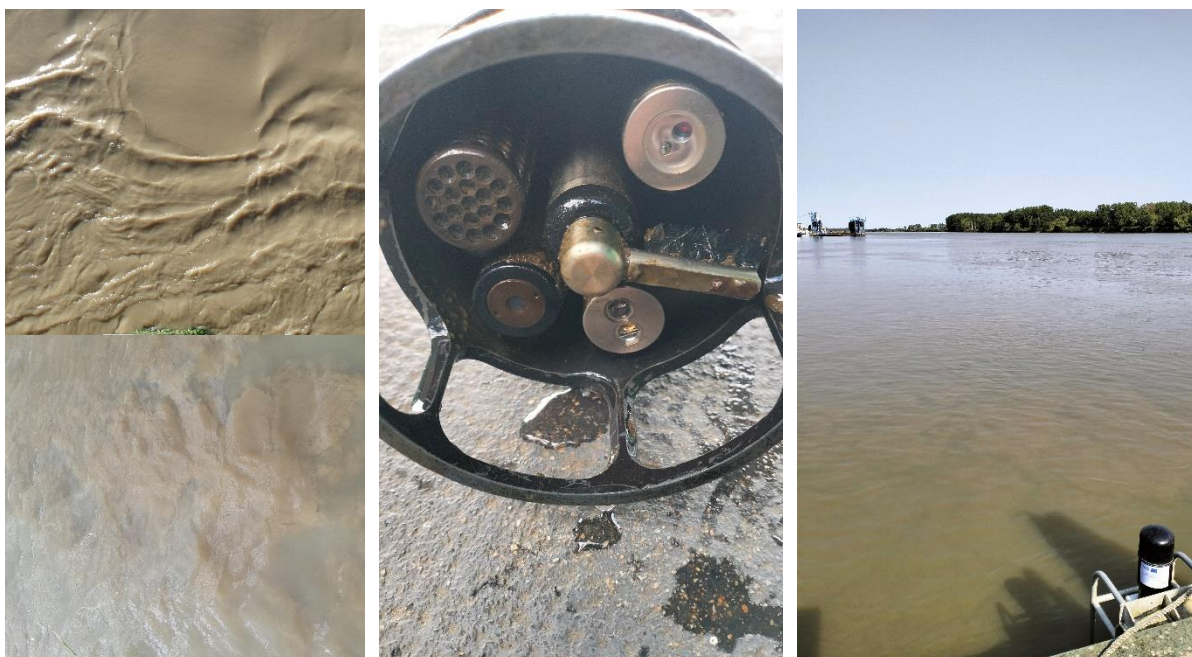


GUIDE TECHNIQUE SUR LA MESURE DE TURBIDITÉ ET LA CONCENTRATION EN MATIÈRES EN SUSPENSION

PRÉCISIONS MÉTHODOLOGIQUES ET APPLICATION AU RÉSEAU DE MESURE HAUTE FRÉQUENCE SyVEL

Version Avril 2024



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



Établissement public du ministère
chargé du développement durable

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.

Table des matières

Préambule	3
1 Introduction à la turbidité	3
2 Les principes de mesure	3
2.1 Norme NF EN ISO 7027-1 : Mesure de la turbidité – néphélogéométrie	4
2.2 Limites de la mesure de turbidité.....	6
3 Application au réseau SyVEL	7
3.1 Description du réseau SyVEL	7
3.2 Type de turbidimètres avant l'évolution amorcée en 2018.....	8
3.3 Type de sondes et turbidimètres – évolution progressive depuis 2018	8
4 Corrélation en MES.....	9
4.1 Relation turbidité-MES en laboratoire	9
4.1.1 Station de Bellevue.....	10
4.1.2 Station de Thouaré/Saint-Julien	11
4.1.3 Station de Pierre Percée	12
4.1.4 Station d'Oudon	13
4.2 Relation turbidité-MES in situ	14
4.2.1 Station de Bellevue.....	14
4.2.2 Station de Thouaré/Saint-Julien	15
4.2.3 Station de Pierre Percée	15
Conclusions :	16
Principales références bibliographiques	19

Préambule

Le GIP Loire Estuaire dispose d'un réseau de mesure haute fréquence SyVEL – Système de Veille dans l'Estuaire de la Loire - depuis décembre 2006, implanté dans l'estuaire de la Loire. Ce réseau sert à suivre plusieurs paramètres estuariens, dont la turbidité, afin de pouvoir caractériser la dynamique du bouchon vaseux.

Depuis son installation, le réseau SyVEL a évolué aussi bien en nombre de stations, qu'en extension, qu'en technologie de mesure utilisée. Au fil de ces modifications, la relation turbidité - Matières En Suspension (MES) a été réétudiée.

Ce guide technique récapitule les relations turbidité - MES pour chaque station selon le type de sonde et donc de capteur (turbidimètre) utilisé. En effet, la spécificité de la mesure de turbidité oblige à définir cette loi selon le type de turbidimètre, sa calibration et le type de MES mesurées. Autrement dit, une même valeur de turbidité peut correspondre à des concentrations en MES totalement différentes. De plus, il est nécessaire de bien préciser comment est fait le choix de l'unité de mesure, certains turbidimètres permettent un affichage en NTU ou NFU équivalents, dont il est impératif de bien connaître les limites.

