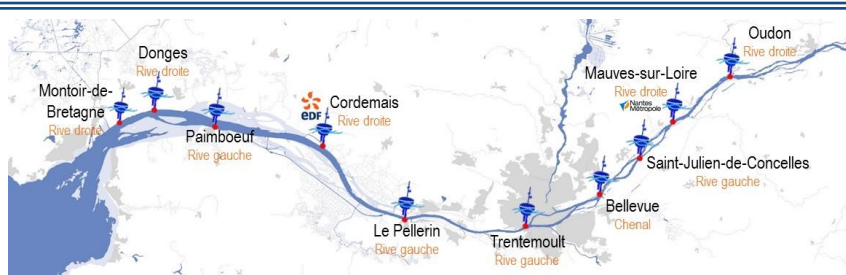


SYVEL

Système de Veille dans l'Estuaire de la Loire



Le réseau haute fréquence SYVEL est composé de huit stations qui mesurent en continu la conductivité (salinité), la turbidité, la concentration en oxygène dissous et la température de l'eau en surface. La station de Donges est équipée d'un second point de mesure à 4 mètres sous la surface pour étudier la stratification verticale. La station d'Oudon est équipée d'un capteur de « chlorophylle a » pour étudier le phénomène d'eutrophisation. La station de Montoir-de-Bretagne est équipée d'un capteur de pH. Le réseau est en place depuis 2007. Donges est installée en 2010, Thouaré-Saint Julien et Oudon en décembre 2020, et Montoir-de-Bretagne en avril 2022. Deux stations complémentaires à Cordemais et à Mauves-sur-Loire sont gérées respectivement par EDF et Nantes Métropole.

Les coefficients de marée à Saint-Nazaire utilisés dans les analyses sont fournis par le SHOM.

Les débits de la Loire sont fournis par la DREAL des Pays de la Loire, à la station fluviale de référence de Montjean-sur-Loire à 117 km de Saint-Nazaire.

Trois phénomènes sont suivis :

- **le bouchon vaseux** : zone où la concentration en matières en suspension (MES) dépasse 1 g/l ;
- **la zone d'hypoxie** : zone où la concentration en oxygène dissous descend en deçà de 5 mg/l ;
- **le front de salinité** : limite de la salure des eaux à 0,5 g/l.

Depuis 2020, l'ensemble des stations est équipé de sondes multi-paramètres. Une nouvelle station est installée sur la commune de Montoir-de-Bretagne, depuis avril 2022. Elle mesure en continu les paramètres température, conductivité, turbidité, concentration en oxygène dissous, pH. L'objectif est d'améliorer les connaissances sur les apports de l'océan à l'estuaire.

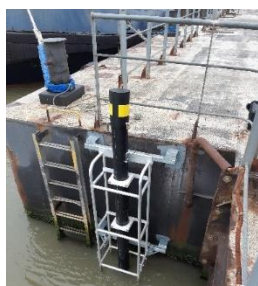


Figure 1 : Station SYVEL de Montoir-de-Bretagne

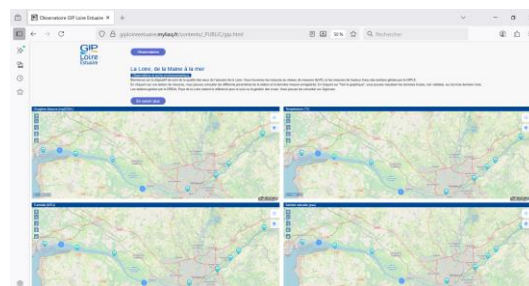


Figure 2 : Carte interactive

Les données sont disponibles en temps réel sur le site internet depuis la carte interactive <https://www.loire-estuaire.org/accueil>

Bulletin n°14 du 24/03/2026

Définition du paramètre

Le potentiel hydrogène (pH) permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'une eau.

Le capteur installé sur le réseau SyVEL (au niveau de la station de Montoir-de-Bretagne) mesure en continu le pH de la Loire grâce à une cartouche intégrant une électrode combinée. Celle-ci associe une électrode de verre, sensible aux ions hydrogène (H⁺), et une électrode de



référence. Les cartouches sont remplacées périodiquement pour assurer la fiabilité des mesures.

Technologie	Electrodes
Gamme	0 – 14 pH
Exactitude	0,1 pH
Résolution	0,01 pH

Mesures historiques basse fréquence dans l'estuaire de la Loire (1971-2024)

Des mesures de pH sont réalisées dans l'estuaire de la Loire depuis les années 1970 à la station de Ste Luce sur Loire et les années 1990 à la station de Paimbœuf, avec une fréquence mensuelle. Les analyses sont faites préférentiellement à basse mer, pour caractériser les apports fluviaux.

Station de Ste-Luce sur Loire (1971 - 2024)

La station de Sainte-Luce-sur-Loire est située à l'amont de Nantes. Les eaux sont le plus souvent douces, entre 2007 et 2024, le front de salinité à 0,5 g/l a été atteint quelques heures, sans dépasser une marée.

Les eaux de la Loire à Sainte-Luce-sur-Loire (Bellevue) présentent un pH légèrement alcalin, avec une valeur moyenne de 8,10 sur l'ensemble de la période de mesure. Le pH varie entre 6,84 et 9,70, reflétant des fluctuations naturelles liées aux cycles hydrologiques et biologiques.

L'analyse de l'évolution du pH à Sainte-Luce-sur-Loire sur 55 ans (Figure 3) révèle une tendance non linéaire. Pour identifier les périodes de changement, une méthode statistique de détection de ruptures est appliquée.

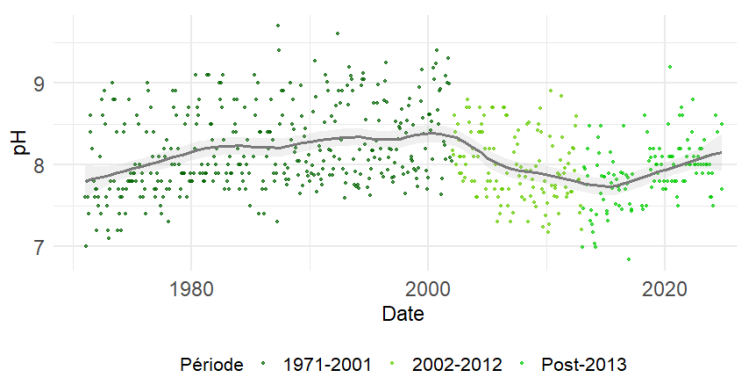


Figure 3 : Evolution du pH à la station de Ste-Luce-sur-Loire, entre 1971 et 2024 (en gris, courbe moyenne) (source des données : Département 44, AELB)

Entre la période 1971-2001 et la période post-2013, le pH moyen est passé de 8,20 à 7,93, soit une baisse d'environ 0,3 unité pH. Cette évolution s'accompagne de modifications significatives de la qualité de l'eau.

Les concentrations en phosphore total et phosphates ont fortement diminué, avec des réductions respectives de 64% et 54% entre la première et la dernière période. En revanche, les concentrations en nitrates ont augmenté de 27%, passant de 10,2 à 12,9 mg/L (les données récentes montrent toutefois une diminution des concentrations). L'eau y est bien oxygénée tout au long de l'année, avec une concentration moyenne en oxygène dissous de 10,3 mg/L. La turbidité reste faible.

Les variations saisonnières du pH à Sainte-Luce-sur-Loire sont marquées, avec une amplitude de 0,6 unité pH entre les saisons. Les valeurs les plus élevées sont observées en été, avec un pH

moyen de 8,35, tandis que les valeurs hivernales sont plus faibles, autour de 7,76.

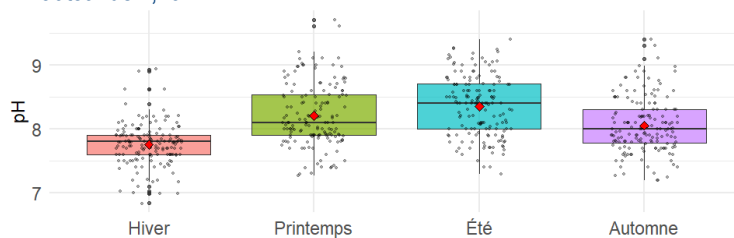


Figure 4 : Variabilité saisonnière du pH à la station de Ste-Luce-sur-Loire (saisons météorologiques) (source des données : Département 44, AELB)

En hiver, les eaux présentent une oxygénation maximale et des concentrations en nitrates très élevées, jusqu'à 17,3 mg/L en moyenne, liées aux lessivages des sols lors des périodes de hautes eaux. Le printemps marque une transition avec un pH qui s'élève progressivement. L'été se caractérise par les pH les plus élevés, associés à des concentrations en nitrates minimales (5,8 mg/L) et une oxygénation qui reste élevée malgré la température. En automne, le pH redescend progressivement.

L'analyse de l'évolution du pH en fonction du débit montre une relation non linéaire (sur la période 1971-2024). Le pH est maximal pour des débits entre 200 et 800 m³/s.

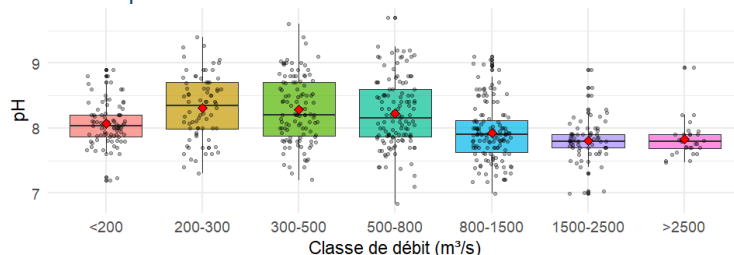


Figure 5 : Variabilité du pH à la station de Ste-Luce-sur-Loire, en fonction du débit (source des données : Département 44, AELB, DREAL pays de la Loire)

En lien avec l'impact du débit sur le fonctionnement de l'estuaire, le pH présente une corrélation négative modérée à forte avec plusieurs paramètres. La relation la plus marquée concerne les nitrates : lorsque les concentrations en nitrates augmentent, le pH tend à diminuer. Cette relation s'observe notamment en période hivernale, lorsque les concentrations en nitrates augmentent sous l'influence de l'augmentation des débits (lessivage des sols) (Abril et al., 2003).

En revanche, la relation entre pH et oxygène dissous reste faible, suggérant que les processus d'oxygénation ne sont pas les principaux facteurs contrôlant le pH à cette station.

Les corrélations entre autres paramètres révèlent que les nitrates augmentent avec le débit et l'oxygène dissous, témoignant de l'influence des apports fluviaux. Le phosphore reste majoritairement associé aux matières en suspension.

Station de Paimbœuf (1994 – 2024)

La station de Paimbœuf est située dans l'estuaire aval, sous influence forte des apports océaniques.

