



Les mouvements

L'intrusion saline

La salinité de l'eau

La salinité de l'eau

Résumé

La répartition des teneurs en sels dans l'estuaire est indicatrice de son fonctionnement hydrodynamique et de la part respective des influences marine et fluviale contrôlées par la géométrie du lit mineur. Le mode de pénétration des eaux marines diffère selon les conditions hydrologiques et entraîne une stratification de la colonne d'eau d'autant plus forte que le débit est élevé et le coefficient de marée faible.

Entre 2007 et 2020, le front de salinité n'atteint la station de Bellevue que très ponctuellement lors de l'étiage exceptionnel de 2019. L'eau est par contre salée en permanence à Donges, station la plus en aval, dès lors que le débit est en deçà de 850 m³/s.

La position du front de salinité a progressé de 30 km vers l'amont entre 1950 et le début des années 1990. Cette progression est enrayée aujourd'hui.



Objectif définition

Les estuaires sont des zones de mélange entre les eaux douces des fleuves et les eaux salées de l'océan.

La salinité de l'eau a un impact direct sur la faune et la flore selon leurs sensibilités. La répartition des organismes vivants est donc susceptible d'être modifiée en cas d'évolution de la salinité. Les usages agricoles (abreuvement, envois d'eau dans les marais) et industriels peuvent également être influencés voire remis en cause. La progression antérieure dans l'estuaire des eaux salées a déjà motivé en 1988 le déplacement de la prise d'eau potable de l'agglomération nantaise, de La Roche (Nantes) à Mauves-sur-Loire, 15 km en amont. L'eau prélevée à cette fin doit être inférieure à **0,5 g/l, ce qui correspond à la limite de concentration du front de salinité.**

Le suivi de ce paramètre est donc essentiel, aussi bien pour la compréhension du fonctionnement environnemental de l'estuaire que pour ses impacts sur ces multiples usages de l'eau.

La répartition longitudinale des taux de salinité est dictée par la situation hydrologique et donc par :

- le **coefficient de marée** : plus il est élevé, plus la quantité d'eaux salées qui entre dans l'estuaire est grande ; les eaux salées se propagent vers l'amont sous l'effet du flot (marée montante) et sont repoussées vers l'aval lors du jusant (marée

descendante). L'intrusion saline accompagne ainsi la marée dynamique. C'est le **phénomène de pompage tidal** ;

- le débit fluvial : de lui dépend la quantité d'eaux douces propres à diluer les eaux salées. De plus, les débits de crue contrecarrent le volume de flot, donc les apports en sels.

La répartition verticale des degrés de salinité est assujettie à la différence de densité des eaux ; les eaux les plus denses s'écoulent au fond. Lorsque l'agitation est faible, en période de mortes eaux (ME), les eaux fluviales restent en surface, alors que l'eau de mer pénètre dans l'estuaire sur le fond. En début de remontée des coefficients de marée (revif), les eaux de surface et du fond se mélangent, augmentant rapidement la salinité des eaux de surface. Ce **transport par densité** est d'autant plus important que le coefficient de marée avant le revif est bas.

La densité varie en fonction de :

- la charge en sels : l'eau salée est plus dense que l'eau douce ;
- une eau très chargée en MES a une densité plus élevée qu'une eau moins chargée ;
- la température : les eaux froides sont plus denses que les eaux chaudes.

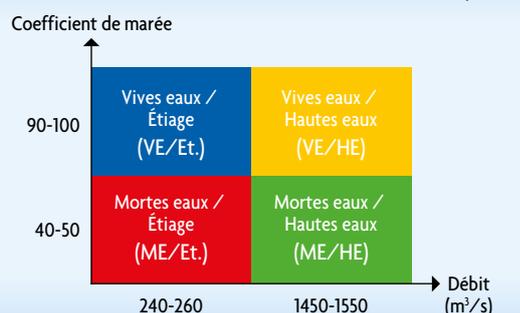
La température influence peu la densité contrairement à la charge en MES et en sels.

Afin d'analyser les évolutions de la salinité sur le long terme, il est nécessaire de définir des situations comparables en terme de conditions hydrologiques. Quatre situations de référence sont ainsi utilisées dans l'analyse.

L'objectif de cet indicateur est d'explicitier la répartition longitudinale et verticale de la salinité dans l'estuaire de la Loire et sa variation temporelle. Il est composé du suivi en continu de la concentration en sel entre 2007 et 2020 et d'une comparaison des situations de référence. La position du front de salinité depuis le début du XX^e siècle est également étudiée.