Le GIP Loire Estuaire a donc rassemblé les informations nécessaires pour détailler comment ses mesures de turbidité sont transformées en MES à l'occasion de l'établissement des nouvelles relations pour ses stations situées à l'amont de Nantes (Bellevue, Thouaré/Saint-Julien, Pierre Percée et Oudon). Des informations proviennent également d'une recherche bibliographique. Elle s'appuie sur les documents normatifs liés à la mesure de turbidité, les études scientifiques, les documentations techniques des fournisseurs. Ce guide sera donc actualisé lorsque les relations turbidité MES seront modifiées.

1 Introduction à la turbidité

La turbidité d'une eau est la mesure de son aspect plus ou moins trouble. Elle s'appuie sur les propriétés optiques de l'eau, qui permettent à la lumière d'être déviée ou absorbée par des particules. Les matières présentes dans l'eau sous forme de particules proviennent d'argile, de composés organiques ou inorganiques, de plancton, de micro-organismes... La turbidité dépend de la concentration en matières en suspension (MES) de l'échantillon et des caractéristiques optiques et géométriques des particules.

2 Les principes de mesure

Les capteurs mesurent des turbidités. Plusieurs unités peuvent être utilisées, en fonction des capteurs et des méthodes de mesures.

La turbidité traduit la présence de matières en suspension dans l'eau (matières organiques, matières minérales...). **La valeur de la turbidité dépend du type de capteur utilisé, de la forme, de la taille, de la composition et de la quantité des particules solides contenues dans l'eau.** C'est une mesure de l'influence de ces particules sur la lumière.

Deux sources lumineuses peuvent être utilisées. Elles correspondent à des normes de mesure différentes : la lampe au tungstène émettant une lumière blanche (norme EPA 180.1) et la LED émettant dans l'infrarouge à une longueur d'onde de 860 nm (norme ISO 7027). Les mesures de turbidité sont comparables entre elles **seulement si** elles correspondent à la même norme et au même capteur.

2.1 Norme NF EN ISO 7027-1 : Mesure de la turbidité – néphélogétrie

La turbidité est une mesure de la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes.

Principes généraux :

Un échantillon d'eau colorée par des substances dissoutes est un système homogène qui atténue uniquement le rayonnement qui le traverse.

Les substances dissoutes atténuent le rayonnement incident.

Les particules insolubles diffusent le rayonnement de façon inégale dans toutes les directions.



Figure 1 : sonde SAMBAT à gauche et sonde WIMO à droite, avant nettoyage

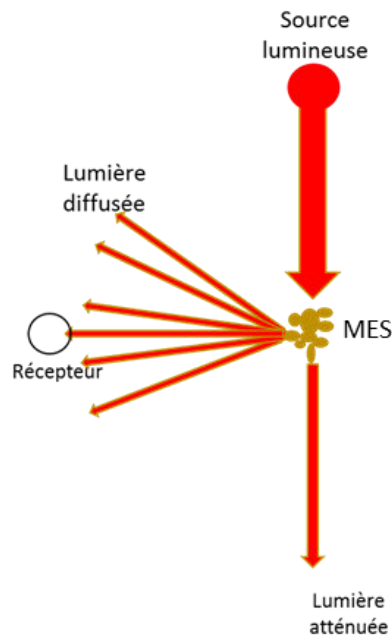


Schéma de principe de la mesure dans le turbidimètre avec l'incidence de la lumière sur les particules en suspension dans l'eau

Il existe deux méthodes de quantification :

- La **néphélogétrie** : mesure du rayonnement diffus. Applicable aux eaux de faible turbidité. La mesure en néphélogétrie est contrainte par l'atténuation du rayonnement, pour les très fortes concentrations de substances
Exprimées en NTU
Pour des valeurs comprises entre 0,05 NTU et 400 NTU
Peut être utilisée pour des eaux de plus forte turbidité, selon les caractéristiques de l'appareil.
- La **turbidimétrie** : mesurage de l'atténuation du rayonnement. Applicable aux eaux de forte turbidité.
Exprimées en FAU
Pour des valeurs entre 40 et 4000 FAU

Pour la préparation des solutions mères de calibration, il existe dans le commerce des solutions de formazine à 4000 NTU.

L'équivalence numérique entre les unités de turbidité néphélogétrie (NTU) et les unités néphélogétrie formazine (NFU) est vraie pour les étalons de formazine préparés.

Principe de mesure : mesurage du rayonnement diffus (néphélométrie)

Appareil : néphélomètre

Largeur bande spectrale : 830 – 890 nm

Angle mesure : 90°

Angle d'ouverture : 20° à 30 ° dans l'échantillon

Compléments :

L'information fournie par le turbidimètre n'est pas donnée en unité de lumière transmise ou diffusée, mais en concentration d'un matériau de référence en suspension (la formazine lors de la calibration ou en concentration équivalente d'un matériau de référence dans le milieu naturel). **L'unité de mesure dépend de l'étalon utilisé.**

Si les étalons sont en formazine, NTU = NFU, pour les valeurs comprises dans la gamme de calibration.

Si les étalons ne sont pas en formazine, il convient d'utiliser l'unité NTU. L'équivalence NTU = NFU n'est plus valable.

2.2 Limites de la mesure de turbidité

Effet de la taille des particules

La taille des particules exerce une influence sur la relation turbidité/MES. Les capteurs possèdent une sensibilité inversement proportionnelle à la taille des particules. La sensibilité du capteur est plus grande pour les particules fines. Pour un calcul de flux, il pourrait être utile de disposer d'analyses de MES, complétées par des analyses granulométriques. (Thollet et al., 2013)

Effet de la salinité

La floculation des particules, liée à la salinité, peut entraîner des modifications significatives des tailles de particules. La relation turbidité/MES est donc impactée par les variations de salinité.

