



Les mouvements

La marée dynamique

L'amortissement du volume de flot ou volume oscillant

L'amortissement du volume de flot ou volume oscillant

Résumé

Témoins de l'intrusion marine, les volumes d'eau qui entrent et sortent de l'estuaire sont de l'ordre de 75 Mm³ en mortes eaux à 280 Mm³ en vives eaux. Suivant les situations hydrologiques, le volume maximal d'eau (pleine mer) dans l'estuaire varie de 310 à 430 Mm³ tandis que le volume minimal (basse mer) varie de 150 à 235 Mm³.

Le bief qui contribue le plus au stockage des entrées est le plus aval, de Saint-Nazaire à Donges, et celui qui contribue le moins correspond au port de Nantes, de Chantenay à Saint-Félix. Toutefois, ramené par unité de longueur, c'est de loin le bief de Donges à Paimbœuf qui accumule le plus d'eau.

L'amortissement du volume oscillant n'est pas régulier. L'inflexion Donges-Paimbœuf se caractérise par une rupture très nette des courbes de volumes cumulés en amont, laissant entrevoir deux types de fonctionnement hydraulique : comme une baie de Saint-Nazaire à Paimbœuf, comme un estuaire de Paimbœuf à Nantes.



Objectif définition

La pénétration et la progression de l'onde de marée tout au long de l'estuaire, peuvent être décrites par trois paramètres intimement liés :

- le marnage : oscillation verticale du niveau de l'eau, entre les basse et pleine mers ;
- les courants : tantôt orientés vers l'amont, le flot, tantôt orientés vers l'aval, le jusant, séparés par les renverses ;
- les volumes d'eau : entrée d'une quantité d'eau en quasi-totalité d'origine marine, **le volume de flot dit volume oscillant**, et sortie de ce volume augmenté d'une partie des eaux apportées par le fleuve, **le volume de jusant**.

Ces paramètres varient, de manière instantanée, en fonction de la situation hydrologique, c'est-à-dire la conjonction incessante du débit fluvial et du débit marin exprimé par le coefficient de marée, et de la situation météorologique (vent, pression barométrique).

Toutefois, le facteur le plus déterminant pour les volumes d'eau en jeu est l'ensemble des

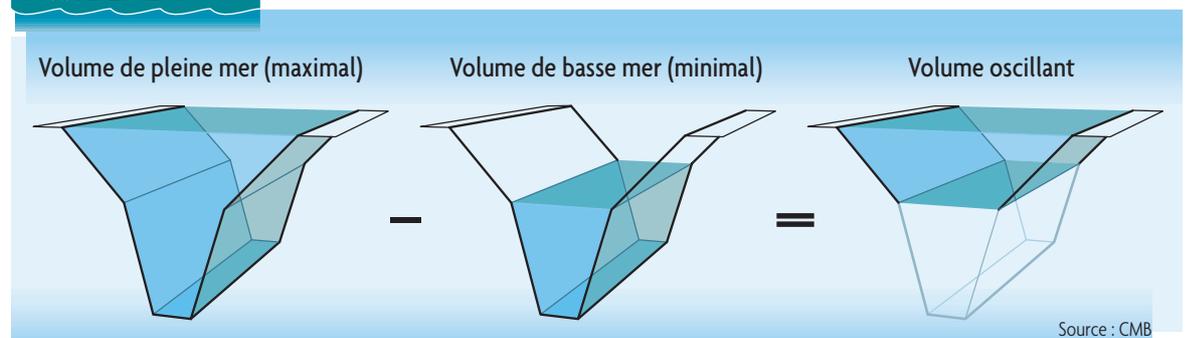
caractéristiques géométriques de l'estuaire, notamment sa profondeur.

Le volume oscillant diminue vers l'amont jusqu'à disparaître en un point dont la distance à l'embouchure - où il est maximal - est dictée par les conditions hydrologiques. C'est **son amortissement**, qui sera d'autant plus prononcé que le débit fluvial est élevé.

