

SUSPENSE

Rapport technique sur la variabilité des coefficients
de calibration NTU/mg.l⁻¹ du réseau SYNAPSES

15/11/2016

Flavie DRUINE, Robert LAFITE, Julien DELOFFRE,
Romaric VERNEY et Jean-Philippe LEMOINE



Ifremer

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	2
TABLE DES ILLUSTRATIONS	3
INTRODUCTION	5
CHAPITRE 1 – CAMPAGNES DE MESURES	7
1 Cycle Annuel	7
2 Cycle VE/ME	7
3 Stratégie de mesures	8
4 Ajustement du protocole initial	8
CHAPITRE 2 – METHODOLOGIE DE TRAITEMENTS DES DONNEES	10
1 Validation des données de turbidité du réseau SYNAPSES	10
2 Choix de la méthode de calibration NTU/[MES]	11
CHAPITRE 3 – RESULTATS	13
1 Site de FATOUVILLE	13
1.1 Variations observées de l'échelle annuelle aux cycles VE/ME	13
1.2 Erreurs relatives calculées	15
2 Site de TANCARVILLE	17
3 Site de VAL DES LEUX	19
4 Site de ROUEN	21
5 Calibration inter-sites	22
SYNTHESE DES RESULTATS	25
BIBLIOGRAPHIE	26

TABLE DES ILLUSTRATIONS

- Figure 1 :** Carte de l'Estuaire de Seine, avec les 5 stations du réseau SYNAPSES 5
- Figure 2 :** (a) Carte de localisation du ponton SYNAPSES et du ponton IN SITU – (b) et (c) Comparaison des données (i) de turbidité (NTU) et (ii) de concentrations en MES (mg.l^{-1}) pour les deux pontons étudiés 9
- Figure 3 :** (a) Comparaison de la turbidité surface/fond et (b) ratio surface/fond de la turbidité, pour l'OBS (en étoile), l'YSI (en point) et SYNAPSES (en triangle), à Fatouville le 25/02/16, sur un cycle de marée (12h). 10
- Figure 4 :** Relation de calibration entre le signal de turbidité du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées (a) estimée par la méthode de Thiel-Sen et (b) estimée par une pente médiane (trait plein) avec un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour FATOUVILLE le 29/09/15 – (c) Répartition des couples turbidité/[MES] en classes de quantiles et (d) Distribution des pentes calculées avec l'ensemble des combinaisons testées. 12
- Figure 5 :** Coefficients de calibration calculés à partir de données du réseau SYNAPSES, pour le cycle annuel (a) et le cycle VE/ME (b - c), à FATOUVILLE. Le coefficient de calibration et l'intervalle de confiance 'journalier' sont dessinés pour chacune des campagnes. Les barres de couleur représentent (a) le débit de la Seine pour le cycle saisonnier et (b - c) le coefficient de marée pour le cycle VE/ME. 14
- Figure 6 :** Relation de calibration dite 'unique' (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour FATOUVILLE entre fév. 2015 et juin 2016. 14
- Figure 7 :** Erreurs relatives du réseau SYNAPSES (%) calculées à partir du coefficient de calibration 'journalier' (symbole rond) et 'unique' (symbole carré) pour chacune des campagnes réalisées à FATOUVILLE, avec (a) le cycle annuel et (b - c) le cycle VE/ME. Les barres de couleur représentent (a) le débit de la Seine pour le cycle saisonnier et (b - c) le coefficient de marée pour le cycle VE/ME. 16
- Figure 8 :** (a) Coefficients de calibration calculés à partir de données du réseau SYNAPSES, pour le cycle annuel à TANCARVILLE. Le coefficient de calibration et l'intervalle de confiance 'journalier' sont dessinés pour chacune des campagnes. (b) Erreurs relatives du réseau SYNAPSES (%) calculées à partir du coefficient de calibration 'journalier' (symbole rond) et 'unique' (symbole carré) pour chacune des campagnes réalisées à TANCARVILLE, pour le cycle annuel. Les barres de couleur représentent le débit de la Seine. 17
- Figure 9 :** Relation de calibration dite 'unique' (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour TANCARVILLE entre mars 2015 et mars 2016. 18
- Figure 10 :** Coefficients de calibration calculés à partir de données du réseau SYNAPSES, pour le cycle annuel (a) et le cycle VE/ME (b - c), à VAL DES LEUX. Le coefficient de calibration et l'intervalle de confiance 'journalier' sont dessinés pour chacune des campagnes. Les barres de couleur représentent (a) le débit de la Seine pour le cycle saisonnier et (b - c) le coefficient de marée pour le cycle VE/ME. 19