Effet de la saisonnalité lié aux blooms phytoplanctoniques

La couleur des sédiments peut entraîner une variation de la relation turbidité/MES.

Effet de l'hydrologie – impact des apports amont (crues)

La nature des particules diffère suivant les apports considérés. Dans le secteur à l'amont de Nantes, les apports liés aux crues sont nécessairement différents des apports de l'océan. Comme il a été précisé précédemment, la taille des particules ayant une influence sur la relation turbidité/MES, il est nécessaire d'établir des relations suivant les apports (crues ou étiages), afin de diminuer les incertitudes sur la détermination des concentrations en MES.

Effet de site

L'hétérogénéité des concentrations dans la section et la position du point de prélèvement sont dues à l'existence d'un gradient vertical et horizontal des concentrations de matières en suspension. Ces gradients entraînent une incertitude sur la représentativité de la mesure de turbidité, mais impactent peu les relations turbidité/MES. L'exploration de l'ensemble de la section permettrait d'estimer cette incertitude.

Perturbation du signal

Un bruit dissymétrique peut être observé, constitué par des pics positifs de grande amplitude, d'une durée souvent limitée. Ces pics sont généralement dus à des artefacts de mesure, liés à des occultations partielles et temporaires du faisceau de mesure, par des grosses particules ou filasses. Leur fréquence varie dans le temps. Ils peuvent introduire un biais significatif dans les calculs de moyennes.

3 Application au réseau SyVEL

3.1 Description du réseau SyVEL

Le réseau de mesure SYVEL (SYstème de Veille dans l'Estuaire de la Loire), géré par le GIP Loire Estuaire depuis sa mise en service en 2007, est composé de 9 stations (au 1^{er} janvier 2024). Chacune mesure, toutes les 10 minutes (donnée horaire pour Cordemais), la turbidité (matières en suspension), la conductivité (salinité), la concentration en oxygène dissous et la température de l'eau en sub-surface (-1m). La station de Donges est équipée d'un deuxième point de mesure à 4 m sous la surface. Des lois sont établies, sur chaque station, pour convertir les mesures de turbidité en concentration en matières en suspension.

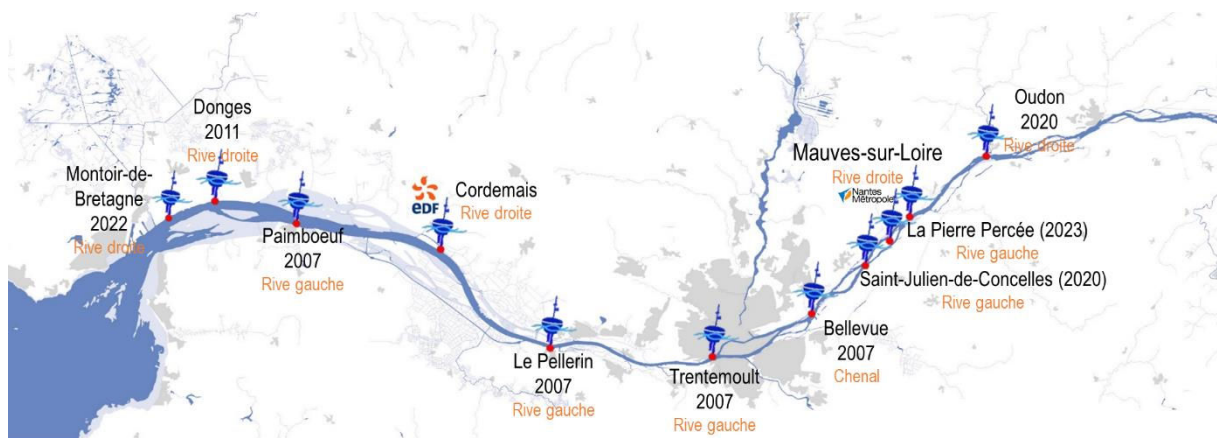


Figure 2 : Carte du réseau SyVEL au 01/01/2024

Sur les mesures du réseau SYVEL, les pics de turbidité à basse mer sont d'autant plus marqués pour les stations situées en bordure de berges, à proximité d'une vasière (essentiellement le cas de Paimbœuf et Cordemais). Les sondes de turbidité de SYVEL saturent pour des concentrations de l'ordre de 5,5 g/l. D'autres techniques de mesure sont employées pour suivre les concentrations plus importantes, incompatibles avec un enregistrement en continu haute fréquence.

Les apports de la Loire sont généralement inférieurs à 0,5 g/l et atteignent exceptionnellement 0,8 g/l. Suivre le seuil de concentration à 0,5 g/l est donc représentatif du bouchon vaseux.

3.2 Type de turbidimètres avant l'évolution amorcée en 2018

Lors de la mise en service des stations, le choix a été fait d'installer des stations MAREL (développées par IFREMER et NKE) sur les stations de Trentemoult, Le Pellerin, Paimbœuf et Donges. Pour les stations MAREL, les échantillons d'eau sont prélevés dans le milieu à travers une crépine à une profondeur d'un mètre, sous la surface de l'eau. Une pompe, fonctionnant en aspiration (la pompe est placée en aval du circuit de mesure pour conserver les qualités de l'eau) achemine l'eau dans le circuit de mesure. L'échantillon traverse une chambre de mesure, en passant successivement devant tous les capteurs. Un dispositif d'auto-nettoyage actif par chloration permet d'éviter le développement de biofouling (algues, coquillages, ...) dans le circuit hydraulique et sur les capteurs. Ce dispositif est arrêté pendant les mesures.