Volume oscillant et volume de jusant sont rarement identiques. A débit fluvial constant, le premier est inférieur au second quand les coefficients de marée augmentent (revif), et supérieur quand les coefficients décroissent (déchet).

Le volume oscillant est calculé par différence entre le volume maximal emmagasiné à pleine mer et le volume minimal (résiduel) à basse mer précédente ; pour le volume de jusant, la différence se fait par rapport au volume minimal suivant. La méthode recherchée et utilisée est exclusivement géométrique, et s'appuie sur les enregistrements des hauteurs d'eau et les données topo-bathymétriques.

FIGURE L1 A2-1



L'objectif de cet indicateur est de **suivre l'évolution de l'influence marine** dans l'estuaire et d'**apprécier les répercussions d'une modification de la géométrie de la Loire** sur un des grands paramètres de son fonctionnement.

Du rapport des entrées d'aval et des entrées d'amont au cours de la marée, dépendent les modalités de mélange des eaux, salinités et matières en suspension, et de distribution des êtres vivants.

En l'état actuel des données topobathy-métriques en amont de Bellevue à Sainte-Luce, l'indicateur est limité à la partie de fleuve s'étendant de ce point au pont de Saint-Nazaire, soit sur 57 km de longueur. Les quantités d'eau en jeu en amont de Bellevue ne sont pas connues. En conséquence, les résultats présentés sont incomplets et rendent impossibles les comparaisons avec des données historiques.

Après avoir analysé les volumes d'eau emmagasinés, d'abord sur l'ensemble de l'estuaire suivant des situations hydrologiques caractéristiques, puis leur répartition par bief, l'amortissement du volume oscillant est apprécié par les valeurs, en quantités et en pourcentages, des volumes cumulés en amont de sept sections transversales.

Interprétation

Le vase d'expansion

Selon les situations, le volume de flot emmagasiné par la marée dans l'estuaire varie de 75 Mm³ en mortes eaux à 280 Mm³ en vives eaux. **Les grandes marées apportent de trois à quatre fois plus d'eau que les petites.**

Par marée de vives eaux extrêmes, l'estuaire contient à pleine mer 425 Mm³ d'eau et à basse mer 150 Mm³ environ; en mortes eaux extrêmes, ces quantités sont ramenées respectivement à 310 et 235 Mm³.