Les eaux de la Loire à Paimbœuf présentent un pH proche de la neutralité, légèrement basique, avec une valeur moyenne de 7,8. Les variations observées sont importantes, avec des valeurs comprises entre 6,7 et 9, reflétant la dynamique complexe de cette zone de transition estuarienne.

L'oxygénation de l'eau est plus faible qu'à Sainte-Luce-sur-Loire, avec une moyenne de 7,0 mg/L, et présente des variations saisonnières marquées allant de 0,3 à 17,5 mg/L. La turbidité est très élevée à cette station, avec des matières en suspension moyennes de 1,4 g/L, soit 25 fois plus qu'à Sainte-Luce-sur-Loire. Cette forte turbidité traduit l'influence du bouchon vaseux estuarien, caractéristique de la Loire.

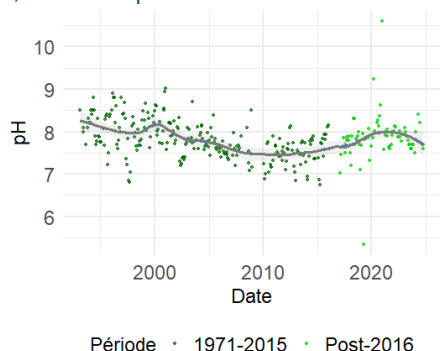


Figure 6 : Evolution du pH à la station de Paimbœuf entre 1994 et 2024 (en gris : courbe moyenne) (source des données : DDTM 44)

Contrairement à Sainte-Luce-sur-Loire, le pH à Paimbœuf reste relativement stable au cours du temps. Entre la période 1971-2015 et la période post-2016, le pH moyen est passé de 7,81 à 7,86, soit une variation négligeable inférieure à 0,1 unité pH.

Cette stabilité du pH s'accompagne toutefois d'améliorations notables de la qualité de l'eau. L'oxygène dissous a augmenté de 11%, passant de 6,74 à 7,50 mg/L. Les concentrations en nutriments ont fortement diminué : les nitrates ont baissé de 17%, le phosphore total de 33%, et les phosphates de 63%. Cette réduction spectaculaire des phosphates témoigne de l'efficacité des politiques de gestion des eaux mises en œuvre (Gamier et al., 2018).

Les matières en suspension restent stables autour de 1,3 g/L, confirmant la persistance du bouchon vaseux dans cette zone de l'estuaire.

Les variations saisonnières du pH à Paimbœuf sont plus modérées qu'à Sainte-Luce-sur-Loire, avec une amplitude de seulement 0,14 unité pH. Les valeurs maximales sont observées au printemps (7,88), tandis que les valeurs minimales se situent en automne (7,74). L'hiver et l'été présentent des valeurs intermédiaires.

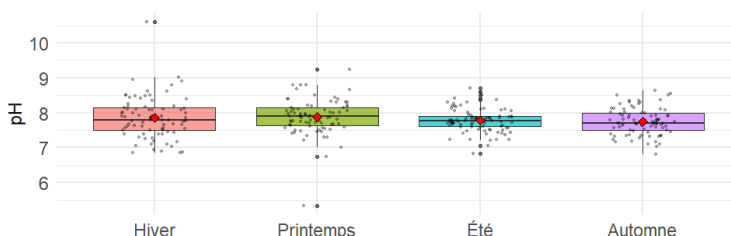


Figure 7 : Variabilité saisonnière du pH à la station de Paimbœuf (saisons météorologiques) (source des données : DDTM 44)

Le cycle saisonnier de l'oxygène dissous est très marqué. En hiver, l'oxygénation atteint son maximum avec 10,4 mg/L, dans un contexte de débits élevés (1420 m³/s) et de températures froides. Le printemps maintient une bonne oxygénation (8,4 mg/L) avec des débits encore importants. L'été se caractérise par une désoxygénation sévère, avec seulement 4,1 mg/L en moyenne, associée à des débits plus faibles. L'automne voit une légère amélioration de l'oxygénation (5,4 mg/L).

Les nitrates suivent le cycle hydrologique, avec des concentrations maximales en hiver (17,6 mg/L) lors des lessivages, et minimales en été (5,8 mg/L). Les matières en suspension restent très élevées toute l'année, avec toutefois des valeurs plus importantes en automne et en hiver (1,6 g/L) qu'en été (0,9 g/L).

L'analyse de l'évolution du pH en fonction du débit montre une relation inverse à ce qui est observé sur la station de Sainte-Luce-sur-Loire. Le pH est minimal lors des étiages et augmente avec le débit.

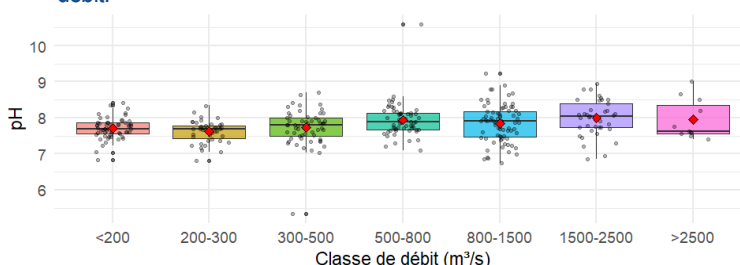


Figure 8 : Variabilité du pH à la station de Paimbœuf, en fonction du débit (source des données : DDTM 44, DREAL pays de la Loire)

À Paimbœuf, les relations entre le pH et les autres paramètres diffèrent nettement de celles observées à Sainte-Luce-sur-Loire. Le pH présente des corrélations positives faibles avec les nitrates, les phosphates et le débit, mais ces relations restent modestes. La corrélation entre pH et oxygène dissous est très faible, suggérant que les processus biologiques de photosynthèse et respiration, qui couplent habituellement ces deux paramètres, ont un impact limité dans cette zone très turbide.

En revanche, d'autres corrélations sont marquées : l'oxygène dissous augmente fortement avec les nitrates et le débit, indiquant que l'oxygénation dépend principalement des apports d'eau douce bien oxygénée lors des crues plutôt que de la production primaire locale.

Le phosphore total est très fortement lié aux matières en suspension, confirmant que le phosphore est principalement sous

forme particulière, adsorbé sur les sédiments du bouchon vaseux (Abril et al., 2003). Les nitrates augmentent également avec les matières en suspension et le débit.

Mesures haute-fréquence à Montoir-de-Bretagne

Le GIP Loire Estuaire a installé un capteur pH, en 2023, sur la station SyVEL de Montoir-de-Bretagne. Le pH est mesuré à une profondeur de 1m sous la surface de l'eau, à une fréquence de 10 minutes.

Les eaux au niveau de Montoir-de-Bretagne présentent un pH proche de la neutralité, voire légèrement basique. Sur la période janvier 2023 – janvier 2026, le pH moyen observé est de 7,77, avec des valeurs instantanées variant entre 6,05 et 9,13. Cette amplitude importante reflète la forte dynamique estuarienne de la station. Cependant, 90% des mesures se situent dans une plage plus restreinte, entre 7,55 et 7,97, témoignant d'une variabilité modérée en conditions normales.

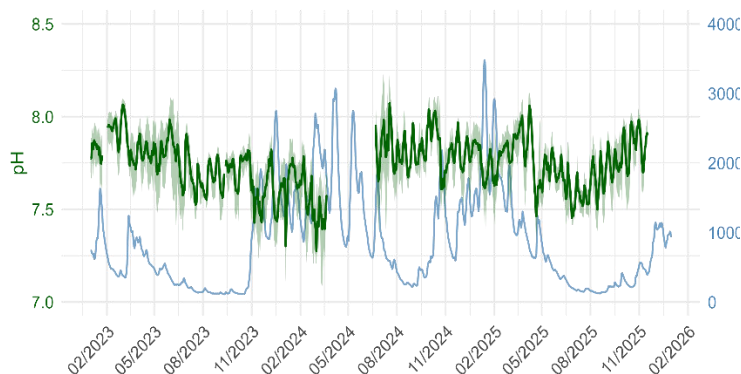


Figure 9 : Evolution du pH entre 2023 et 2025, à la station de Montoir-de-Bretagne (source des données : GIPLE, DREAL Pays de la Loire)

Il convient de noter qu'une vérification du capteur réalisée après 18 mois de fonctionnement a révélé une dérive de 2% au point de calibration pH 7. En l'absence de données permettant de dater le début de cette dérive, les valeurs absolues présentées doivent être considérées avec une incertitude non négligeable. Néanmoins, les variations relatives (tendances temporelles, amplitudes de variation) demeurent fiables et exploitables pour l'analyse des dynamiques du pH à l'embouchure de la Loire.

Influence du cycle de marée

La station de Montoir-de-Bretagne, située à l'extrême aval de l'estuaire, se trouve sous influence marine dominante. Le pH varie selon le cycle de marée, mais de manière contre-intuitive : le pH est légèrement plus acide pendant les vives-eaux (pH moyen = 7,72) que pendant les mortes-eaux (pH moyen = 7,78), soit une différence de 0,06 unité pH.

Ce phénomène s'explique par les processus estuariens complexes qui se déroulent à l'embouchure : La remobilisation intense des sédiments lors des forts courants de vives-eaux libère des composés acidifiants issus de la décomposition de la matière organique accumulée dans les sédiments.

Le brassage vertical des masses d'eau ramène en surface des eaux profondes potentiellement plus acides, enrichies en CO_2 par la respiration benthique.

Le temps de résidence plus court des masses d'eau pendant les vives-eaux limite l'équilibration avec l'atmosphère et le dégazage du CO_2 .

À l'inverse, les périodes de mortes-eaux favorisent une stratification des masses d'eau et une meilleure équilibration chimique avec l'atmosphère, permettant au pH de s'élever légèrement. La production primaire phytoplanctonique, qui consomme du CO_2 et fait augmenter le pH, peut également être plus efficace dans ces conditions plus calmes.



Figure 10 : Distribution du pH en fonction des marées (source des données : GIPLE, SHOM)

Variations saisonnières

Une variabilité saisonnière modérée mais significative est observée sur les données pluriannuelles. Le pH présente des valeurs légèrement plus élevées en hiver (pH moyen = 7,80) qu'en été (pH moyen = 7,73), soit une différence de 0,07 unité pH. Le printemps et l'automne affichent des valeurs intermédiaires (pH moyen = 7,77).