FIGURE L1 B1 - 1

Situations de référence utilisées dans l'analyse



Source : GIP Loire Estuaire

Une stratification plus forte en crue et mortes eaux

La répartition verticale des taux de salinité est variable selon les conditions hydrologiques, **du mélange homogène sur toute la verticale à la formation du coin salé** (l'eau salée pénétrant en pointe sous l'eau douce).

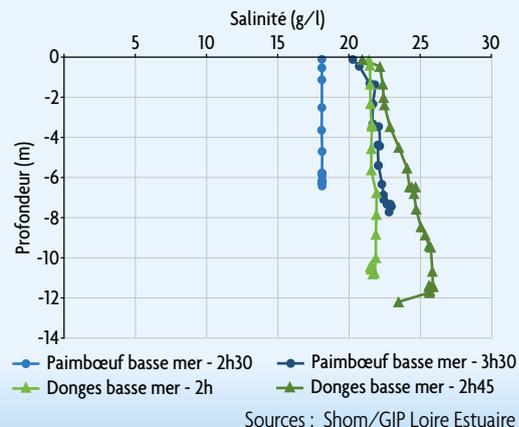
Les eaux se mélangent davantage par faibles débits qu'en crue, à coefficients équivalents. **Ce mélange est d'autant plus fort que le débit est faible et le coefficient de marée élevé.** Il est favorisé par les courants de flot de vives eaux. Lors de l'étiage extrême (98 m³/s) et vive eau (111) de septembre 2019, le gradient vertical est quasiment absent au moins à un moment de la marée ; la salinité est similaire quelle que soit la profondeur de mesure. Ces conditions sont exceptionnelles, ce débit n'ayant été mesuré qu'une fois depuis 1991.

La plupart du temps, il existe encore un gradient vertical plus ou moins prononcé selon les conditions hydrologiques, le moment de la marée et la localisation dans l'estuaire. La stratification de la colonne d'eau évolue également au fur et à mesure de la pénétration de l'intrusion saline dans l'estuaire : elle est généralement plus importante en aval.

La stratification est maximale en mortes eaux et crue. Dans la partie aval de l'estuaire à Montoir elle est déjà un peu moins marquée à 2000 m³/s qu'à

GRAPHIQUE L1 B1 - 1

Salinité à Donges et Paimboeuf
le 2 septembre 2019 (98 m³/s et coef. 111)



4000 m³/s. Elle est par contre plus constante au cours de la marée, du fait d'un écoulement moindre des eaux douces. Le coin salé est détecté sur 6 à 7 m de profondeur le 4 avril 2006 tout au long de la marée, avec une salinité autour de 30 g/l, qui baisse rapidement à 21 g/l à proximité du fond. La stratification s'atténue par marée de vive eau, même si le gradient vertical est encore important.

GRAPHIQUE L1 B1 - 2

Salinité au cours de la marée à Montoir-de Bretagne à débit élevé

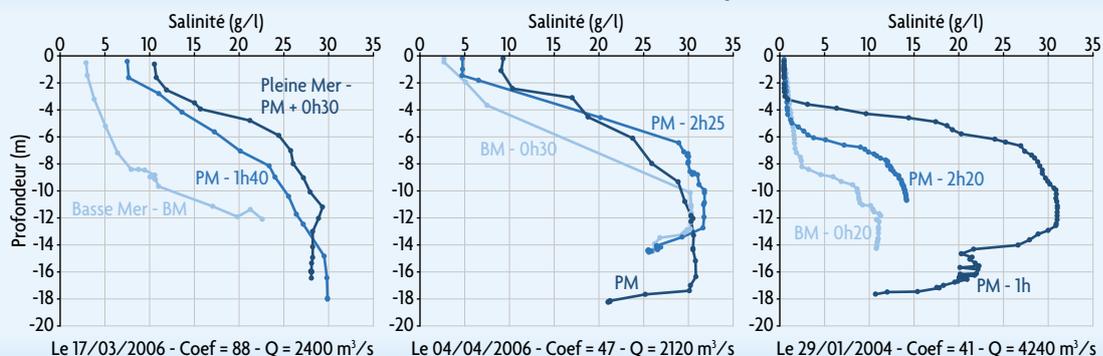
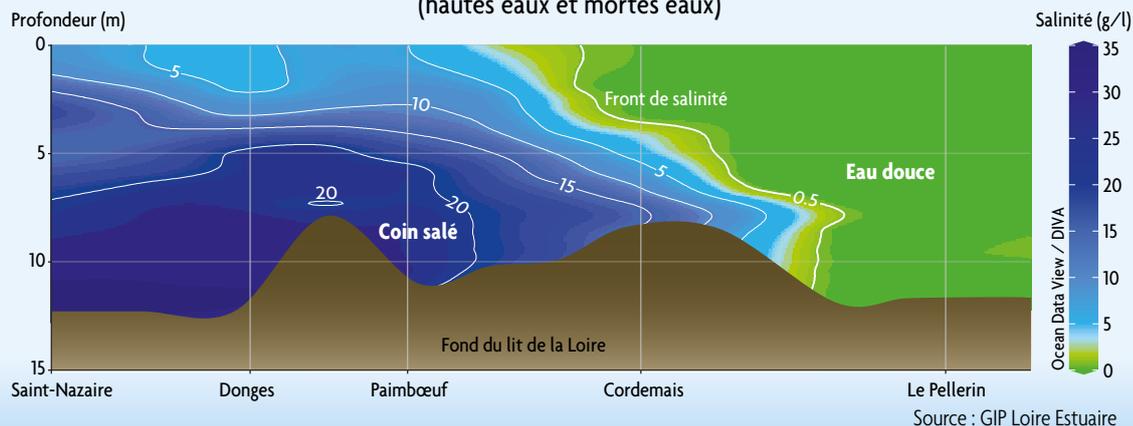