Le turbidimètre installé sur les stations MAREL est un turbidimètre Turbimax CUS-31. Il s'agit d'un capteur optique basé sur la norme EN ISO 7027, qui fonctionne selon le principe de diffraction à 90° dans le spectre proche de l'infra-rouge (880nm).

La station de Bellevue est équipée, en 2007, avec une sonde multi-paramètres SMATCH (développée par NKE). La turbidité est mesurée par un capteur Seapoint STM, qui fonctionne dans le spectre proche de l'infra-rouge (880nm).

Les stations MAREL sont remplacées progressivement par des sondes multi-paramètres Sambat puis WIMO, à partir de 2018.

3.3 Type de sondes et turbidimètres – évolution progressive depuis 2018

Les sondes Sambat du réseau SYVEL, fournies par NKE, sont équipées de capteurs turner designs CYCLOPS-7. Ces capteurs fonctionnent avec une lampe LED (Longueur d'onde : IR (850 nm)). La mesure se fait par mesurage du rayonnement diffus (néphélométrie) avec un angle de 90° par rapport à l'angle d'émission. Par défaut, l'unité utilisée est le NTU.

Les capteurs des sondes WiMo, fournies par NKE, sont basés sur la méthode par mesurage de rayonnement diffus (néphélométrie) satisfaisant à la norme ISO 7027. L'éclairage est réalisé dans le

proche infrarouge avec une détection à 90° de l'angle d'émission. Les turbidités sont exprimées en NTU, pour l'ensemble des stations SYVEL.

Par défaut, les capteurs sont calibrés par des solutions comprises entre 10 et 1000 NFU. Pour des valeurs plus élevées, la linéarité entre les NFU et les NTU n'est pas assurée.

L'ensemble des capteurs du réseau SYVEL utilise la norme ISO7027.

4 Corrélation en MES

Afin de comparer les données entre différentes stations et/ou différents capteurs, il est essentiel de transformer les mesures de turbidité en concentration en MES.

Les MES sont des particules caractérisées par un diamètre supérieur à 0,45 µm. La concentration en MES peut être approchée à partir de la mesure de la turbidité. Cette relation théorique dépend de la quantité de particules, mais aussi de leurs caractéristiques (granulométrie, forme, densité...)

Sur les stations de Bellevue, Thouaré-Saint Julien, Pierre Percée et Oudon, les relations « turbidité en NFU = f(concentration en MES) » et « turbidité en NTU = f(concentration en MES) » sont testées. Les données de turbidité en NFU et les données de MES sont issues des prélèvements réalisés par le laboratoire Inovalys. Les données en NTU sont les données SYVEL.

4.1 Relation turbidité-MES en laboratoire

Les relations turbidités – MES sont déterminées en laboratoire.

4.1.1 Station de Bellevue



Figure 3 : Zone de prélèvements du site de Bellevue (Source : Geoportail)

Sur la station de Bellevue, les prélèvements ne sont pas réalisés au droit de la station de Bellevue (accessible uniquement en bateau). Les échantillons sont prélevés depuis la cale de Bellevue, rive droite, à l'amont de la sonde. Les mesures sont réalisées entre mars et octobre 2023. Le débit au niveau de Montjean/Loire varie entre 126 et 1100 m³/s et les coefficients de marées entre 40 et 111.

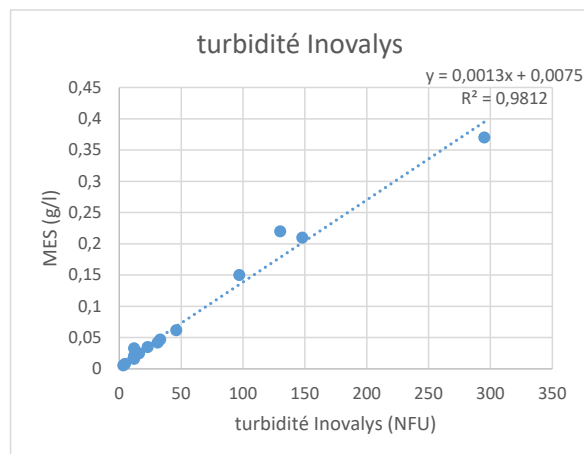


Figure 4 : Concentration en MES (g/l) en fonction de la turbidité mesurée en laboratoire (NFU), sur la station de Bellevue

La relation est linéaire, sur la gamme 0 – 400 mg/l, avec une très bonne corrélation.