Figure 11 : Erreurs relatives du réseau SYNAPSES (%) calculées à partir du coefficient de calibration 'journalier' (symbole rond) et 'unique' (symbole carré) pour chacune des campagnes réalisées à VAL DES LEUX, avec (a) le cycle annuel et (b - c) le cycle VE/ME. Les barres de couleur représentent (a) le débit de la Seine pour le cycle saisonnier et (b - c) le coefficient de marée pour le cycle VE/ME. 20

Figure 12 : Relation de calibration dite 'unique' (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour VAL DES LEUX entre février 2015 et juin 2016. 20

Figure 13 : (a) Coefficients de calibration calculés à partir de données du réseau SYNAPSES, pour le cycle annuel à ROUEN. Le coefficient de calibration et l'intervalle de confiance 'journalier' sont dessinés pour chacune des campagnes. (b) Erreurs relatives du réseau SYNAPSES (%) calculées à partir du coefficient de calibration 'journalier' (symbole rond) et 'unique' (symbole carré) pour chacune des campagnes réalisées à ROUEN, pour le cycle annuel. Les barres de couleur représentent le débit de la Seine. 21

Figure 14 : Relation de calibration dite 'unique' (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour ROUEN entre mars 2015 et mars 2016. 22

Figure 15 : Relation de calibration INTER-SITES (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données de turbidité du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée). 23

Figure 16 : Représentativité des points de prélèvements effectués à BALISE A (mars 2015) par rapport à la relation de calibration INTER-SITES présentée en Figure 15. 24

Tableau 1 : Bilan des campagnes pour l'échelle annuelle (entre janvier 2015 et juin 2016). 7

Tableau 2 : Bilan des campagnes pour le cycle VE/ME (entre janvier 2015 et juin 2016). 8

Tableau 3 : Tableau de synthèse reprenant les coefficients de calibrations et les erreurs relatives calculés par stations de mesures, par compartiments spécifiques (amont et aval) et par regroupement de l'ensemble des sites. Le nombre de couples MES/NTU utilisé pour établir la relation de calibration est précisé. 25

INTRODUCTION

Le GIP Seine Aval s'est doté depuis 2011 d'un réseau de mesures automatique (SYNAPSES) des principaux paramètres hydrologiques (conductivité, température et salinité depuis 2015), sédimentaires (turbidité) et physico-chimiques (oxygène dissous et fluorescence). Les mesures sont réalisées sur 5 stations à proximité des berges de l'estuaire de Seine : en amont, Rouen et Val des Leux ; en aval, Tancarville, Fatouville et Balise A (Figure 1). Chaque station est équipée d'une sonde multiparamètre YSI 6600-V2 mesurant toutes les 5 minutes en sub-surface (environ 1m en dessous de la surface libre) pour toutes les stations excepté Balise A et également à 1m au-dessus du fond pour les stations aval (Tancarville, Fatouville et Balise A) situées dans la zone du bouchon vaseux.



Figure 1 : Carte de l'Estuaire de Seine, avec les 5 stations du réseau SYNAPSES

Le projet scientifique SUSPENSE a pour objectif principal l'évaluation des flux de matières en suspension (MES) à partir des données SYNAPSES. L'atteinte de cet objectif nécessite de lever 3 principaux verrous scientifiques :

- 1/ L'analyse de la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des MES et la quantification des concentrations en (MES) à partir des mesures de turbidités,
- 2/ L'analyse de la variabilité transversale des concentrations en MES et des flux hydriques et solides
- 3/ La mise en place d'une méthodologie de calcul des flux sédimentaires à partir des données SYNAPSES et l'analyse de leurs variabilités.

Le projet SUSPENSE est un projet collaboratif entre le laboratoire UMR CNRS 6143 M2C de l'Université Rouen Normandie, l'IFREMER et le GIP Seine-Aval. Ce projet scientifique repose principalement sur les travaux de thèse de Flavie DRUINE.

Le présent rapport technique se focalise sur la partie du projet portant sur la quantification des concentrations en MES à partir des mesures de turbidité. Ce besoin technique pour l'estimation des flux sédimentaires est issu des projets Seine-Aval 4, MODEL et FLUMES qui ont montré une forte variabilité des coefficients de corrélation entre les mesures de turbidité en NTU et les concentrations massiques des MES (appelés par la suite coefficients de calibration). Fort de ce constat un des objectifs du projet SUSPENSE est d'analyser cette variabilité et si possible de la caractériser si nécessaire au regard des principaux forçages hydrologiques présents en estuaire, à savoir le débit et la marée.