FIGURE L1 B1 - 2

Répartition de la salinité entre Le Pellerin et Saint-Nazaire à pleine mer locale le 23 février 2021
(hautes eaux et mortes eaux)



Un marnage halin dépendant à la fois du coefficient de marée et du débit

L'amplitude de variation de la salinité au cours du cycle de marée - ou marnage halin - augmente, plus le coefficient de marée est élevé et le débit faible.

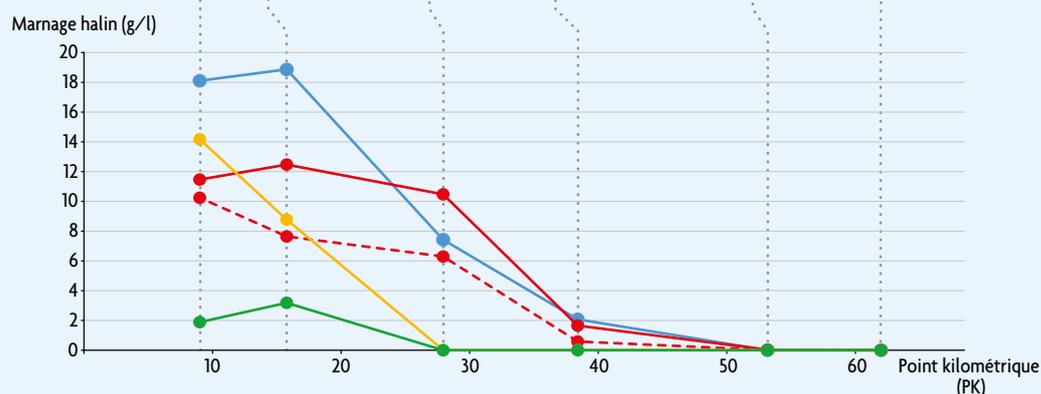
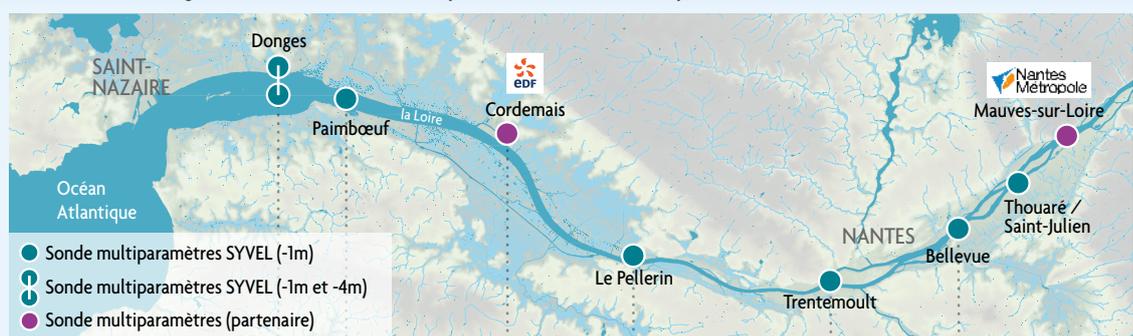
En effet, en vives eaux, le volume d'eau salée pénétrant dans l'estuaire est plus important alors que le volume d'eau de mer, résiduelle et dessalée, est moindre à marée basse. Le marnage halin maximum est donc mesuré en situation de vives eaux et d'étiage.