TABLEAU L1 A2-1

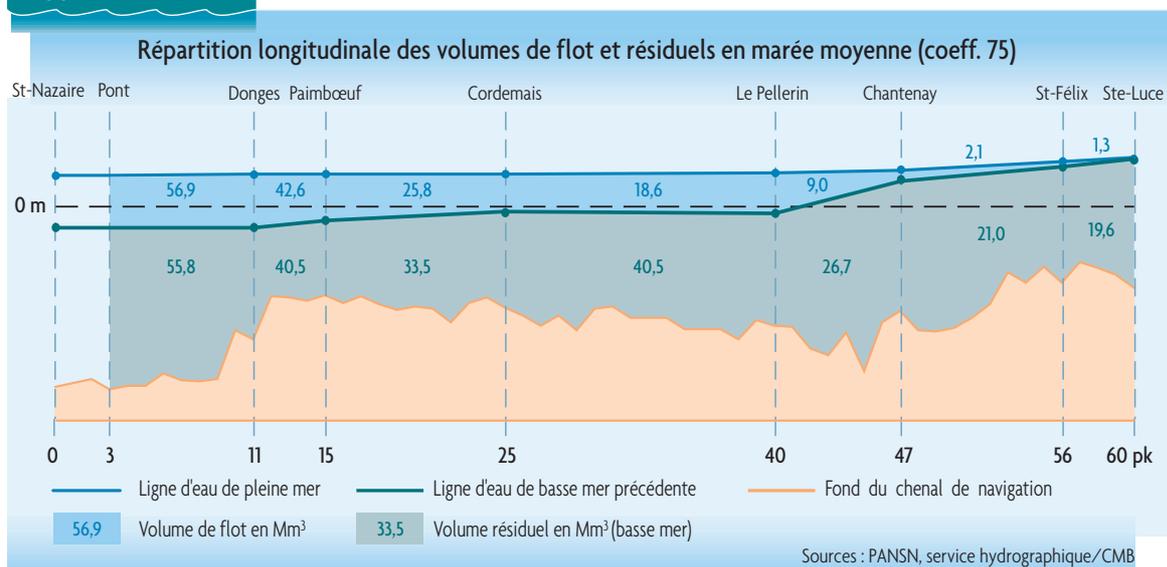
Volumes en mouvement lors de situations hydrologiques caractéristiques							
N° Libellé	Situations de référence		Sélection des ondes de marée			Volumes (Mm ³)	
	Coeff. de marée	Débit à Montjean	Date	Coeff.	Qm ³ /s	Entrées	Sorties
1 Vives eaux et étiage	90 < coeff. < 100	240 < Qm ³ /s < 260	12.07.1998	90	260	222,2	219,4
5 Mortes eaux et hautes eaux	40 < coeff. < 50	1450 < Qm ³ /s < 1550	19.04.2001	53	1490	133,3	133,1
8 Crue débordante	indéterminé	3400 m ³ /s environ	06.01.2000	75	3670	59,0	160,8
11 Vives eaux extrêmes	maximal	indéterminé	20.09.2001	115	374	277,6	264,5
			26.10.1999	110	851	248,4	250,2
12 Mortes eaux extrêmes	minimal	indéterminé	17.04.2001	29	1550	74,4	78,5
			29.03.2000	28	827	85,1	74,5
14 Crue extrême	indéterminé	le plus élevé	01.01.2000	47	5030	96,2	96,5

Sources : PANSN, service hydrographique/CMB

D'une manière générale, la part du volume d'eau entré à la faveur du flot par rapport au volume résiduel de basse mer augmente avec le coefficient : du quart en mortes eaux, elle atteint presque les deux tiers en vives eaux. Par contre, cette part diminue en fonction du débit fluvial : autour de 60 % en étiage, elle n'est plus que du quart en crue prononcée.

Ces résultats contrastés forment l'enveloppe extrême de l'intrusion de la marée au plan hydraulique dans laquelle toutes les situations sont possibles. Cependant, pour les situations les plus courantes, la répartition longitudinale instantanée du volume total entré en flot dans l'estuaire est particulièrement stable.