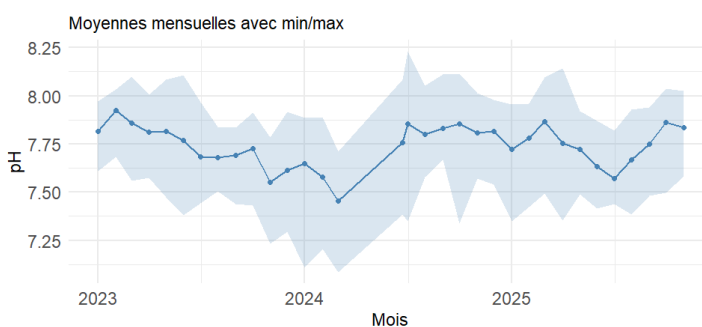


Figure 11 : Variabilité saisonnière du pH à la station de Montoir-de-Bretagne (source des données : GIPLE)

Cette légère acidification estivale peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

Une activité métabolique plus intense en période chaude (respiration bactérienne, décomposition de la matière organique) qui produit du CO_2 et acidifie les eaux.

Des températures plus élevées qui, bien qu'elles diminuent la solubilité du CO₂, peuvent favoriser les processus biologiques acidifiants.

Des conditions d'étiage qui, même à l'embouchure, peuvent légèrement modifier les équilibres chimiques.

En hiver, l'activité biologique réduite, les températures plus fraîches favorisant la solubilité des gaz, et les apports d'eau douce lors des crues contribuent à maintenir un pH légèrement plus élevé.

Influence du débit de la Loire

L'analyse statistique révèle une corrélation très faible entre le pH et le débit de la Loire (coefficient de corrélation de Spearman $\rho = 0,022$). Bien que cette relation soit statistiquement significative ($p < 0,001$), elle indique que le débit n'explique que moins de 0,1% de la variabilité du pH observée à Montoir-de-Bretagne.

Ce résultat confirme que la station, positionnée à l'aval de l'estuaire, est sous influence marine prédominante. Les processus estuariens locaux — marée, remobilisation sédimentaire, activité biologique, mélanges des masses d'eau — jouent un rôle beaucoup plus important que les apports d'eau douce de la Loire dans le contrôle du pH à cette station. Seules les crues exceptionnelles semblent pouvoir influencer temporairement le pH en apportant des eaux douces jusqu'à l'embouchure.

Gradient spatial

Le pH moyen décroît de l'amont vers l'aval : Bellevue (Sainte-Luce-sur-Loire) présente le pH le plus élevé (8,1). Paimboeuf (7,8) et Montoir-de-Bretagne (7,8) sont plus acides. Cette diminution progressive de 0,3 unité pH de l'amont vers l'aval s'accompagne d'une transformation des caractéristiques physico-chimiques de l'eau.

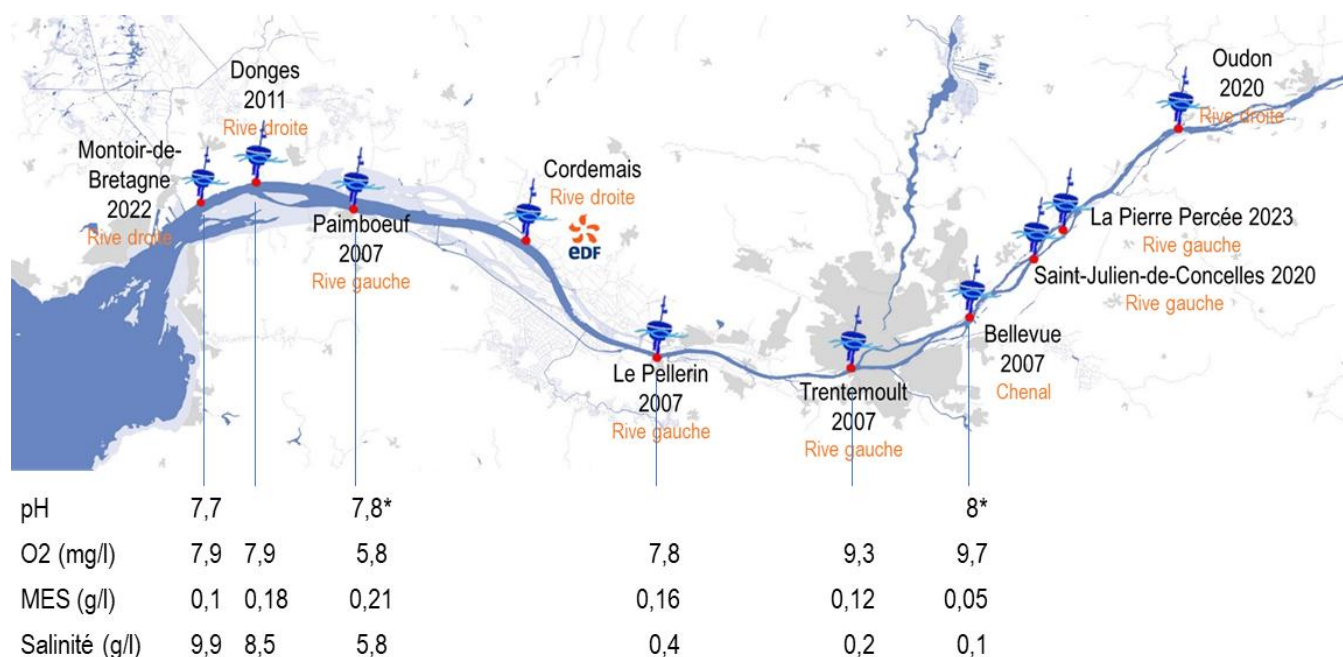
L'oxygène dissous suit une tendance similaire, passant de 10,3 mg/L à Bellevue à 7,0 mg/L à Paimboeuf, traduisant une dégradation de l'oxygénation vers l'aval. Les matières en suspension présentent un gradient inverse : très faibles à Bellevue (0,6 g/L), elles deviennent très élevées à Paimboeuf (1,4 g/L), témoignant de la présence du bouchon vaseux dans la zone médiane de l'estuaire. Sous l'influence des apports océaniques, le bouchon vaseux est moins concentré au niveau de Montoir-de-Bretagne, entraînant une meilleure oxygénation des eaux.

Evolutions temporelles contrastées

Les stations présentent des évolutions temporelles distinctes. À Bellevue, le pH a diminué de 0,27 unité entre 1971-2001 et la période post-2013, soit une baisse de 3,3%. Cette acidification progressive s'observe malgré l'amélioration générale de la qualité de l'eau, avec notamment une forte réduction des phosphates.

À Paimboeuf, le pH reste remarquablement stable sur l'ensemble de la période (1994-2024), avec une variation inférieure à 0,1 unité pH entre 1994-2015 et post-2016. Cette stabilité s'accompagne d'une amélioration marquée de la qualité de l'eau : augmentation de l'oxygène dissous de 11%, réduction des nitrates de 17%, et forte diminution des phosphates de 63%.

Analyse de l'évolution du pH dans l'estuaire de la Loire



Moyenne sur la période 2023-2025 (source des données : réseau SYVEL, GIP Loire Estuaire)

* Mesures issues des réseaux basse fréquence (DDTM 44, Département 44, AELB)

Pour Montoir-de-Bretagne, le recul des données ne permet pas encore d'évaluer une tendance long terme, le capteur n'étant déployé que depuis début 2023.

Variabilité saisonnière selon les stations

L'amplitude des variations saisonnières du pH décroît de l'amont vers l'aval : elle atteint 0,59 unité pH à Bellevue, se réduit à 0,14 unité à Paimboeuf, et n'est plus que de 0,07 unité à Montoir-de-Bretagne. Cette atténuation progressive reflète le changement des processus de contrôle du pH le long de l'estuaire.

Les périodes de pH maximal diffèrent selon les stations, témoignant de processus saisonniers distincts. À Bellevue, le pH est maximal en été, en lien avec la production primaire facilitée par la clarté de l'eau. À Paimboeuf, le maximum se situe au printemps, période de transition hydrologique. À Montoir-de-Bretagne, les valeurs les plus élevées s'observent en hiver, reflétant les dynamiques marines et sédimentaires propres à l'embouchure.

Facteurs de contrôle du pH

Les corrélations entre le pH et les autres paramètres révèlent des facteurs de contrôle radicalement différents selon la position dans l'estuaire.

À Bellevue, le pH diminue lorsque les nitrates augmentent et lorsque le débit s'élève, témoignant de l'influence des processus liés aux apports du bassin versant. La forte corrélation négative avec les nitrates suggère l'importance des processus de nitrification ou des apports d'eaux riches en composés azotés lors des lessivages.

À Paimboeuf, ces relations s'inversent ou deviennent nulles. Le pH augmente légèrement avec le débit et les nitrates, reflétant probablement un effet de dilution des rejets urbains et industriels. Les corrélations restent toutefois faibles, suggérant que d'autres processus, liés notamment au bouchon vaseux, jouent un rôle important.

À Montoir-de-Bretagne, le débit n'a pratiquement aucune influence sur le pH, confirmant la domination des processus marins et tidaux sur les apports continentaux à l'embouchure.

Le réseau SYVEL a été développé et est exploité par le GIP Loire Estuaire, via le financement de ses membres et avec le concours financier de l'AELB (2007 à 2019), de l'Europe (2007 à 2020) et de l'Etat, à travers un contrat DSIL (Dotation de Soutien à l'Investissement Local) (2019 - 2020).