4.1.2 Station de Thouaré/Saint-Julien

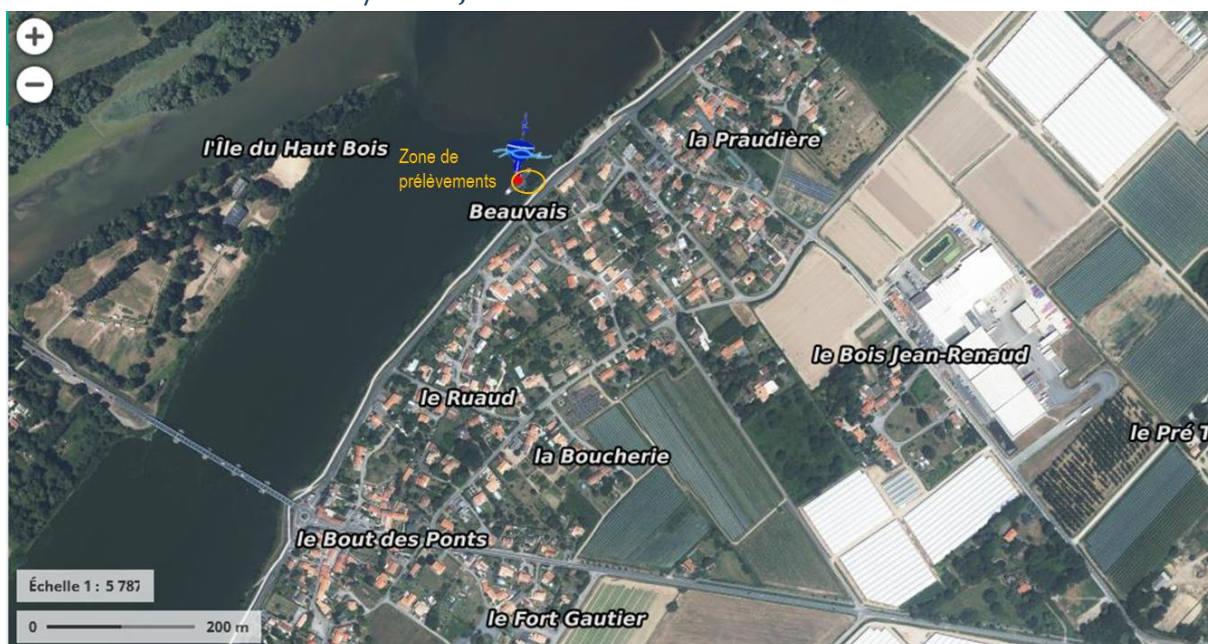


Figure 5 : Zone de prélèvements du site de Thouaré/Saint-Julien (Source : Geoportail)

Les mesures sont réalisées entre novembre 2022 et octobre 2023. Le débit au niveau de Montjean/Loire varie entre 126 et 1100 m³/s et les coefficients de marées entre 30 et 111.

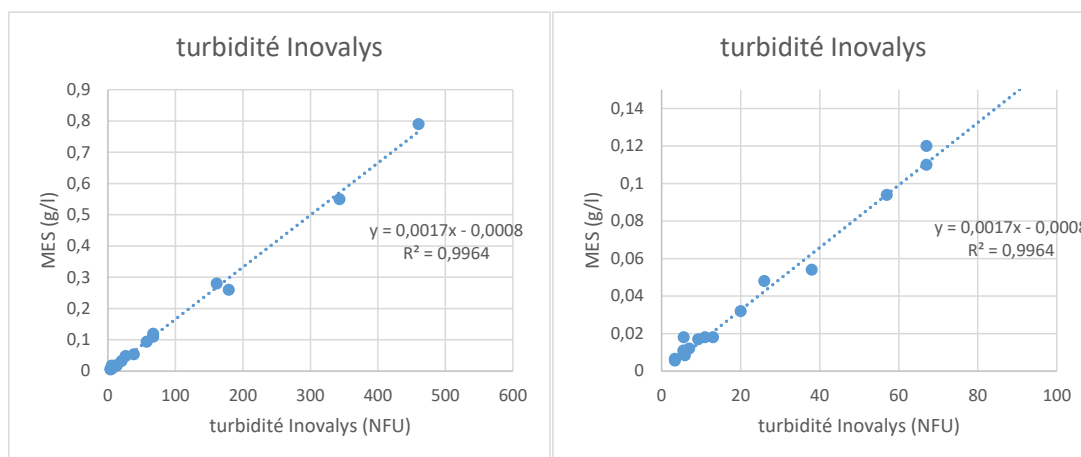


Figure 6 : Concentration en MES (g/l) en fonction de la turbidité mesurée en laboratoire (NFU), sur la station de Thouaré-Saint-Julien, zoom sur les faibles valeurs à droite

La relation entre la turbidité et la concentration en MES est linéaire, pour des valeurs comprises entre 0 et 800 mg/l, avec une très bonne corrélation. La relation est linéaire et la corrélation forte y compris pour les faibles valeurs.