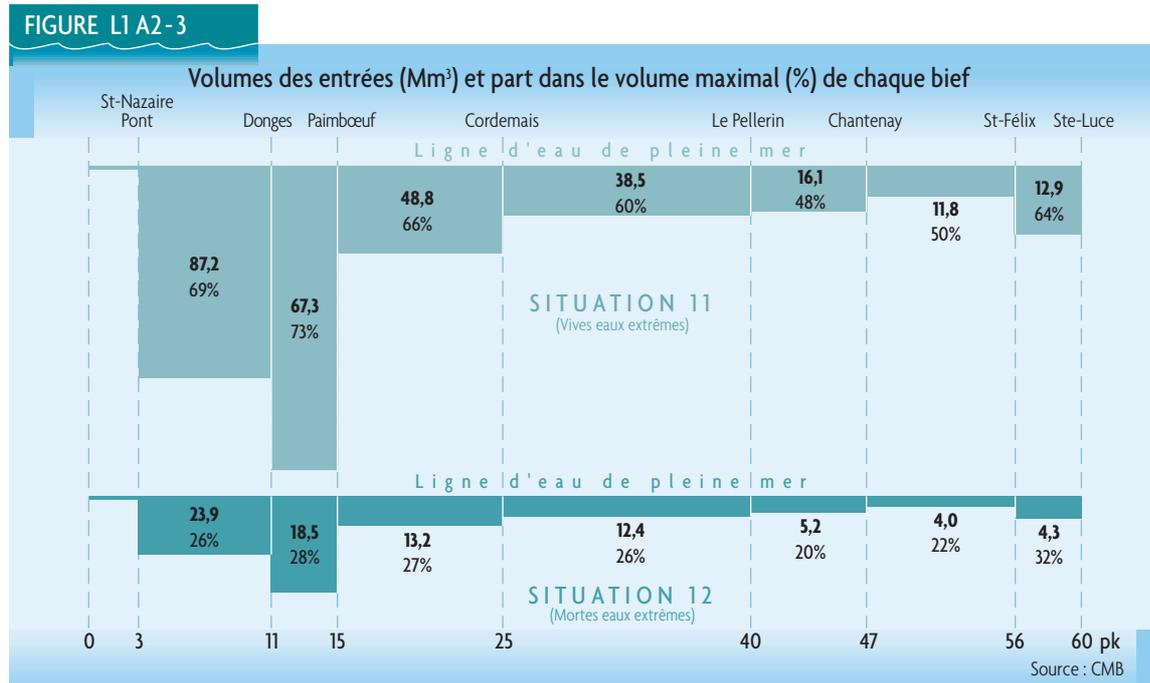
FIGURE L1 A2-2



De bief en bief

L'onde de marée étant progressive, chaque bief atteint ses volumes, minimal et maximal, à des moments différents, plus ou moins décalés. Conséquence : pour une onde de

marée, le total des entrées à pleine mer de chaque bief est supérieur au volume maximal instantané des entrées pendant la montée de l'onde.



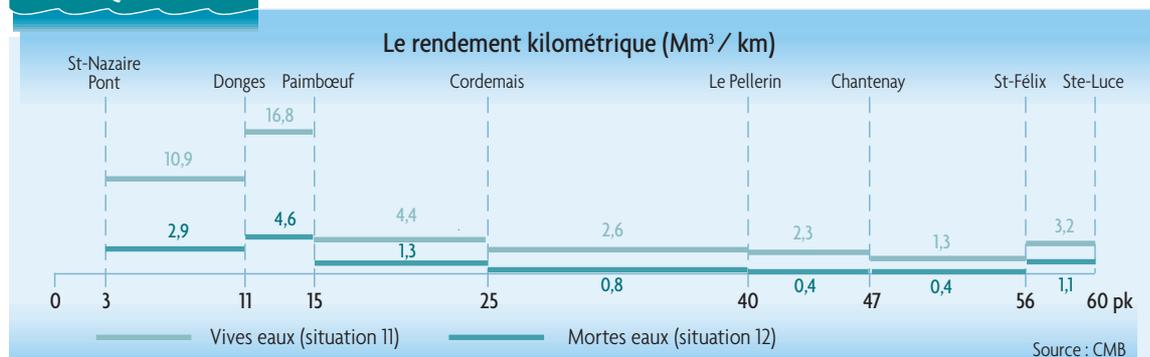
Les volumes en jeu dans un bief représentent sa contribution réelle au mouvement des eaux :

- **Le plus grand contributeur est le bief le plus aval**, de Saint-Nazaire à Donges, dont le volume des entrées varie de 40 à 70 Mm³ suivant les situations de référence et de 24 à 87 Mm³ en situations extrêmes.
- **Le port de Nantes**, de Chantenay à St-Félix, est généralement le moins productif avec un volume passant de 4-5 Mm³ (débits proches du module et hautes eaux en Loire) à 12 Mm³ en étiage fluvial.

Cependant, la contribution de chaque bief doit être modulée en fonction de sa longueur. Le volume des entrées par km de bief, sorte de "rendement kilométrique" d'emmagasinement des entrées, augmente toujours de Saint-Félix à Saint-Nazaire.