CHAPITRE 1 – CAMPAGNES DE MESURES

Le planning des campagnes de mesures a été construit de manière à pouvoir appréhender l'effet des variabilités temporelles des principaux forçages hydrodynamiques estuariens (marée et débit) sur la dynamique des MES. Deux cycles seront examinés (cycle annuel et cycle Vive-Eau VE/Morte-Eau ME) à partir de campagnes de 12h afin de suivre les variations du cycle tidal semi-diurne.

Deux types de sites sont définis pour la planification des campagnes : 1/ les sites principaux : Fatouville et Val des Leux et 2/ les sites secondaires : Rouen, Tancarville et Balise A.

Depuis Janvier 2015, 65 campagnes de mesures ont été réalisées sur les 4 pontons SYNAPSES (Rouen / Val des Leux / Tancarville et Fatouville) et sur une station en mer à Balise A (à proximité des sondes du réseau).

1 Cycle Annuel

A l'échelle annuelle, 37 campagnes ont été effectuées en période de VE (coefficients de marée compris entre 88 et 117 - Tableau 1). L'objectif de ces campagnes est l'étude de l'influence de la variabilité annuelle des débits de la Seine, voire de la variabilité saisonnière des particules en suspension sur la quantification des concentrations en MES. Les débits observés lors de ces campagnes sont compris entre 168 et 2010 m³.s⁻¹. Ces campagnes se sont déroulées entre février 2015 et février 2016, incluant une campagne exceptionnelle réalisée durant la crue de juin 2016. Sur les sites principaux (Fatouville et Val des Leux) les mesures sont réalisées une VE sur deux (soit 1fois/mois) et réalisées toutes les 4 VE (soit 1fois/2 mois) sur les sites secondaires (Rouen, Tancarville et Balise A).

Tableau 1 : Bilan des campagnes pour l'échelle annuelle (entre janvier 2015 et juin 2016).

DATES	janv-15	fev-15	mars-15	avr-15	mai-15	juin-15	juil-15	aout-15	sept-15	oct-15	nov-15	fev-16	juin-16	TOTAL
COEF DE MAREE	104/109	93/113	86/119	94/101	88/101	89/91	87/95	95/114	98/117	104/113	90/104	90/116	97/103	-
DEBIT MOYEN JOURNALIER (m3/s)	727/976	599/628	452/509 (907)	416/479	492/616	218/239	168/189	199/239	226/229	216/265	413/420	989/1120	1870/2010	-
Val des Leux	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
Fatouville	xx	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
Rouen	x		x		x		x	x		x		x		6
Tancarville	xx		x		x		x	x		x		x		6
Balise A			x (5h)		-		-			-		-		1 (5h)
Campagnes effectuées	6	2	5	2	4	2	4	4	2	4	2	4	2	37

2 Cycle VE/ME

Afin d'étudier les variabilités liées au cycle VE/ME, des campagnes de mesures ont été réalisées durant les différentes phases de ce cycle : durant les VE, les ME et lors des phases de déchets (VE→ME) et de revifs (ME→VE). Afin d'identifier l'effet du débit sur la dynamique sédimentaire, ces campagnes ont été réalisées pour deux gammes de débits : en période d'étiage (sept. /oct. 2015 – débit moyen à 244 m³/s) et en période de crue (fév. / mars 2016 – débit moyen à 1057 m³/s). Les campagnes à l'échelle du cycle VE/ME ne concernent que les sites principaux de Fatouville et Val des Leux (Tableau 2).

Tableau 2 : Bilan des campagnes pour le cycle VE/ME (entre janvier 2015 et juin 2016).