4.1.3 Station de Pierre Percée

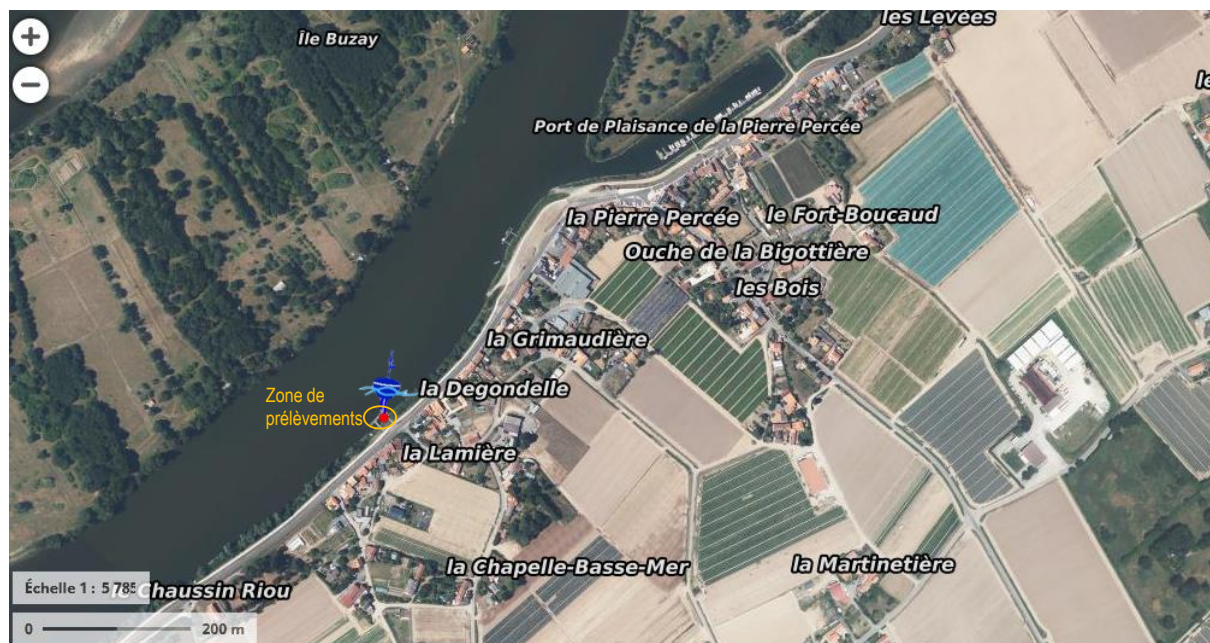


Figure 7 : Zone de prélèvements du site de la Pierre Percée (Source : Geoportail)

Les mesures sont réalisées entre juillet et octobre 2023. Le débit au niveau de Montjean/Loire varie entre 126 et 194 m³/s et les coefficients de marées entre 40 et 111.

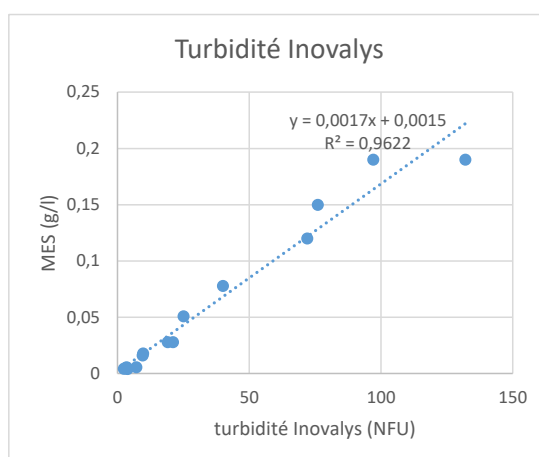


Figure 8 : Concentration en MES (g/l) en fonction de la turbidité mesurée en laboratoire (NFU), sur la station de la Pierre Percée

La relation est linéaire, sur la gamme 0 – 200 mg/l, avec une très bonne corrélation.

4.1.4 Station d'Oudon

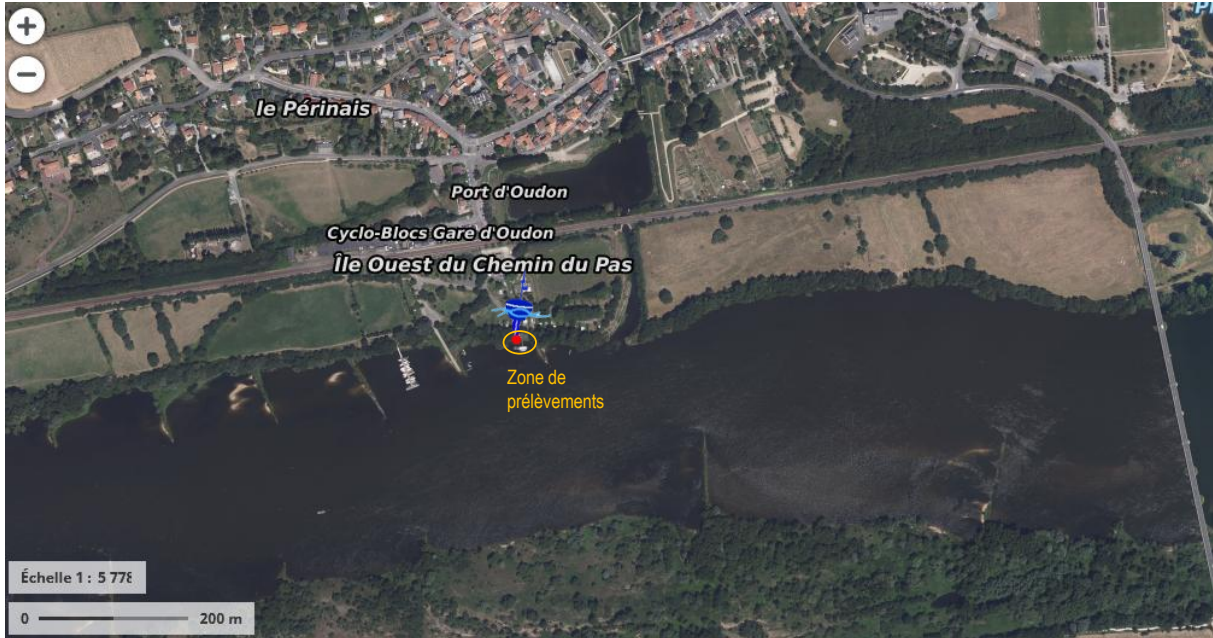


Figure 9 : Zone de prélèvements du site d'Oudon (Source : Geoportail)

Sur la station d'Oudon, les prélèvements ont été réalisés en présence de faible concentration en MES.