L'amplitude de variation décroît d'aval en amont, rapidement en vives eaux, un peu moins en mortes eaux. Le pic de salinité a lieu autour de la pleine mer.

L'influence du coefficient de marée sur le marnage halin est prépondérante en aval de Paimbœuf : le marnage halin est plus fort en vives eaux quel que soit le débit. L'influence du débit est prépondérante en amont : le marnage halin est plus fort en étiage, quel que soit le coefficient de marée entre Bellevue et Cordemais.

GRAPHIQUE L1 B1 - 3

Marnage halin et salinité correspondante selon le PK pour les 4 situations de référence



	Salinité (g/l)	Donges	Paimbœuf	Cordemais	Le Pellerin	Trentemoult	Bellevue
VE/Et. (04/08/2016)	Max	23,90	21,09	8,09	2,32	Absence de données	0,20
	Min	5,80	2,22	0,66	0,25	Absence de données	0,20
ME/Et. (09/11/2016)	Max	27,22	21,10	11,55*	1,77	0,14	0,15
	Min	15,75	8,63	1,07	0,12	0,11	0,15
VE/HE (17/11/2013)	Max	15,08	9,00	0,17	0,13	0,11	0,11
	Min	0,90	0,22	0,16	0,12	0,11	0,11
ME/HE (15/06/2016)	Max	3,01	3,14	0,17	0,15	Quasi nulle	
	Min	0,58	0,43	0,17	0,15	Quasi nulle	

— VE/Et. — VE/HE — ME/Et. (09/11/2016) - - - ME/Et. (14/09/2013) — ME/HE
* réserves sur cette valeur proche de la saturation du capteur

Sources : BD TOPO® IGN/DREAL Pays de la Loire/Shom/EDF/GIP Loire Estuaire

De 2007 à 2020, les variations interannuelles de salinité dictées par le débit

Sur les stations du réseau SYVEL, entre 2007 et 2020, les variations interannuelles de salinité (à -1m) sont dominées par l'influence des apports en eau douce du fleuve et donc par le débit.

L'eau douce circule quasiment en permanence au droit de Bellevue, en amont de Nantes. Elle n'a

enregistré des concentrations supérieures à 0,5 g/l que très ponctuellement en 2019, lors de l'étiage le plus intense depuis la mise en service du réseau SYVEL. **Le front de salinité atteint Trentemoult seulement lorsque le débit est inférieur à 200 m³/s**, la concentration en sel restant toujours

inférieure à 3 g/l. Entre 2007 et 2020, l'eau est douce 98% du temps de mesure effectif au droit de la station.

En hiver, l'eau reste douce jusqu'à Cordemais une grande partie du temps, sauf lorsque les apports fluviaux sont faibles, comme en février 2012 ou

en janvier 2019. L'eau douce atteint même Donges régulièrement, surtout lorsque le débit dépasse les 2500 m³/s, mais jamais pendant tout le cycle de marée. Une crue tardive comme celle de juin 2016 peut également expulser de l'eau douce jusqu'à Donges.

FIGURE L1 B1 - 3

Distribution journalière des concentrations en salinité par an et par station et débit à Montjean-sur-Loire (2011 à 2020)

Les années 2007 à 2010 ne sont pas représentées.