DATES	ETIAGE (Sept/Oct)	CRUE (Fev/Mars)	TOTAL
COEF DE MAREE	37/117	34/108	-
DEBIT MOYEN JOURNALIER (m3/s)	187/358	828/1250	-
Val des Leux	3	3	6
Fatouville	10	6	16
Campagnes effectuées	13	9	22

3 Stratégie de mesures

Afin de suivre l'évolution des paramètres hydrologiques, sédimentaires et physico-chimiques dans la colonne d'eau, des profils verticaux ont été réalisés de la surface vers le fond toutes les 15 minutes, à proximité immédiate des stations SYNAPSES. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'une cage équipée de deux sondes multi-paramètres (turbidimètres OBS et YSI, ce dernier étant identiques à ceux utilisés dans le réseau SYNAPSES) et d'un granulomètre laser *in-situ* (LISST 100X-C). Ces profils sont couplés, toutes les heures, à des prélèvements d'eau en sub-surface (à environ 1m) et à 1m au-dessus du fond. Afin d'améliorer notre connaissance des MES présentes dans le milieu, les échantillons d'eau ont fait l'objet d'analyses complémentaires permettant d'accéder aux caractéristiques suivantes : la concentration totale, la turbidité avec un turbidimètre de paillasse (HACH), le pourcentage de Matières Organiques (MO, réalisé par perte au feu – analyses réalisées à Ifremer/Brest) et la distribution des tailles de particules primaires après passage des prélèvements aux ultra-sons.

L'objet du présent rapport portant sur l'analyse de la variabilité des coefficients de calibration des sondes YSI équipant le réseau SYNAPSES, seules les données de turbidité (issues du réseau) et les mesures de concentration en MES seront analysées ici. L'analyse de l'ensemble des autres paramètres sera prochainement présentée dans le cadre de publications scientifiques liées à la thèse, support de ce projet.

4 Ajustement du protocole initial

Le planning des campagnes de mesures prévues dans le calendrier initial à Balise A a dû être revu en raison de la dangerosité de l'accès au site et en particulier l'amarrage du bateau à la balise. Au final, Seule une campagne de mesures a été faite en Mars 2015 sur une période de 5h. Les résultats ainsi obtenus ont néanmoins été analysés et sont présentés dans le présent rapport.

A Tancarville, au vu des difficultés logistiques pour accéder au ponton SYNAPSES (ponton amont) avec le matériel, il a été décidé d'effectuer les mesures IN SITU sur le ponton aval dès la 1^{ère} campagne. Des prélèvements simultanés ont été réalisés à partir de ces deux pontons afin de vérifier l'homogénéité de la turbidité et des concentrations en MES dans la colonne d'eau sur ces deux points (Figure 2). L'examen de la Figure 2 montre que les mesures simultanées aux deux pontons sont très proches, tant pour la turbidité que pour les concentrations en MES et sans biais significatif. La dispersion des données de turbidité est plus importante pour les fortes valeurs du fait de la forte hétérogénéité du milieu dans ces conditions extrêmes, potentiellement caractérisées par des bouffées de turbidité proche du fond. Cette même dispersion est retrouvée lors des calibrations des sondes SYNAPSES, cf. Figure 6, Figure 9 (et suivantes).