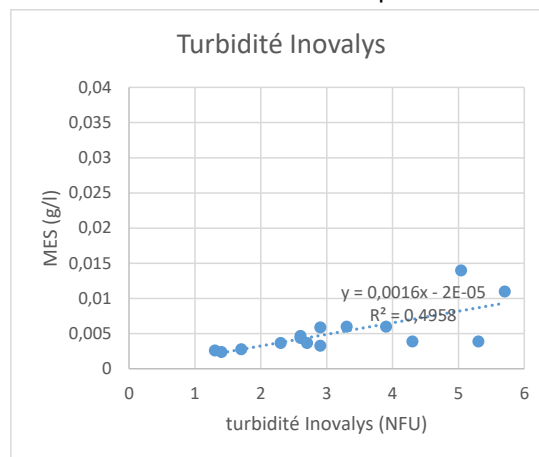


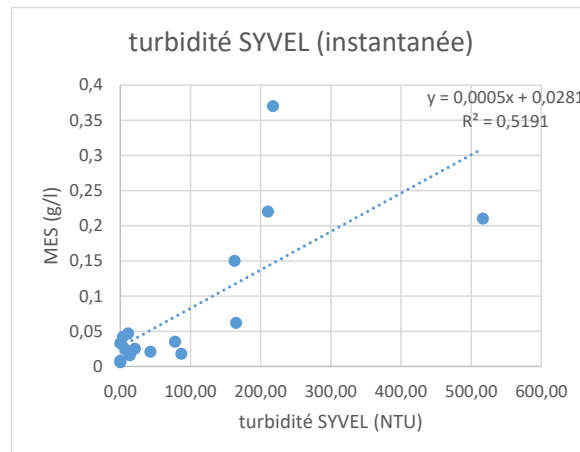
Figure 10 : Concentration en MES (g/l) en fonction de la turbidité mesurée en laboratoire (NFU), sur la station d'Oudon

La courbe n'est pas linéaire. Les concentrations en MES sont très faibles, et sont dans l'incertitude de mesure.

4.2 Relation turbidité-MES in situ

Les concentrations en MES déterminées en laboratoire (cf 4.1) sont mises en relation avec les turbidités mesurées par les capteurs installés in situ sur le réseau SYVEL. Les données de turbidité du réseau SYVEL sont les données instantanées, mesurées à l'instant du prélèvement.

4.2.1 Station de Bellevue



4.2.2 Station de Thouaré/Saint-Julien

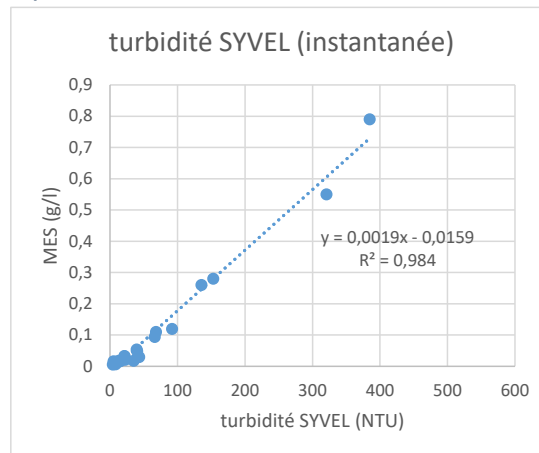


Figure 12 : Concentration en MES (g/l) en fonction de la turbidité instantanée (NTU) mesurée par la sonde SYVEL, sur la station de Thouaré-Saint-Julien, zoom sur les faibles valeurs à droite

La relation entre la turbidité et la concentration en MES est linéaire, pour des valeurs comprises entre 0 et 800 mg/l, avec une bonne corrélation. La relation est cependant moins précise pour les faibles valeurs.

4.2.3 Station de Pierre Percée

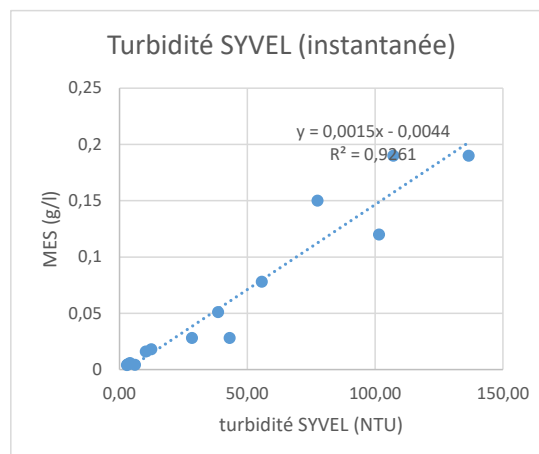


Figure 13 : Concentration en MES (g/l) en fonction de la turbidité instantanée (NTU) mesurée par la sonde SYVEL, sur la station de la Pierre Percée

La relation est linéaire, sur la gamme 0 – 200 mg/l, avec une bonne corrélation.

Conclusions :

Les turbidimètres des sondes du réseau de mesures SYVEL mesurent des turbidités, exprimées en NTU, qui peuvent être exprimées en NFU (avec la relation 1 NFU = 1 NTU, jusqu'à 1000 NFU).

Les relations turbidité/MES sont déterminées en 2023 pour les sites de Bellevue, Thouaré-Saint-Julien et Pierre Percée. Les relations sur les stations de Trentemoult, Le Pellerin, Paimbœuf et Donges sont établies lors d'une précédente étude.

Les lois suivantes sont appliquées pour les données des stations SYVEL, dans une gamme de mesures définies. Le choix est fait d'utiliser les relations déterminées à partir des mesures de turbidité réalisées sur les prélèvements d'Inovalys. Les lois déterminées à partir des mesures du réseau SYVEL permettent de définir une « erreur environnementale », liée au milieu (encrassement du capteur, variabilité des concentrations, stratification...). Les gammes de mesures sont extrapolées avec une marge de 20 % au-delà des mesures réalisées par Inovalys. Au-delà des gammes de mesures, la valeur de MES sera non déterminée - n.d. Les lois sont appliquées toutes situations hydrologiques confondues.