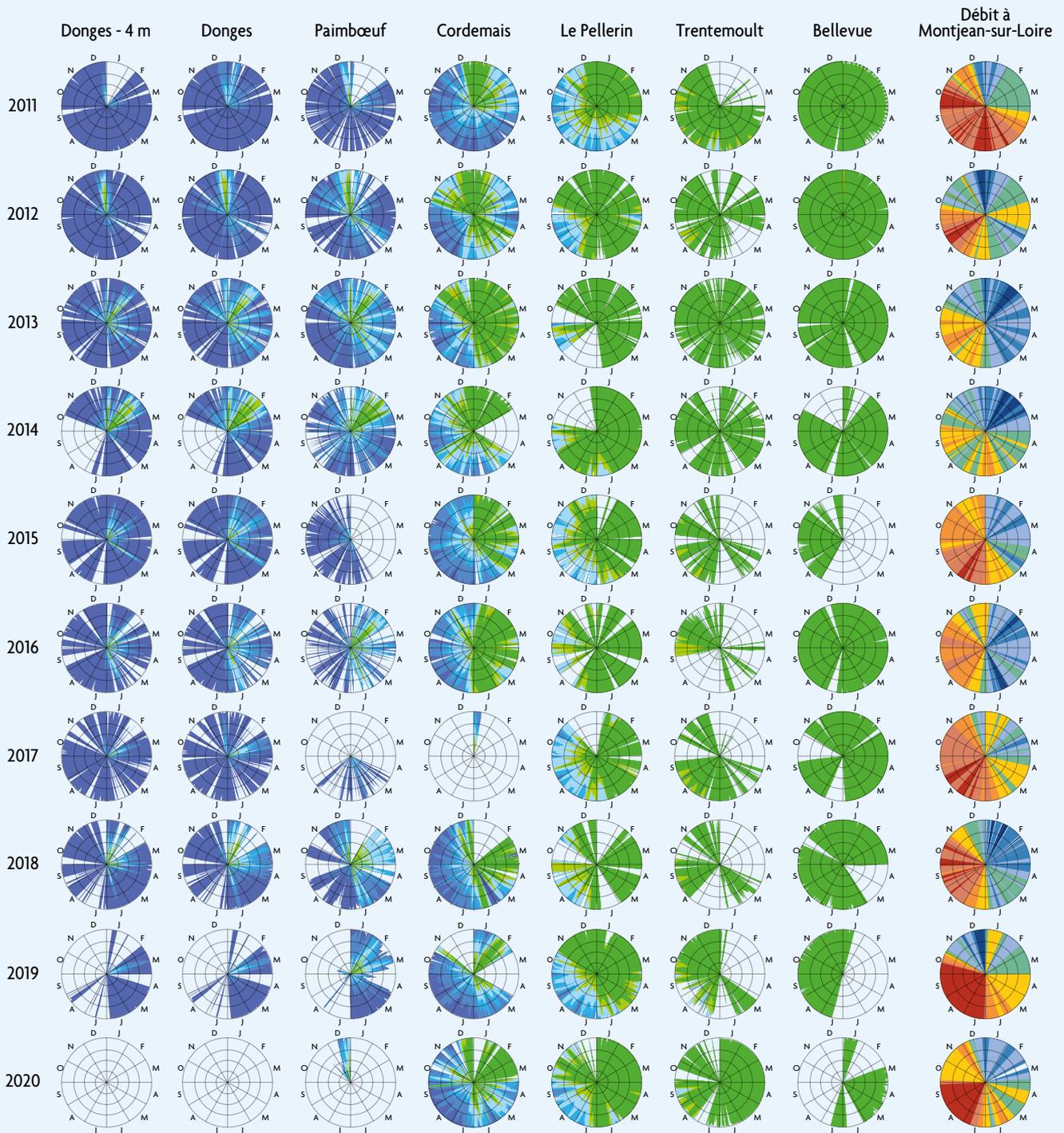


TABLEAU L1 B1 - 1

Ordre de grandeur des débits conditionnant la salinité en Loire, hors événements climatiques exceptionnels

	Donges	Paimbœuf	Cordemais	Le Pellerin	Trentemoult	Bellevue
Débit (m ³ /s) en-dessous duquel l'eau est salée en permanence (> 0,5 g/l)	850 (env. 64 % du temps)	450 (env. 39% du temps)	240 (env. 18% du temps)	115 (env. 2% du temps)	Eau jamais salée en permanence (sur 2007 - 2020)	
Débit (m ³ /s) au-delà duquel l'eau est douce en permanence (< 0,5 g/l)	Eau jamais douce en permanence (sur 2007 - 2020)		2000 (8,8% du temps)	870 (env. 34 % du temps)	400 (64% du temps)	150 (env. 95% du temps)

Sources : DREAL Pays de la Loire/EDF/GIP Loire Estuaire

Les salinités supérieures à 10 g/l sont mesurées principalement sur Donges et Paimbœuf, elles atteignent Cordemais lors des étiages inférieurs à 300 m³/s, mais seulement pendant une partie du cycle de marée.