Le bief Donges-Paimbœuf se démarque par une augmentation très sensible du volume de flot par unité de longueur : 5 fois plus qu'en amont immédiat, 1,5 fois plus qu'entre Donges et Saint-Nazaire.

GRAPHIQUE L1 A2-1



Quelle que soit la situation hydrologique, la part la plus faible du volume des entrées par rapport au volume maximal se trouve entre Le Pellerin et Saint-Félix, c'est-à-dire dans la partie endiguée et dans le port. Vers l'aval, cette part demeure à peu près constante pour chaque situation : un quart environ en mortes eaux extrêmes, presque les trois quarts en vives eaux extrêmes.

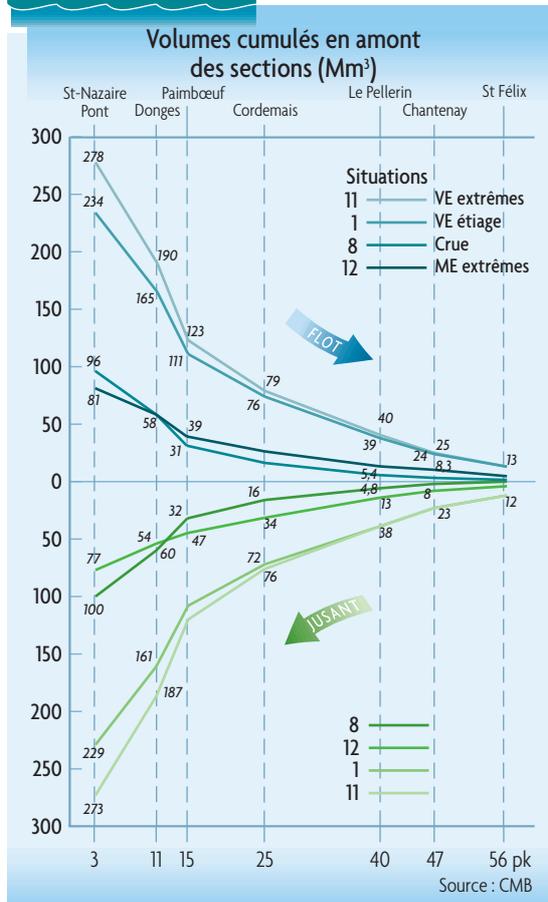
Quant au bief de Saint-Félix à Sainte-Luce, il fonctionne dans toutes les situations comme un bief fluviomaritime puisque le volume de flot y est de manière systématique et constante, inversement proportionnel au débit du fleuve. Si le volume de flot y atteint 13 Mm³ en étiage, il se réduit à 3 Mm³ lors des crues débordantes et à 1,2 Mm³ lors des très grandes crues de 5 000 m³/s.

L'inflexion Donges-Paimbœuf dans l'amortissement

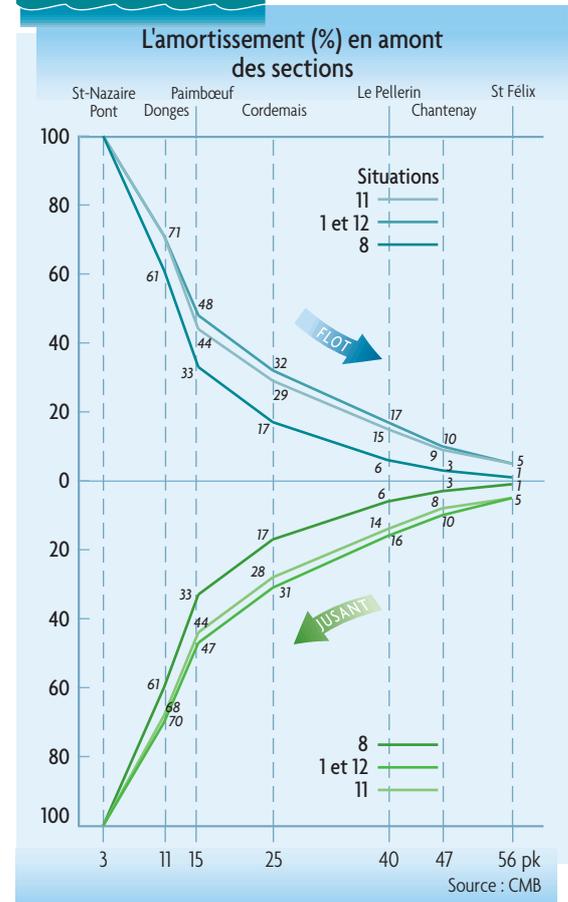
La décroissance vers l'amont des volumes d'eau passant dans les sections d'écoulement au droit des marégraphes n'est pas régulière. Quelles que soient les situations, tant en