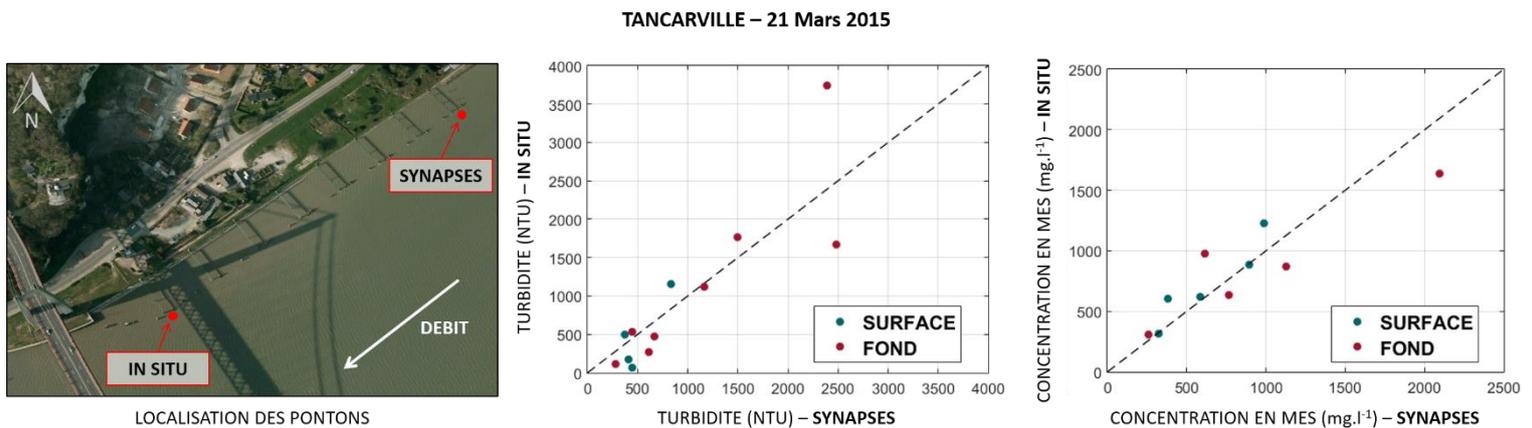


Figure 2 : (a) Carte de localisation du ponton SYNAPSES et du ponton IN SITU – (b) et (c) Comparaison des données (i) de turbidité (NTU) et (ii) de concentrations en MES (mg.l⁻¹) pour les deux pontons étudiés

CHAPITRE 2 – METHODOLOGIE DE TRAITEMENTS DES DONNEES

Les sections suivantes discuteront (i) de la validation des données du réseau SYNAPSES et (ii) du choix de la méthode de calibration retenue dans le but d'établir une relation précise entre les mesures de turbidité (NTU) et les concentrations en MES (mg.l^{-1}).

1 Validation des données de turbidité du réseau SYNAPSES

Dès réception des données brutes dans la base de données du réseau SYNAPSES, une première étape de validation des données de chaque site est réalisée par un automate mis en place par le GIP Seine-Aval. Une analyse élargie des variations temporelles est effectuée dans le but de rejeter un certain nombre de valeurs dites erronées pour chaque paramètre.

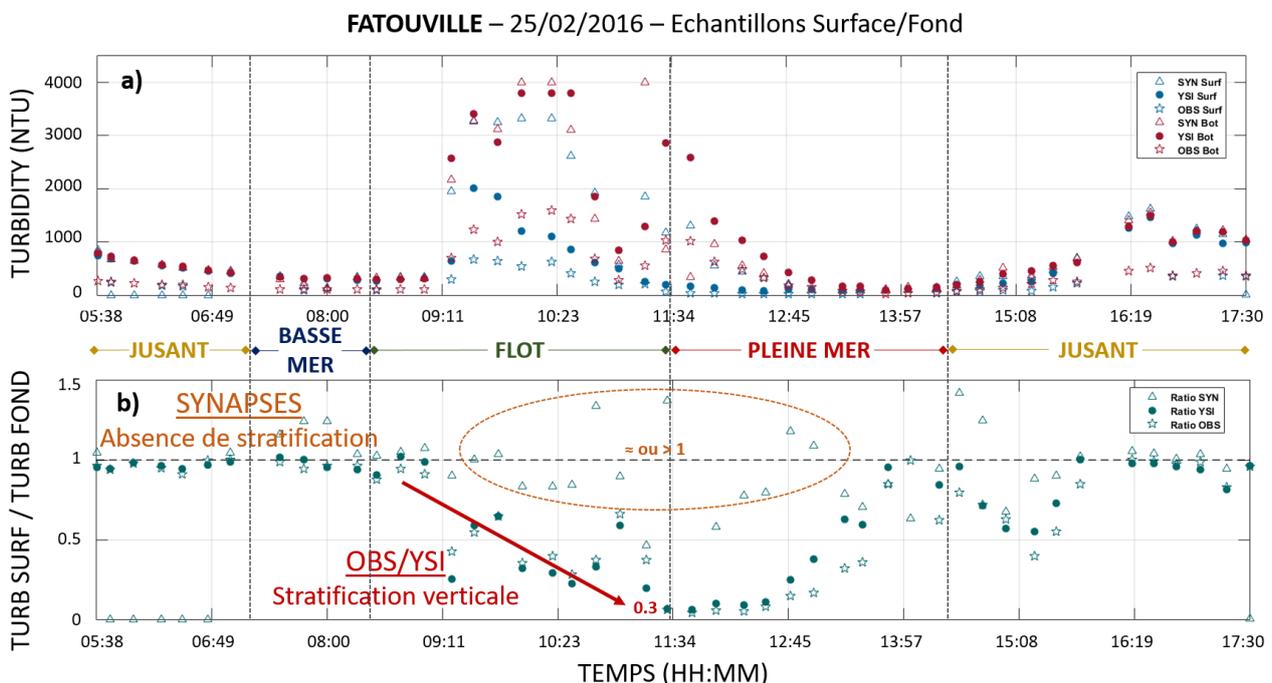


Figure 3 : (a) Comparaison de la turbidité surface/fond et (b) ratio surface/fond de la turbidité, pour l'OBS (en étoile), l'YSI (en point) et SYNAPSES (en triangle), à Fatouville le 25/02/16, sur un cycle de marée (12h).