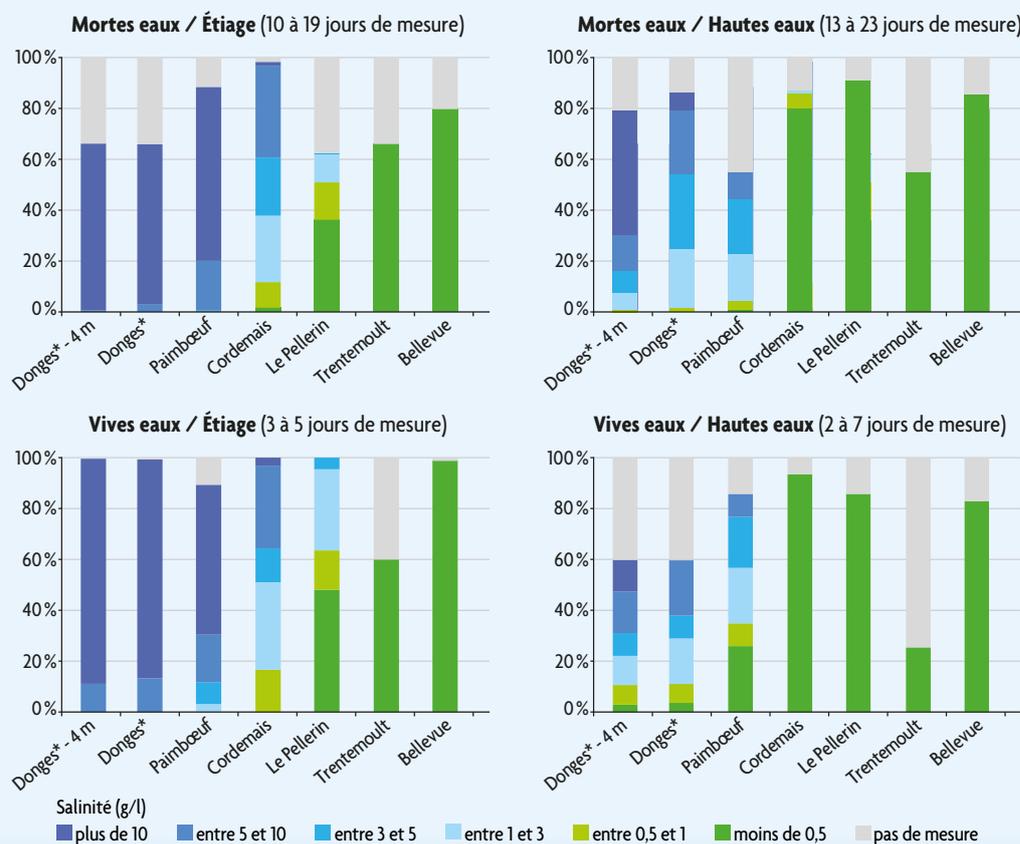
Quel que soit le coefficient et le moment de la marée, l'eau est salée en permanence à Donges en deçà du module (850 m³/s). À l'inverse, l'eau reste douce à Cordemais au-delà d'un débit supérieur à 2000 m³/s, alors qu'elle reste salée tout au long de la marée lorsque le débit est inférieur à 240 m³/s.

Le débit étant le facteur contrôlant le plus la salinité sur l'ensemble des stations SYVEL, les différences sont plus notables entre les situations d'étiage et de hautes eaux pour un même coefficient de marée, qu'entre les situations de mortes eaux et vives eaux pour un même débit.

C'est en hautes eaux et vives eaux que les pourcentages de temps de présence de l'eau douce sont les plus élevés quelle que soit la station. Les coefficients élevés entraînent en effet un plus fort retrait vers l'aval des eaux marines à basse mer.