Bilan des relations turbidité (NFU) = f (concentration en MES (g/l))

Station SyVEL	Période validité loi	Type de sonde	Relation turbidité – MES	Validité de la gamme de mesures (g/l)	Incertitude sur le coefficient directeur
Montoir de Bretagne	29/03/2022 – en cours	WIMO	En cours d'élaboration		
Donges -4m	16/04/2024 – en cours	SAMBAT	En cours d'élaboration		
Donges -4m	20/07/2021 – 15/04/2024	WIMO	En cours d'élaboration		
Donges -4m	08/07/2010 – 19/07/2021	MAREL	Si turb < 1324 : [MES] = 0,001636 turb Si turb > 1324 : [MES] = -1,076.10 ⁻¹⁵ turb ⁴ + 3,27.10 ⁻¹¹ turb ³ + 3,681.10 ⁻⁷ turb ² + 0,002025turb + 0,05756	0 - 5	
Donges -1m	16/04/2024 – en cours	WIMO	En cours d'élaboration		
Donges -1m	20/07/2021 – 15/04/2024	Sambat	[MES] = 2.10 ⁻⁶ .turb ² + 9,68.10 ⁻³ .turb + 0,01804	0 - 5	
Donges -1m	08/07/2010 – 19/07/2021	MAREL	Si turb < 1324 : [MES] = 0,001636 turb Si turb > 1324 : [MES] = -1,076.10 ⁻¹⁵ turb ⁴ + 3,27.10 ⁻¹¹ turb ³ + 3,681.10 ⁻⁷ turb ² + 0,002025turb + 0,05756	0 - 5	
Paimbœuf	30/01/2018 – en cours	Sambat	[MES] = 5.10 ⁻⁷ turb ² + 9.10 ⁻⁴ turb + 0,0434	0 – 4	
Paimbœuf		MAREL	Si turb < 1324 :	0 - 5	

			$[MES] = 0,001636 \text{ turb}$ Si turb > 1324 : $[MES] = -1,076 \cdot 10^{-15} \text{ turb}^4 + 3,27 \cdot 10^{-11} \text{ turb}^3 + 3,681 \cdot 10^{-7} \text{ turb}^2 + 0,002025 \text{ turb} + 0,05756$		
Le Pellerin	11/09/2019 – en cours	Sambat	$[MES] = 7 \cdot 10^{-7} \text{ turb}^2 + 4 \cdot 10^{-4} \text{ turb} + 0,0911$	0 – 5	
Le Pellerin	06/02/2007 – 10/09/2019	MAREL	Si turb < 1324 : $[MES] = 0,001636 \text{ turb}$ Si turb > 1324 : $[MES] = -1,076 \cdot 10^{-15} \text{ turb}^4 + 3,27 \cdot 10^{-11} \text{ turb}^3 + 3,681 \cdot 10^{-7} \text{ turb}^2 + 0,002025 \text{ turb} + 0,05756$	0 - 5	
Trentemoult	17/09/2019 – en cours	Sambat	$[MES] = 5 \cdot 10^{-7} \text{ turb}^2 + 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ turb} + 0,1$	0 - 5	
Trentemoult	06/02/2007 – 16/09/2019	MAREL	Si turb < 1324 : $[MES] = 0,001636 \text{ turb}$ Si turb > 1324 : $[MES] = -1,076 \cdot 10^{-15} \text{ turb}^4 + 3,27 \cdot 10^{-11} \text{ turb}^3 + 3,681 \cdot 10^{-7} \text{ turb}^2 + 0,002025 \text{ turb} + 0,05756$	0 - 5	
Bellevue	01/12/2020 – en cours	Sambat	$[MES] = 0,0013 \text{ turb} + 0,0075$	0 – 0,5	30 %
Bellevue	15/06/2007 – 05/08/2020	SMATCH	Si turb < 806 : $[MES] = 0,0009553 \text{ turb}$ Si turb > 806 : $[MES] = 0,0022932 \text{ turb} - 1,078$	0 - 5	
Thouaré-Saint Julien	16/12/2020 -	WIMO	$[MES] = 0,0017 \text{ turb} - 0,0008$	0 – 0,8	15 %
Pierre Percée	17/07/2023 -	WIMO	$[MES] = 0,0017 \text{ turb} + 0,0015$	0 – 0,3	6 %
Oudon	16/12/2020 -	WIMO	Equation non déterminée (valeur faible)		

Afin de faciliter l'exploitation des relations turbidité-MES et des mesures réalisées, le choix est fait d'appliquer une loi moyennée sur l'année. En fonction des problématiques, ces lois peuvent être affinées, notamment pour prendre en compte les effets de la saisonnalité, de la nature des particules, etc.

Principales références bibliographiques

Norme NF EN ISO 7027-1

Thollet F., Le Coz J., Saguintaah L., Launay M., Camenen B., Antoine G., François P. Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau. In: 35es journées de l'hydraulique de la Société Hydrotechnique de France. Hydrométrie 2013. Paris, 15-16 mai 2013. 2013.

Versini P.A., Joannis C. et Chebbo G., 2015. Guide technique sur le mesurage de la turbidité dans les réseaux d'assainissement. Onema, Coll. Guides et protocoles.