire met en moyenne 1h30 pour atteindre Nantes. Pour cette étude, le marégraphe de Cordemais est retenu comme marégraphe de référence pour sa position médiane dans l'estuaire aval. Les cotes de pleines mers prédites et les coefficients de marée figurent dans les annuaires des marées édités par le GPMNSN.

Les conditions atmosphériques sont mesurées à la station de Saint-Nazaire – Montoir par Météo-France. La pression atmosphérique (pression horaire), la vitesse et la direction du vent moyennées sur 10 minutes maximum horaire ont été achetées sur le site public de Météo-France (publitheque.meteo.fr). **Le vent en rafale horaire est disponible sur www.infoclimat.fr.** **Les données de houle au large sont celles mesurées à la station Ile d'Yeu Nord et proviennent du réseau Candhis** géré par le Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviale ; elles sont disponibles sur le site de l'IFREMER (www.ifremer.fr/co-en/).

Le débit moyen journalier de la Loire est fourni par la DREAL Pays de la Loire et disponible sur le site www.hydro.eaufrance.fr/.

La topographie de la plaine alluviale et la ligne de rive actuelle sont obtenues grâce à un Modèle Numérique de Terrain Unifié dans lequel sont compilées des données issues de levés par scannographie aéroportée (LIDAR) menés par le GIP Loire Estuaire en avril et mai 2008 et

des données Litto3D® acquises en 2010 et mises à disposition par l'IGN.

La ligne de rive de 1850 est extraite des cartes du cours de la Loire réalisées entre 1848 et 1854 de Vorey (département de la Haute-Loire) à Saint-Nazaire et numérisées par la DREAL Centre.

Les trois images satellites analysées ont été prises par des capteurs différents. La résolution des bandes spectrales varie principalement entre 20 et 30 mètres ; chaque image a fait l'objet d'une classification automatique s'appuyant sur le calcul préalable d'indices (végétation, brillance, humidité), pour permettre de distinguer les espaces en eau ou ressuyés et les espaces hors d'eau.

- image SPOT2 du 16 septembre 1996, 21 910 hectares cartographiés entre Donges et Nantes ;
- image Landsat 7 du 16 avril 2003, 22 580 hectares cartographiés entre Montoir-de-Bretagne et Le Pellerin ;
- image IRS du 18 avril 2003, 16 290 hectares cartographiés entre Lavau-sur-Loire et Nantes.

Le 3 mars 2010, soit trois jours après le passage de la tempête Xynthia, le GIP Loire Estuaire a mené **une campagne de photographies aériennes obliques basse altitude entre Donges et Le Pellerin** permettant l'acquisition d'une série exceptionnelle de près de 1 000 clichés exploités pour cartographier l'état de la plaine alluviale sur 11 610 hectares, à une échelle variant entre 1/4 000 et 1/5 000.

Entre Lavau-sur-Loire et Le Pellerin, 9 516 hectares de plaine sont couverts à chacune des quatre situations.

Des références

Dans le cadre du suivi effectué par le GIPE sur la submersibilité latérale dans l'estuaire de la Loire, deux études cartographiques ont été réalisées :

- *Suivi et observation par télédétection spatiale des zones de recouvrements et découverts latéraux dans l'estuaire de la Loire*, GIP Loire Estuaire et Géolittomer LETG UMR 6554 - CNRS, octobre 2008,

- *Photo-interprétation de prises de vue aériennes obliques de la plaine alluviale inondée de l'estuaire de la Loire*, Ginger - Strategis, GIP Loire Estuaire, juin 2011.

Pour tout savoir sur les marées, un guide éponyme signé Odile Guérin et publié en 2004 est disponible aux éditions Ouest-France.



Établissement public du ministère chargé du développement durable



Cette brochure est cofinancée par l'Union européenne. L'Europe s'engage en Pays de la Loire avec le Fonds européen de développement régional.

Cette fiche appartient au CAHIER 2002 INDICATEURS édité par le GIP Loire Estuaire • 22, rue de la Tour d'Auvergne 44200 NANTES • Tél. : 02 51 72 93 65 • Télécopie : 02 51 82 35 67 • E-mail : gip@loire-estuaire.org • Rédaction : GIP Loire Estuaire • Maquette : Jean-Luc Hubiche • Réalisation / illustrations : Caféine, GIP Loire Estuaire • Crédit photo : Air Papillon • ISSN : en cours. La mission "observation et communication" est cofinancée par les membres du GIP Loire Estuaire, l'Union européenne et l'Agence de l'eau Loire Bretagne.