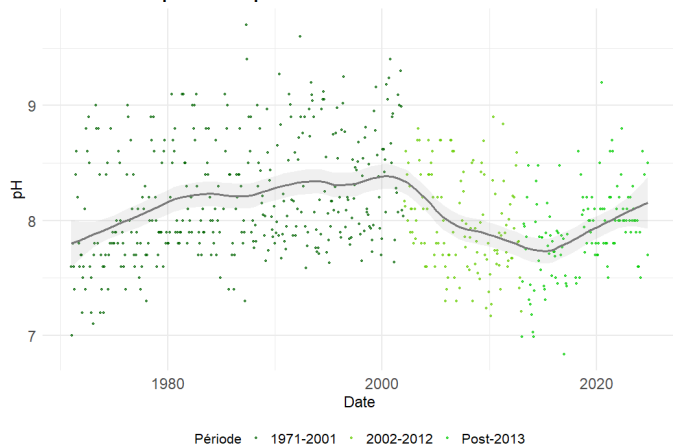
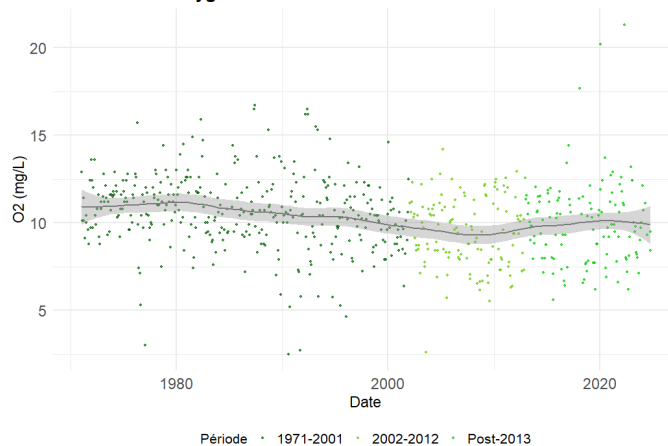
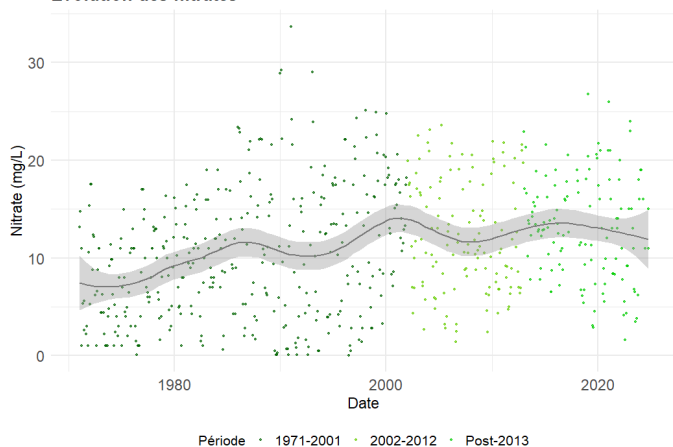
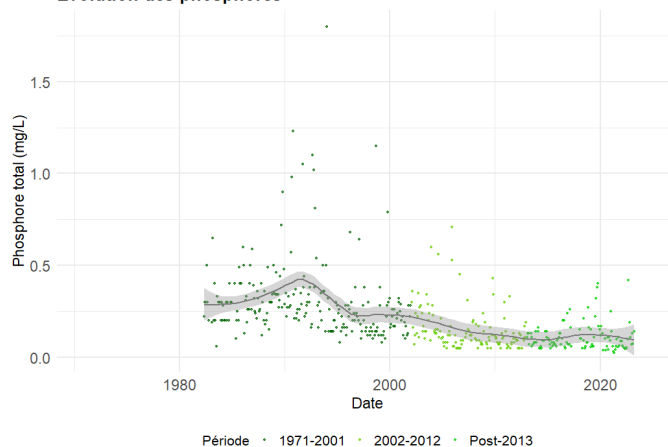
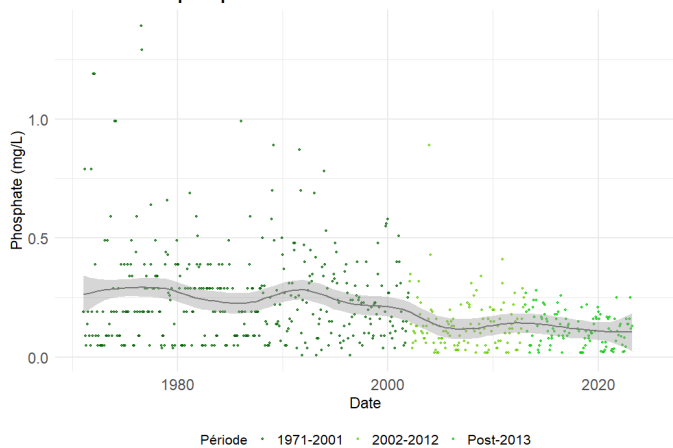
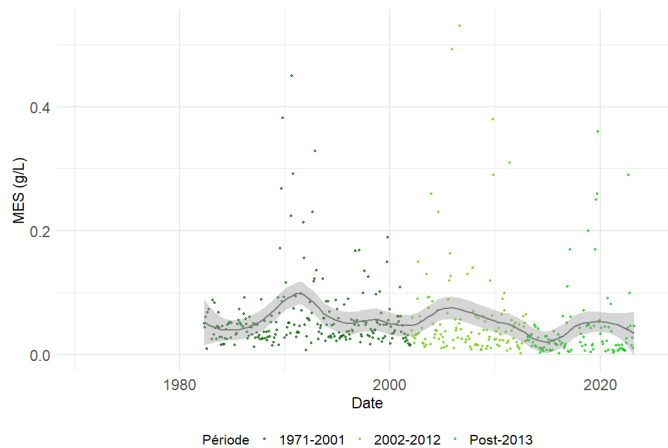
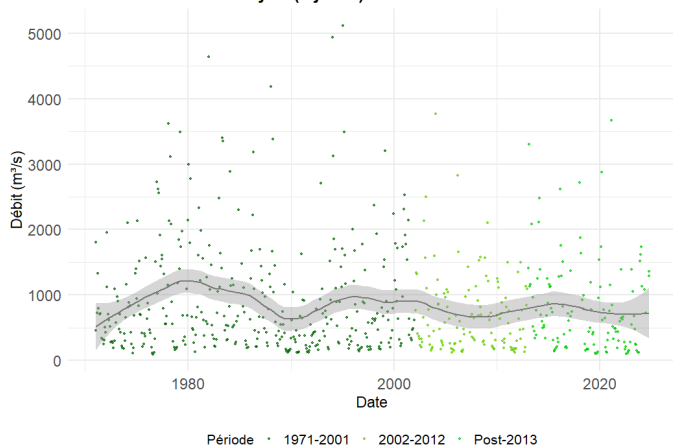


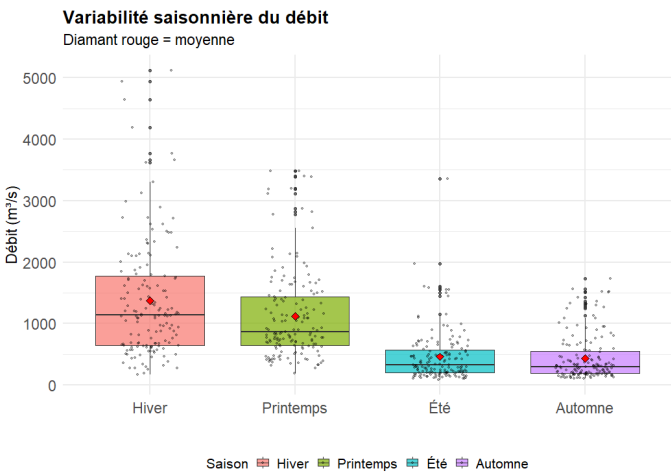
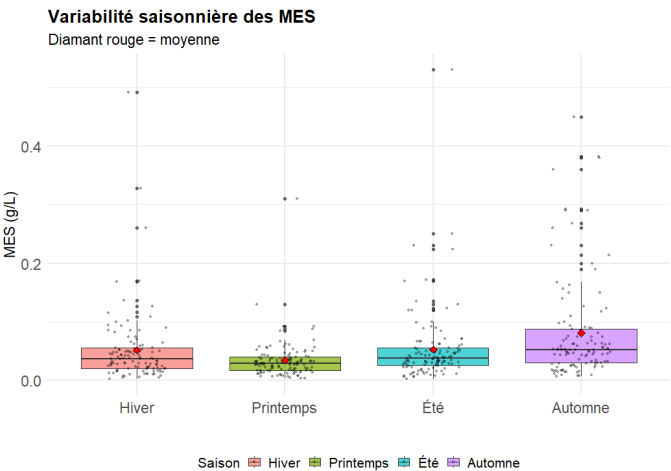
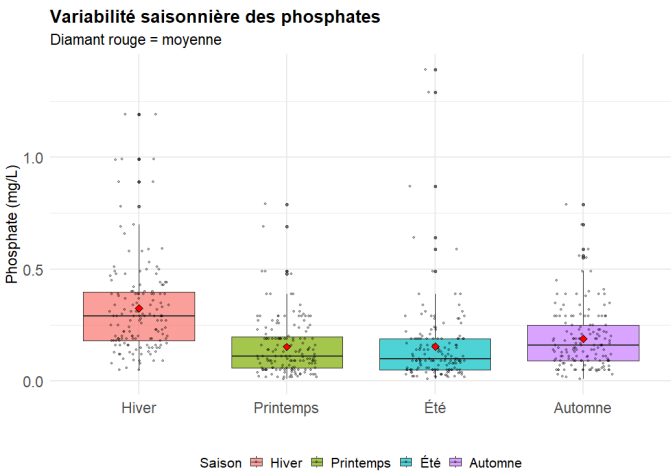
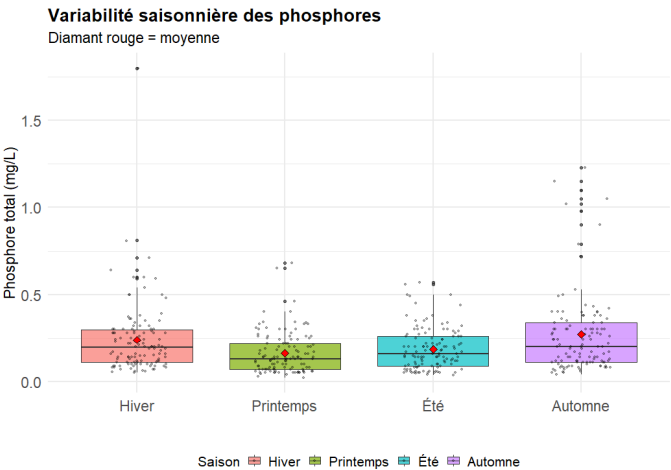
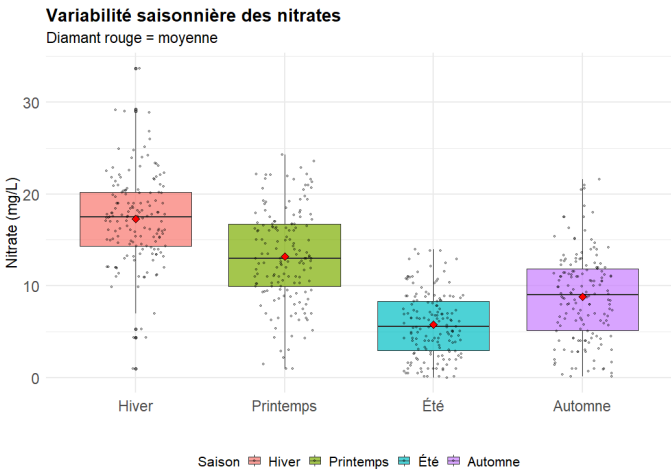
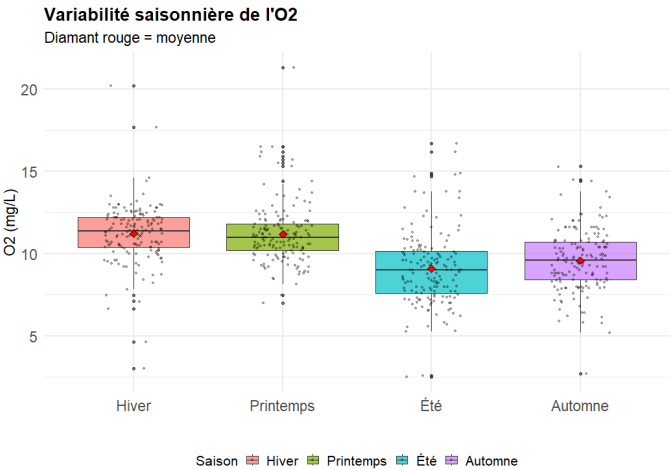
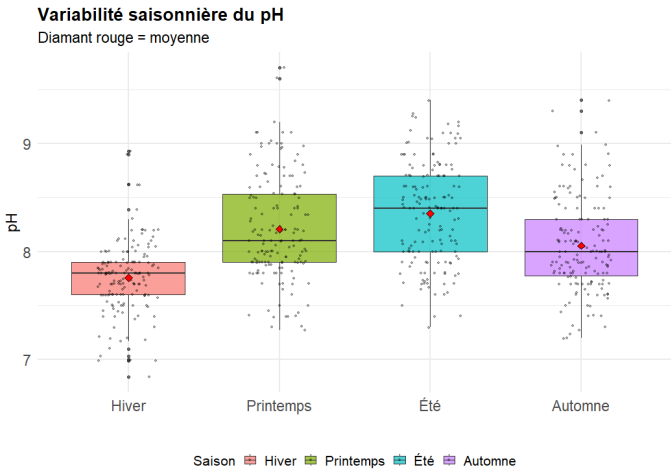
Références :