GRAPHIQUE L1 B1 - 4

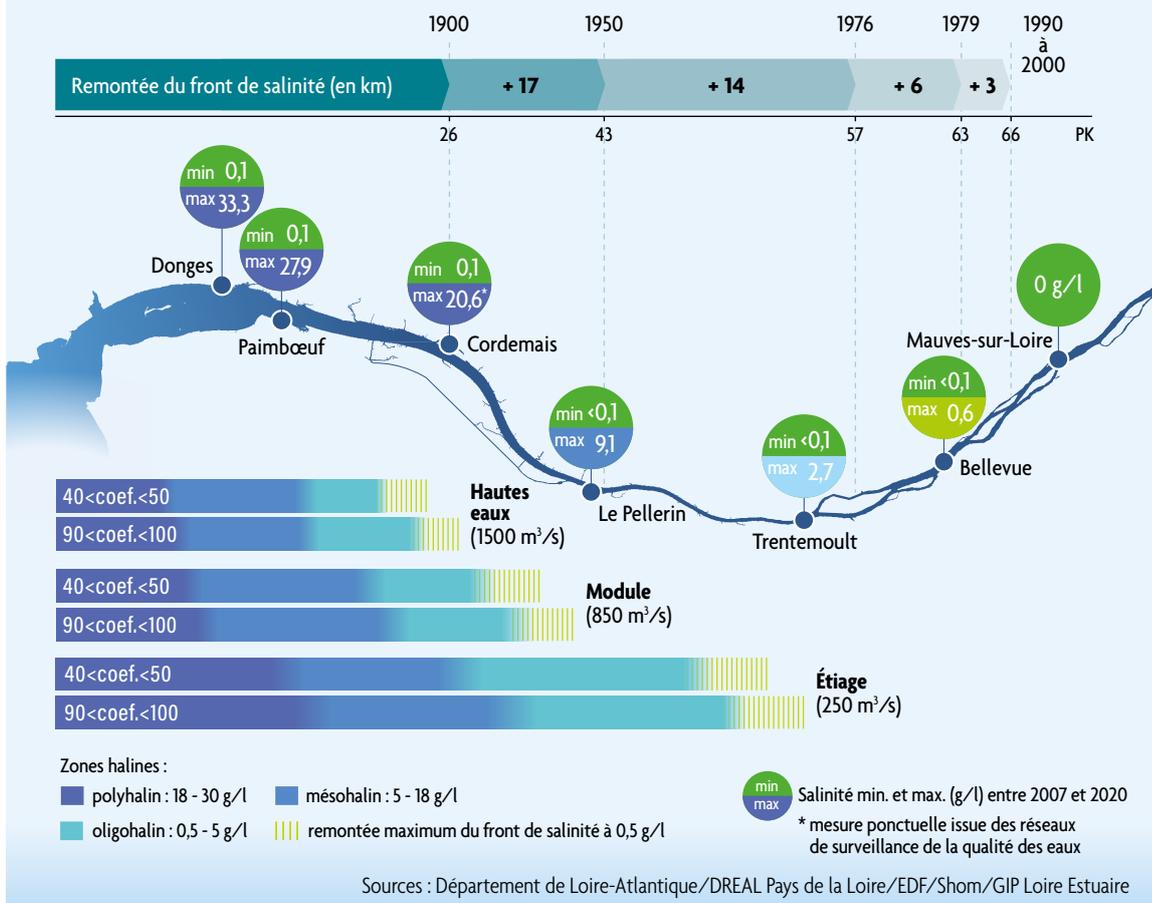
Pourcentages de temps de présence cumulé des différentes classes de salinité pour 4 situations de référence entre 2007 et 2020



Sources : DREAL Pays de la Loire/Shom/EDF/GIP Loire Estuaire

FIGURE L1 B1 - 5

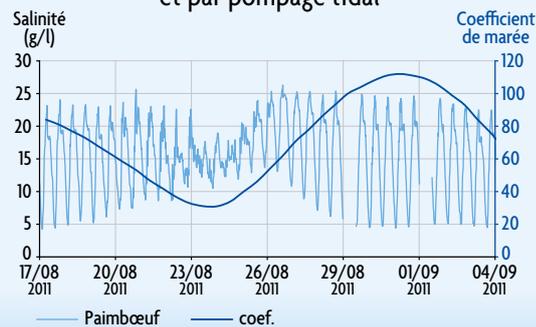
Localisation des zones halines en sub-surface depuis 2007 et position du front de salinité depuis 1900



En situation d'étiage et mortes eaux, le front de salinité à 0,5 g/l atteint Le Pellerin en sub-surface

GRAPHIQUE L1 B1 - 5

Intrusion saline en étiage à Paimbœuf par densité et par pompage tidal



(-1 m) pendant 40 % du temps de mesure effectif. Pour un même débit lors des vives eaux, ce pourcentage atteint 52 %. En hautes eaux, le front de salinité reste en aval du Pellerin et n'atteint Cordemais qu'en mortes eaux pendant au moins 7 % du temps. **Le temps passé dans les classes de salinité les plus fortes est en effet généralement plus élevé lorsque le coefficient est faible.** Ainsi, à Donges à -4 m, la salinité est supérieure à 10 g/l pendant 62 % du temps de mesure effectif en mortes eaux et hautes eaux et moins de 20 % du temps de mesure effectif au même débit en vives eaux. Bien que les maxima de salinité soient plus faibles en mortes eaux, ils se maintiennent plus longtemps. Les minima sont également plus élevés. Le phénomène de transport par densité joue également un rôle dans ce résultat : la salinité qui augmente rapidement en revif peut être plus élevée que lors des vives eaux suivantes.