quantité qu'en pourcentage, la section de Paimbœuf marque le passage d'un type de fonctionnement hydraulique à un autre.

GRAPHIQUE L1 A2-2



GRAPHIQUE L1 A2-3



Selon les situations, la différence entre le volume entrant et le volume sortant varie de 3 à 5 Mm³, soit quelques pourcents. Les volumes en jeu décroissent avec le débit fluvial et croissent en fonction du coefficient de marée.

Le bief de Donges à Paimbœuf, pourtant le plus court, est celui qui, en toutes conditions, participe le plus à la diminution du volume entrant et à l'augmentation du volume sortant. La perte et le gain correspondants aux quantités cumulées en amont de Donges (pk 11) et de Paimbœuf (pk 15) varient de

30 à 50 % dans les deux sens. En d'autres termes, sur 3 m³ passant devant Donges, deux passeront en flot ou sont passés en jusant devant Paimbœuf.

L'amortissement est très brutal de Saint-Nazaire à Paimbœuf où ne transite qu'un tiers en crue extrême, ou que la moitié ordinairement, du volume total entrant ou sortant. En amont de Paimbœuf, décroissance du volume de flot et croissante du volume de jusant se font de manière équilibrée.



La méthode, strictement géométrique, consiste à calculer les volumes contenus à certains moments de la pénétration de l'onde de marée puis, par différence, obtenir les volumes en plus ou en moins. Sa mise en œuvre passe par la constitution préalable d'un **Modèle Numérique de Terrain**, dit **Unifié** (MNTU) car consolidant les données provenant de plusieurs sources : sondages bathymétriques du Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire, levés par scanographie laser aéroportée effectués par la Cellule de Mesures et de Bilans.

Sur le même périmètre et avec la même résolution, **des Modèles Numériques de Lignes d'Eau** (MNLE) sont créés à partir des

enregistrements automatiques des hauteurs d'eau aux marégraphes fournis par le Port et le Service Maritime et de Navigation. Ces MNLE, de demi-heure en demi-heure, sont calculés sur l'ensemble d'un cycle de marée à Saint-Nazaire, en débordant 1 heure avant et 2 heures après.

Les calculs de volumes, effectués à l'aide du logiciel Surfer, portent par croisement du MNTU et des MNLE sur l'ensemble du périmètre et de l'onde, et sur les différents biefs limités par le méridien passant par chaque marégraphe.



Des références

La notion de volume oscillant est fondamentale pour l'aménagement des rivières à marée dans un objectif de navigation. Son exposé au cours du temps relève avant tout de la littérature technique, notamment dans les *Annales des Ponts et chaussées* dont trois mémoires au cours du XX^e siècle traitent de l'estuaire

de la Loire (Kauffmann, 1915 ; Gibert, 1940 et Ballade, 1953).

Une synthèse a été effectuée sur le sujet, ainsi que des estimations par modélisation mathématique à partir de 1974-1976, par Migniot en 1993 à l'initiative de l'APEEL.