Abril, G., Etcheber, H., Delille, B., & Frankignoulle, M. (2003). Carbonate dissolution in the turbid and eutrophic Loire estuary. *Marine Ecology Progress Series*, 259, 129-138.

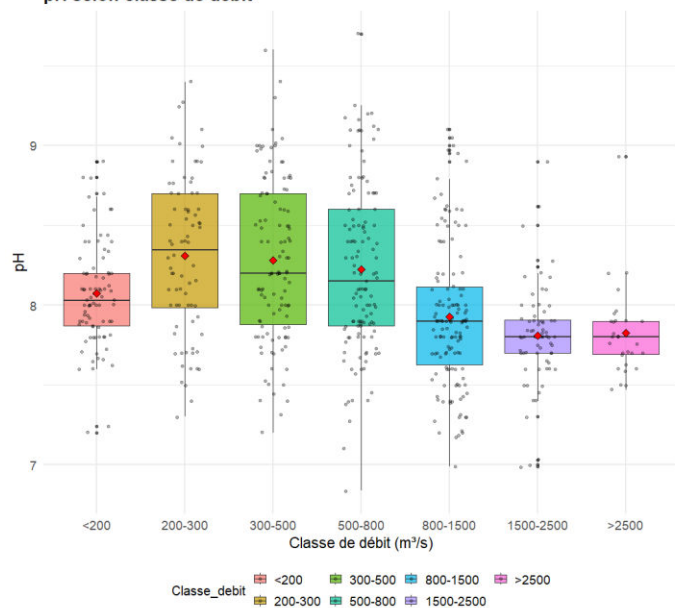
Garnier, J., Ramarson, A., Billen, G., Théry, S., Thiéry, D., Thieu, V., ... & Moatar, F. (2018). Nutrient inputs and hydrology together determine biogeochemical status of the Loire River (France): Current situation and possible future scenarios. *Science of the Total Environment*, 637, 609-624.

Données complémentaires à la station de Sainte-Luce-sur Loire (Source des données : AELB, Département Loire Atlantique, DREAL Pays de la Loire)

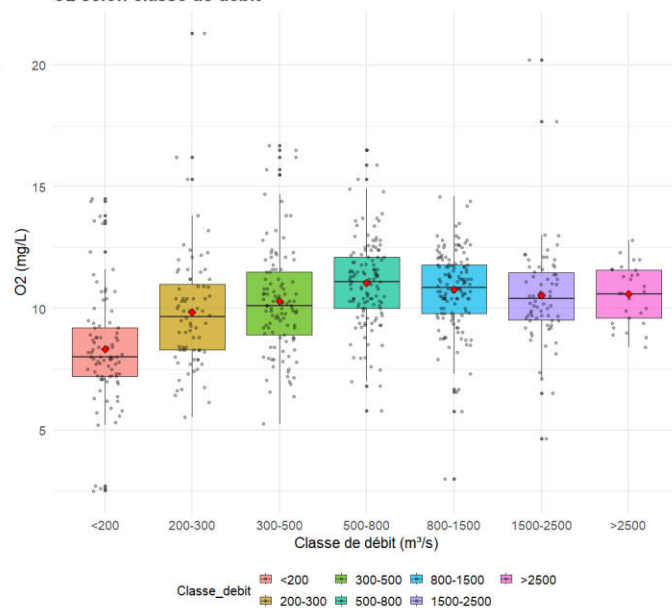
Évolution temporelle du pH**Évolution de l'oxygène dissous****Évolution des nitrates****Évolution des phosphores****Évolution des phosphates****Évolution des MES****Évolution du débit moyen (7 jours)**