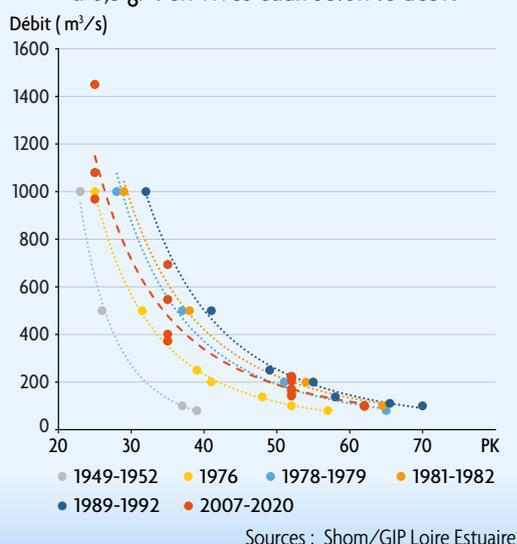
La remontée du front de salinité aujourd'hui enrayée

Le front de salinité à 0,5 g/l a progressé vers l'amont jusqu'au début des années 1990, à cause des grands aménagements réalisés au cours du XX^e siècle (comblement et colmatage latéraux, approfondissement et régularisation du chenal principal) modifiant la géométrie de l'estuaire avec le resserrement du lit mineur pour propager la marée plus en amont du fleuve.

La remontée du front de salinité est d'autant plus rapide et plus grande que le débit est faible : à 1000 m³/s, l'intrusion haline progresse d'une dizaine de kilomètres entre 1950 et le début des années 1990, alors que la remontée est de 30 km à moins de 100 m³/s, dont 25 km avant 1979. Ces débits très faibles sont observés moins de 1% du temps depuis 1900.

GRAPHIQUE L1 B1 - 6

Évolution de la position du front de salinité à 0,5 g/l en vives eaux selon le débit



Depuis les années 1990, une stabilisation voire un recul du front de salinité serait observé, mais la grande variabilité du contexte hydrologique empêche de statuer. En effet, même à coefficient de marée et débit identiques, la position du front de salinité est différente selon que le cycle lunaire est en revif ou en déchet, et que le débit est stable ou dans une phase de brusques variations.

Le front de salinité atteint la station de Bellevue (au PK 62) à plusieurs reprises lors de l'étiage 2019. Néanmoins, le temps de dépassement du seuil à 0,5 g/l est toujours très court, de 40 min à 1h30 au maximum, autour de la pleine mer locale. **Le site le plus amont où le front de salinité a été mesuré est Thouaré-sur-Loire en 2005.**

Sources & Méthodes

La salinité est la quantité de sels dissous (minéralisation) dans l'eau. Elle est calculée à partir de la mesure de la conductivité de l'eau - soit la capacité de l'eau à conduire un courant électrique - en tenant compte notamment de la température et de la pression.

Le réseau de mesures en continu SYVEL (SYstème de Veille dans l'Estuaire de la Loire) du GIP Loire Estuaire a été mis en place en 2007. Il se compose en 2021 de 8 stations : Oudon et Thouaré/Saint-Julien (depuis fin 2020), Bellevue, Trentemoult, Le Pellerin, Cordemais (appartenant à EDF), Paimbœuf et Donges (depuis 2011). Elles mesurent toutes les 10 à 15 min (toutes les heures pour Cordemais) la conductivité (salinité), la turbidité (concentration en MES), la concentration

en oxygène dissous et la température de l'eau en sub-surface (-1 m). Le capteur de conductivité de Cordemais sature à 20 mS/cm, soit une salinité de l'ordre de 12 g/l. La station de Donges, est équipée d'un deuxième point de mesure à 4 m sous la surface.

Des mesures haute-fréquence de ces mêmes paramètres sont également réalisées par Nantes Métropole à la station de pompage de Mauves-sur-Loire.

Le GIP LE a réalisé des profils longitudinaux et transversaux dans l'estuaire sur plusieurs profondeurs, selon différentes conditions hydrologiques entre 2000 et 2006, en 2019 et 2021.

Des références

Les données plus anciennes sont pour la plupart citées dans les rapports de synthèse de l'APEEL 1984 - 1994, tome I Hydrosédimentaire. Elles sont également issues de la thèse de Patrice Le Douarec, « L'intrusion saline dans l'estuaire interne de la Loire. Étude du front de salinité et de ses variations saisonnières », Université de Nantes, 1978.

F. Ottmann, « Étude de la concentration bactérienne par le bouchon vaseux dans l'estuaire de la Loire », Université de Nantes, 1979.

ACEL, « Étude hydrologique de l'estuaire de la Loire », 1994.



Cette opération est cofinancée par l'Union européenne. L'Europe s'engage sur le bassin 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 : Comcaféine, GIP Loire Estuaire • Crédits photo : Ph. Graindorge, GERPHO - GIP Loire Estuaire • Impression : Offset 5 Edition • ISSN : en cours.