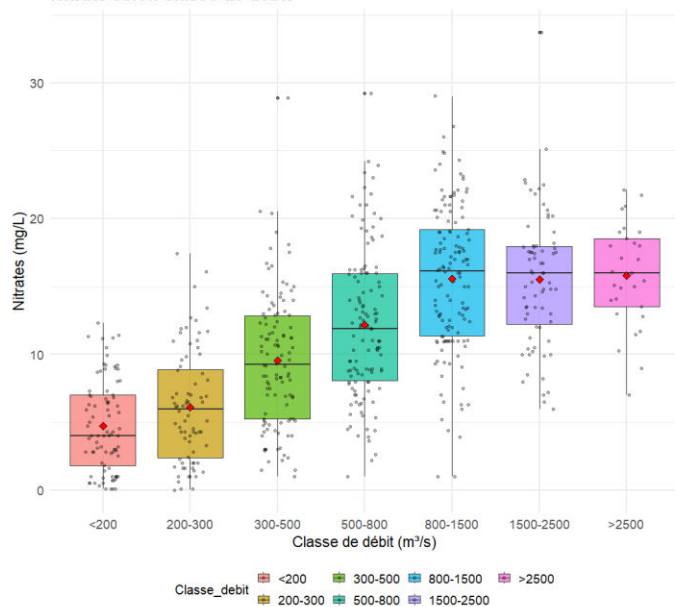
pH selon classe de débit



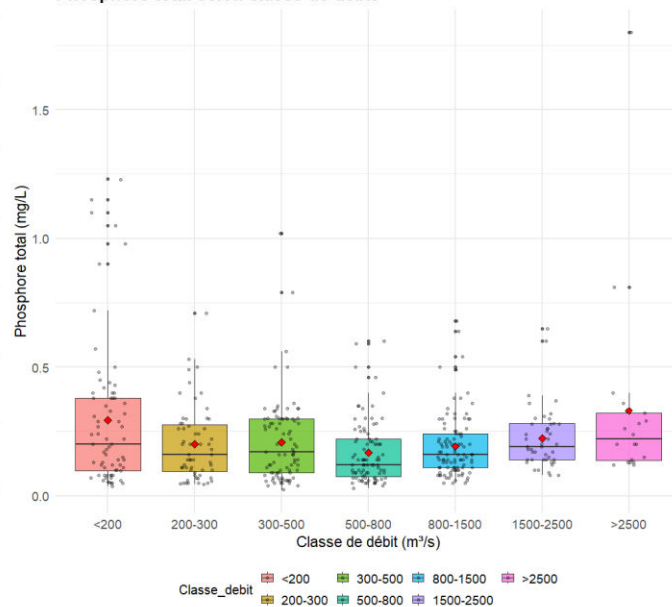
O2 selon classe de débit



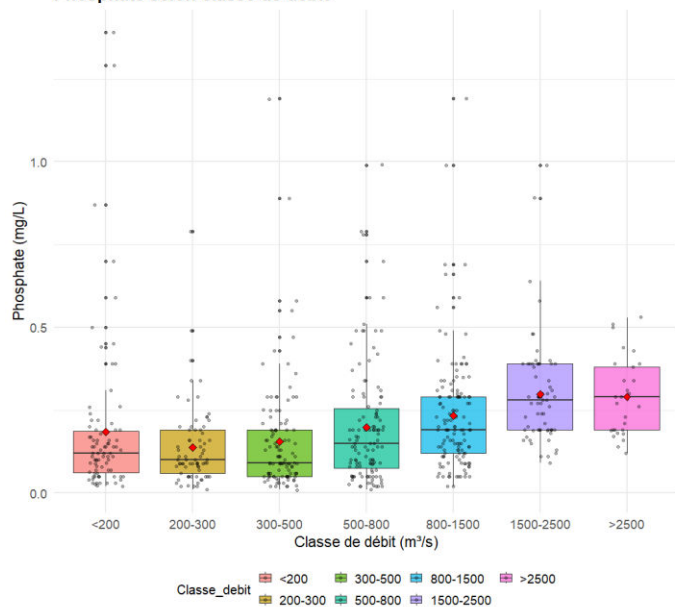
Nitrate selon classe de débit



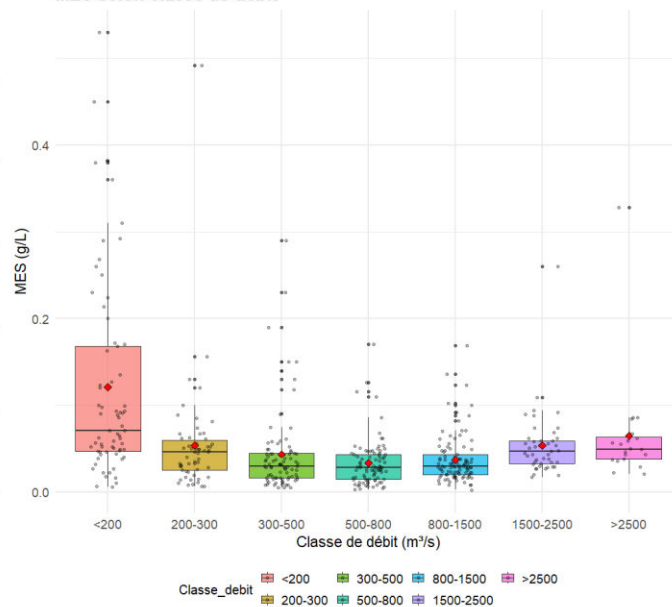
Phosphore total selon classe de débit



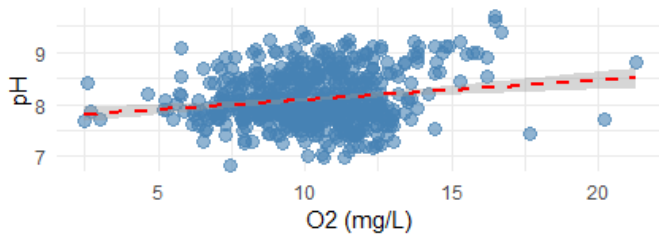
Phosphate selon classe de débit



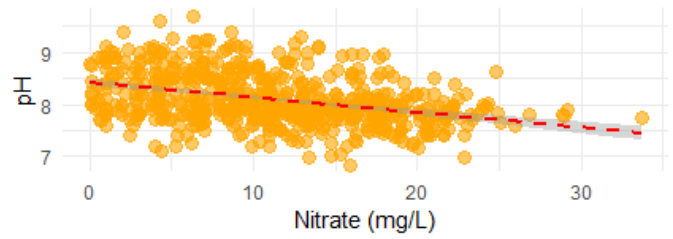
MES selon classe de débit



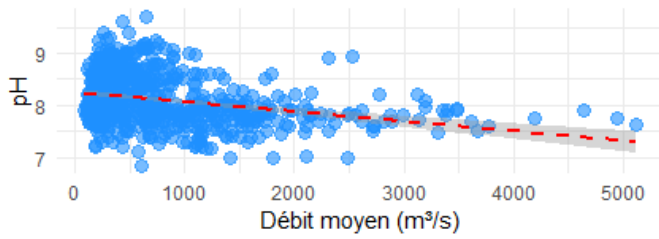
Relation pH - O2



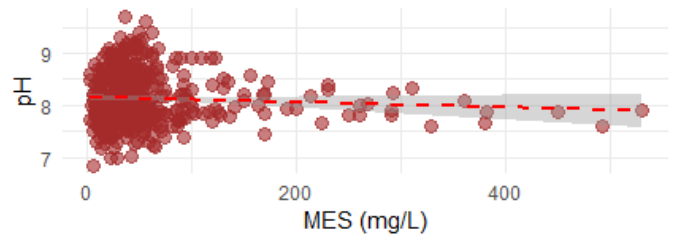
Relation pH - Nitrate



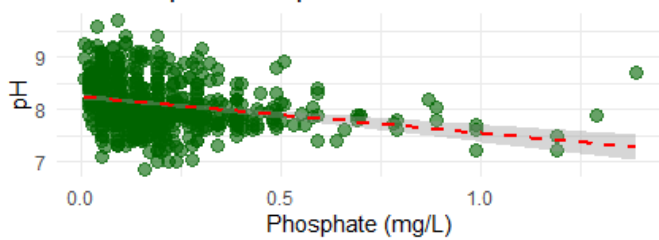
Relation pH - Débit



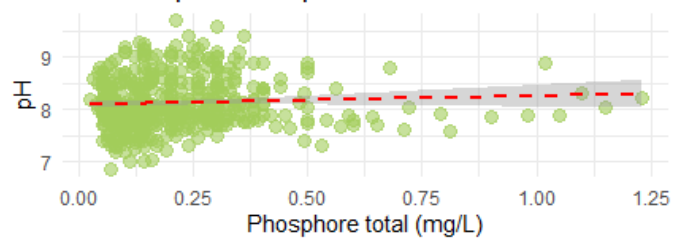
Relation pH - MES



Relation pH - Phosphate

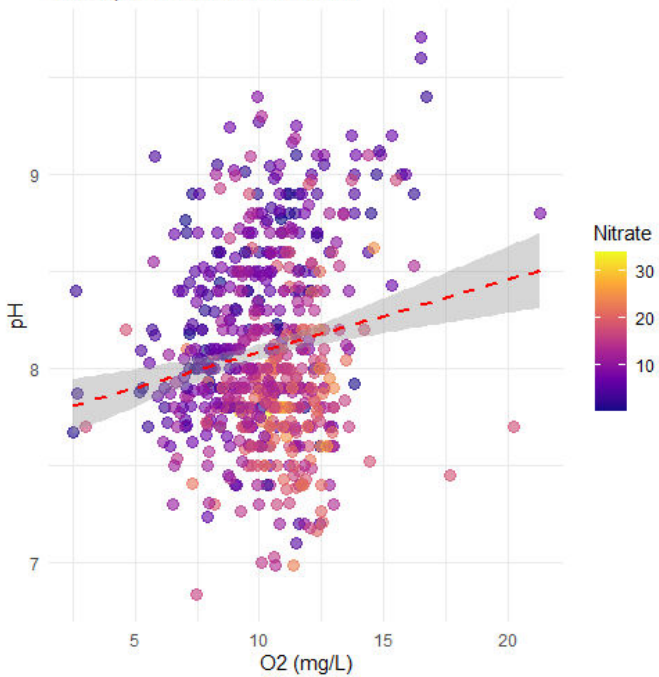


Relation pH - Phosphore



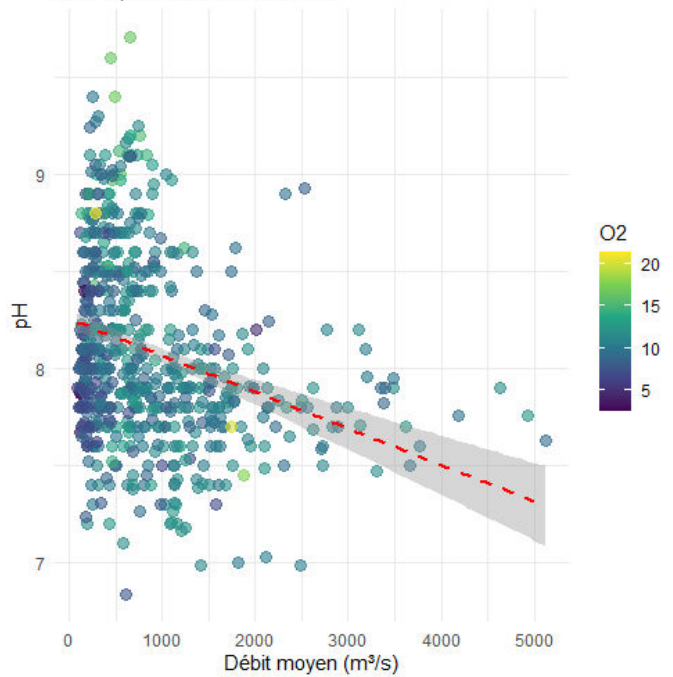
Relation pH - O2

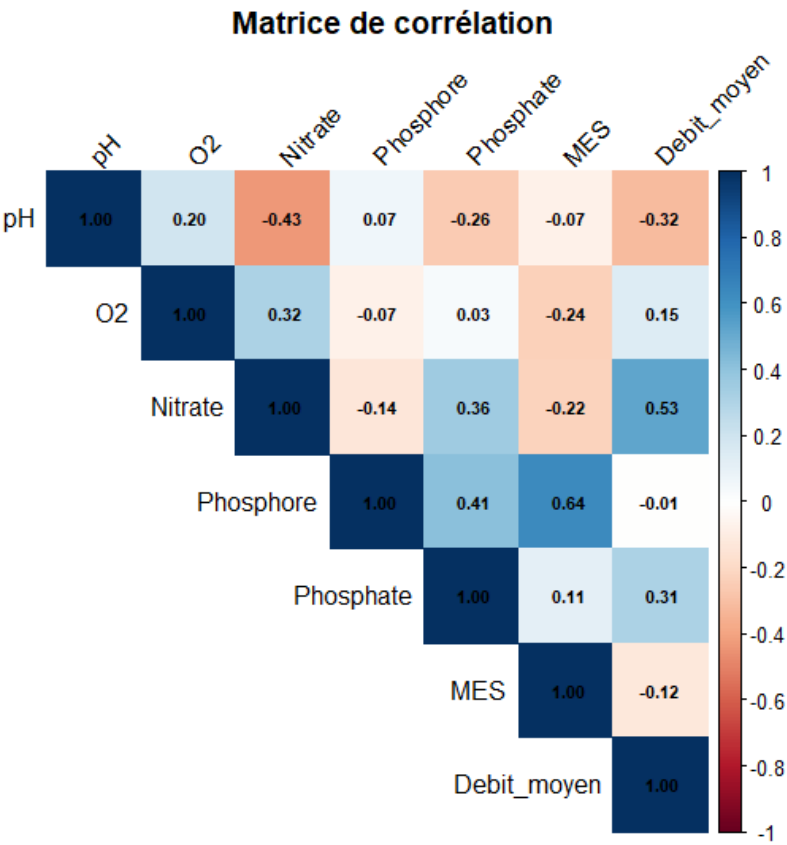
Coloré par concentration en nitrate



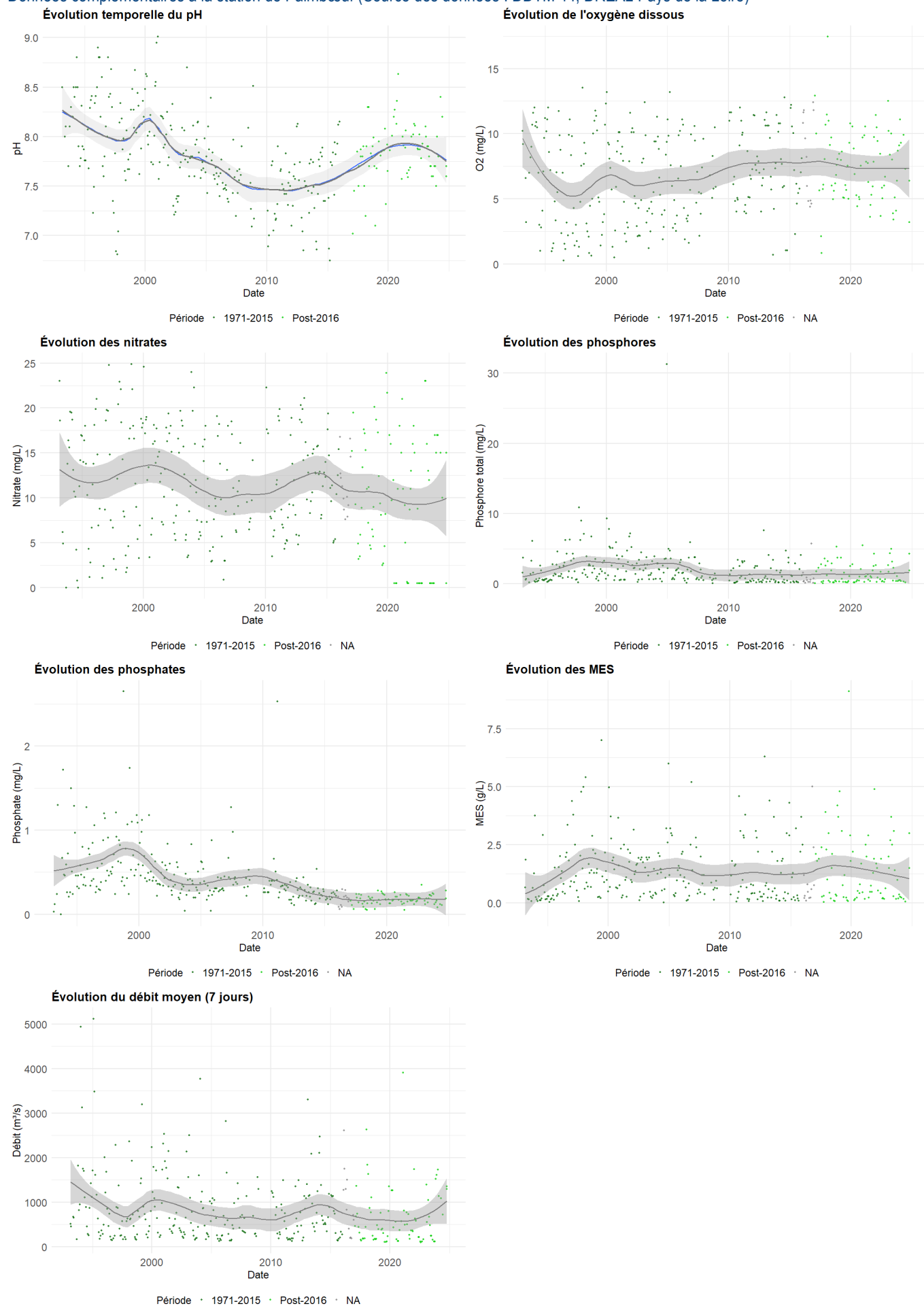
Relation pH - Débit

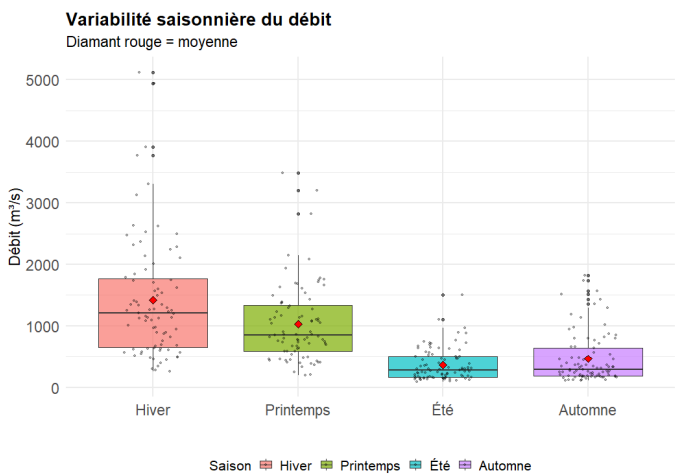
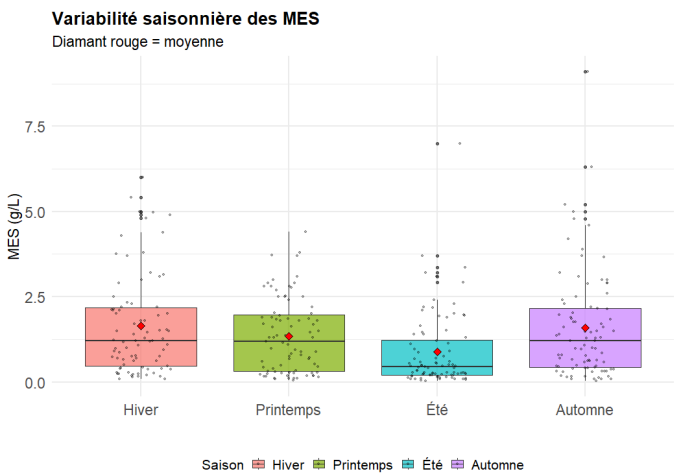
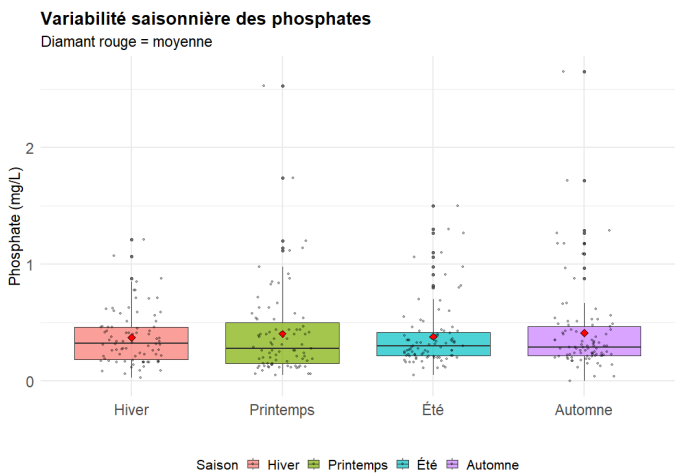
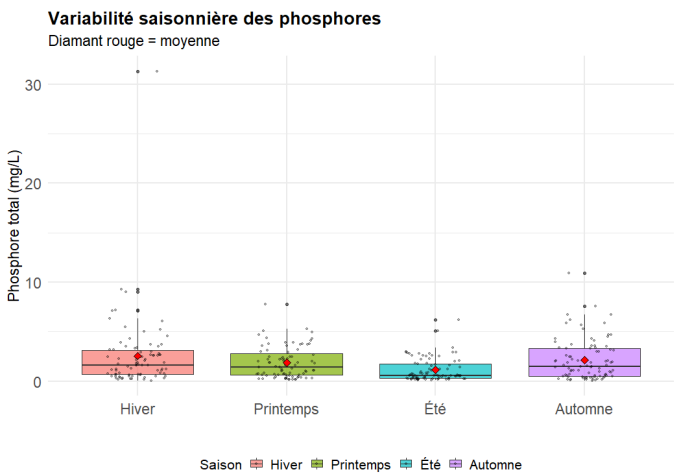
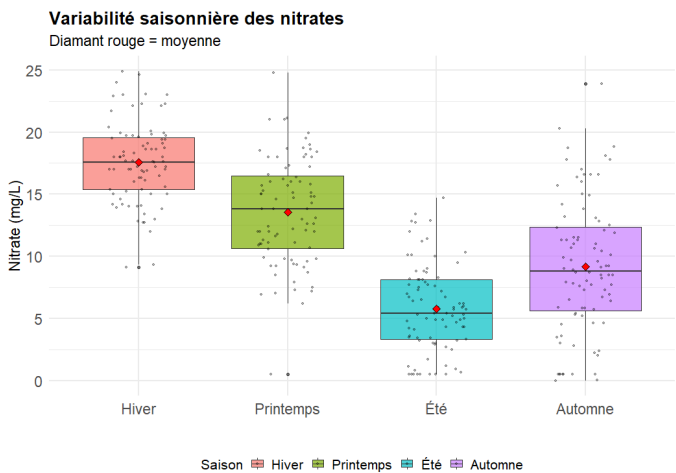
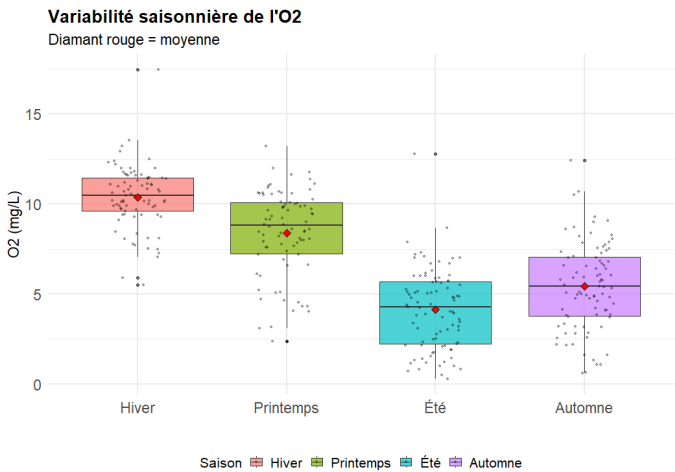
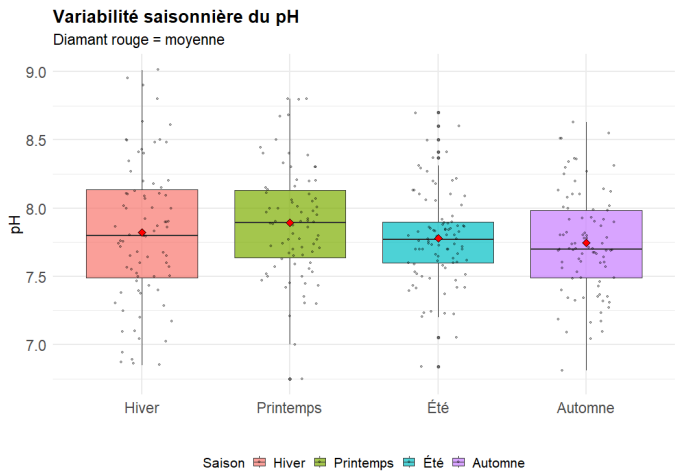
Coloré par concentration en O2

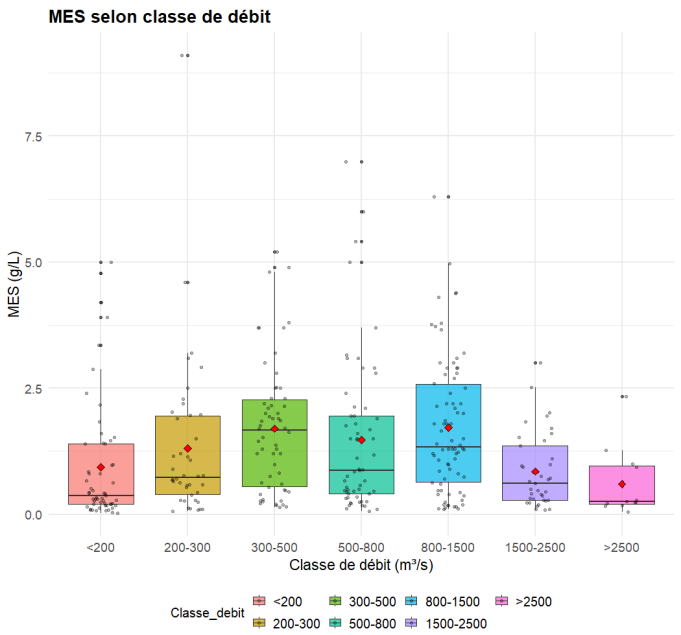
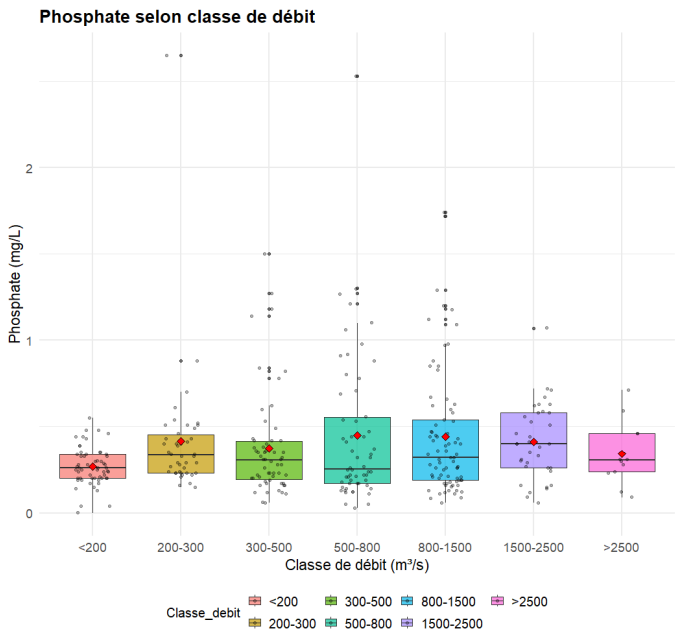
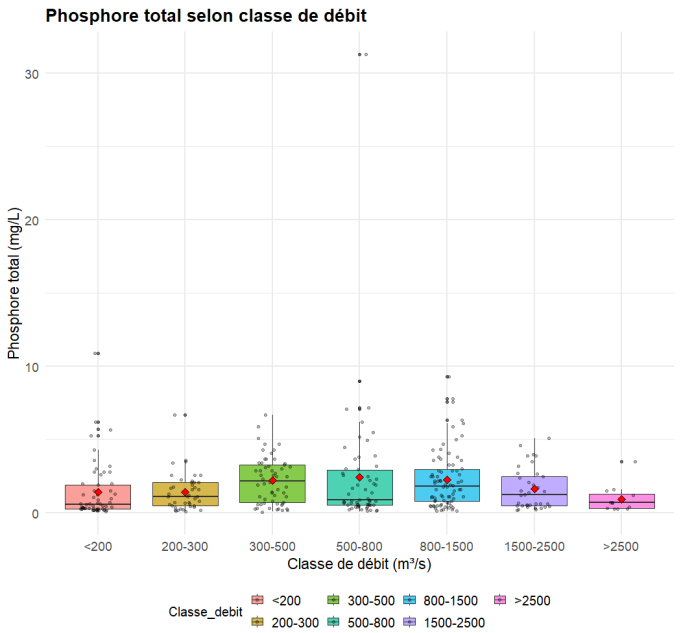
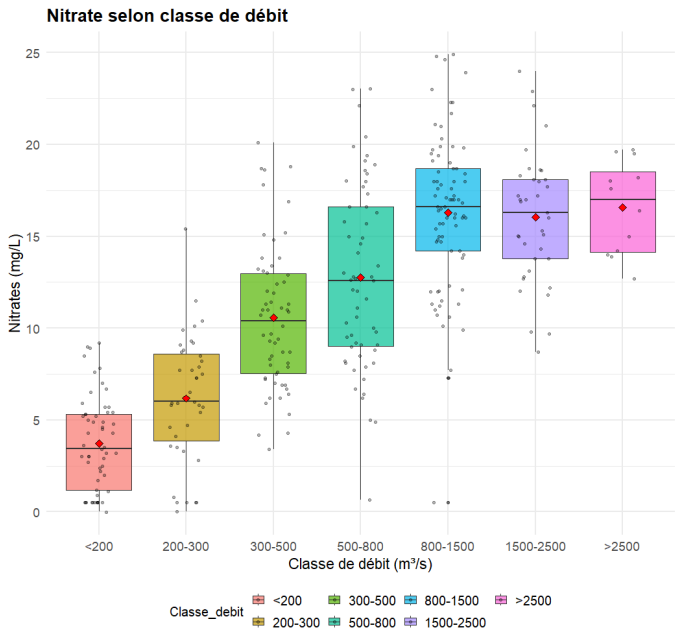
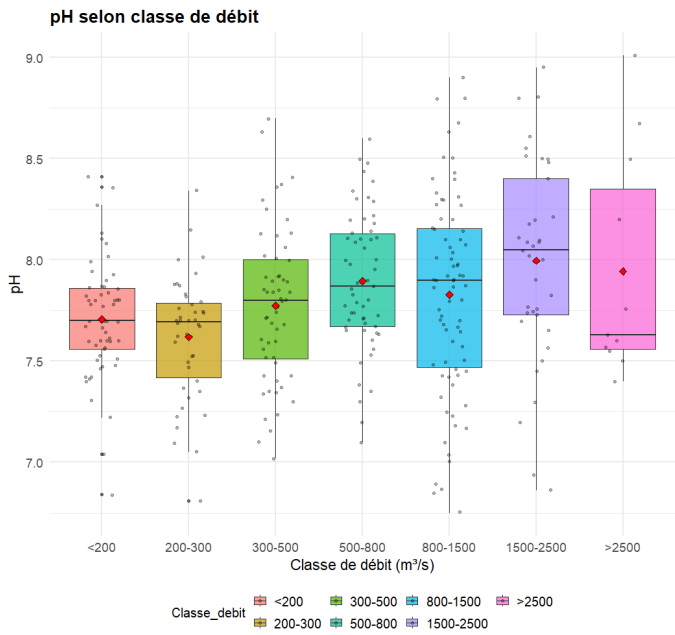




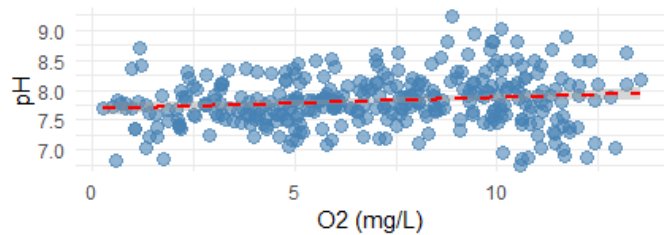
Données complémentaires à la station de Paimbœuf (Source des données : DDTM 44, DREAL Pays de la Loire)



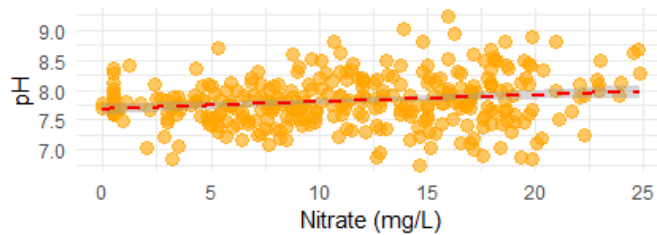




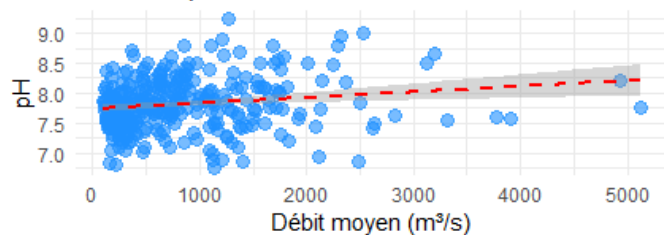
Relation pH - O2



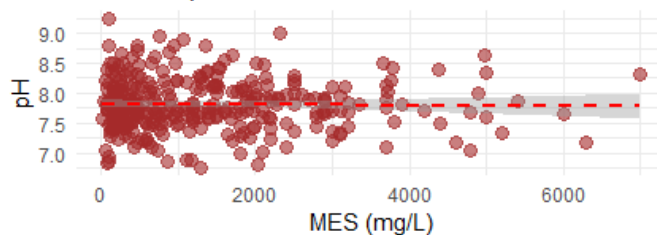
Relation pH - Nitrate



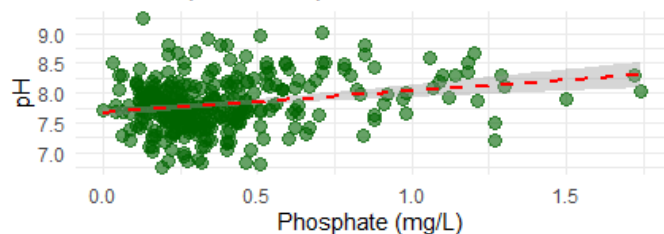
Relation pH - Débit



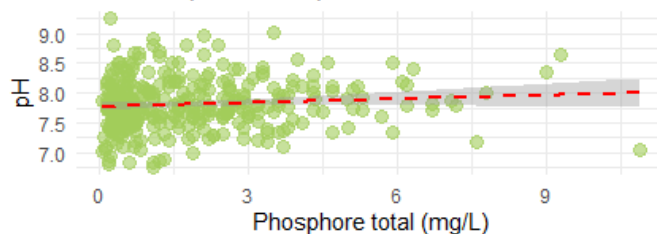
Relation pH - MES



Relation pH - Phosphate

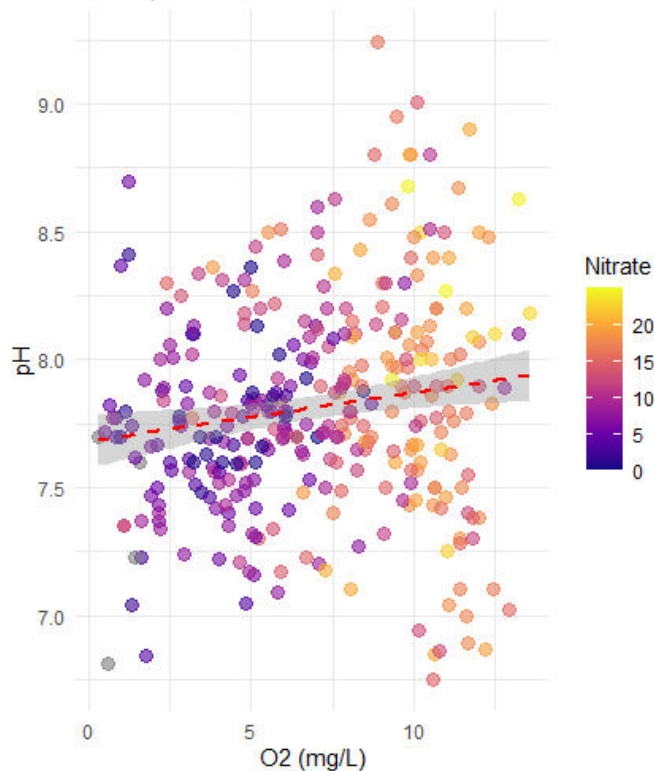


Relation pH - Phosphore



Relation pH - O2

Coloré par concentration en nitrate



Relation pH - Débit

Coloré par concentration en O2