Dans le cadre du projet, une analyse plus fine est opérée sur le paramètre 'turbidité' avec comme objectif d'évaluer la validité des données SYNAPSES. En effet, les sondes du réseau SYNAPSES sont installées dans un tube percé et non directement dans la colonne d'eau. Ce système de protection de la sonde est donc susceptible d'engendrer des perturbations vis à vis du milieu environnant et donc une représentativité discutable des données du réseau. Pour chacune des campagnes réalisées, une comparaison est effectuée entre les données de turbidités surface/fond observées par les deux turbidimètres mis en œuvre dans le projet (OBS et YSI) et celui de la station SYNAPSES (Figure 3). Sur une grande majorité des campagnes à Fatouville et Tancarville, nous avons mis en évidence de nettes différences de turbidité entre différents instruments durant la période de flot et d'étale de Pleine Mer (PM).

Afin de mieux visualiser les différences, un ratio est calculé en faisant le rapport entre les données de turbidité de surface par celles du fond. Une nette disparité de la turbidité entre la surface et le fond (appelé gradient vertical ou stratification) est observée sur la période donnée pour les instruments OBS/YSI (ratio inférieur à 0,3 – flèche rouge) et non avec SYNAPSES (ratio toujours autour de 1 – ellipse orange) Cette absence de stratification observée sur SYNAPSES est anormale et indique un problème au niveau de la sonde du réseau. Dans ces conditions, lorsque le ratio passe sous le seuil de 0,3 (pour OBS/YSI), les données de turbidité SYNAPSES (surface et fond) sont considérées comme aberrantes, et exclues de l'analyse.

2 Choix de la méthode de calibration NTU/[MES]

Les instruments de mesures à capteurs optiques (OBS/YSI) donnent des mesures indirectes étalonnées en NTU (unité internationale de turbidité). Il est nécessaire d'effectuer, par la suite, une étape de calibration afin de relier la grandeur physique en sortie de l'appareil de mesures (NTU) à des valeurs de concentrations massiques (mg.l^{-1}) données par un échantillonnage des masses d'eau par prélèvements. Dans notre cas, 7 méthodes ont été testées pour estimer les relations de calibration, basées sur les méthodes suivantes : (i) la régression linéaire par les moindres carrées (RMSE classique et par l'élaboration d'un critère α inférieur à 0,8 [$\alpha = 1 - (\text{Ecart type}/\text{Moyenne})$ – Chapalain et al., 2016]), (ii) la droite médiane de Theil-Sen (linéaire et non linéaire), (iii) la relation par suppression des percentiles extrêmes (10% et 20%) ou encore (iv) par détermination d'une pente médiane et d'un intervalle de confiance à 95%. L'objectif est de relier les mesures de turbidité (NTU) obtenues avec les capteurs optiques (OBS et YSI) avec les mesures de concentrations (mg/l) calculées à l'aide des prélèvements d'eau (filtration sous vide).

Parmi l'ensemble des méthodes de calibration testées, la méthode par détermination d'une pente médiane et d'un intervalle de confiance à 95% a été retenue. Elle présente l'avantage de prendre en compte la dispersion des valeurs autour de la relation de calibration NTU/[MES]. Compris entre deux bornes de type $y = a.x$, l'intervalle de confiance a pour objectif d'évaluer la précision de la relation tracée. La dite méthode a également fait l'objet d'une première application dans le projet SA5 AFFLUSEINE [Landemaine, 2016 – Landemaine et al, 2014]. La méthode retenue permet de diviser l'ensemble des couples turbidité/concentration en MES en classes de quantiles, de tailles si possible identiques. Chaque classe comprend 5 couples. Si le nombre de couples de la dernière classe est inférieur à 5, ces derniers sont intégrés à la classe précédente. Une fois les classes de quantiles déterminées, une régression linéaire de type $y = a.x$ est établie, en choisissant au hasard un point par classe. Cette étape est répétée en vue de couvrir l'ensemble ou un nombre fixe de combinaisons possibles. Par la suite, la distribution des coefficients de calibration a (ou pente de la relation de calibration) est établie pour définir une pente médiane (50 %) et un intervalle de confiance à 95% entre deux pentes représentant l'incertitude (Figure 4).



FATOUVILLE – 29 septembre 2015

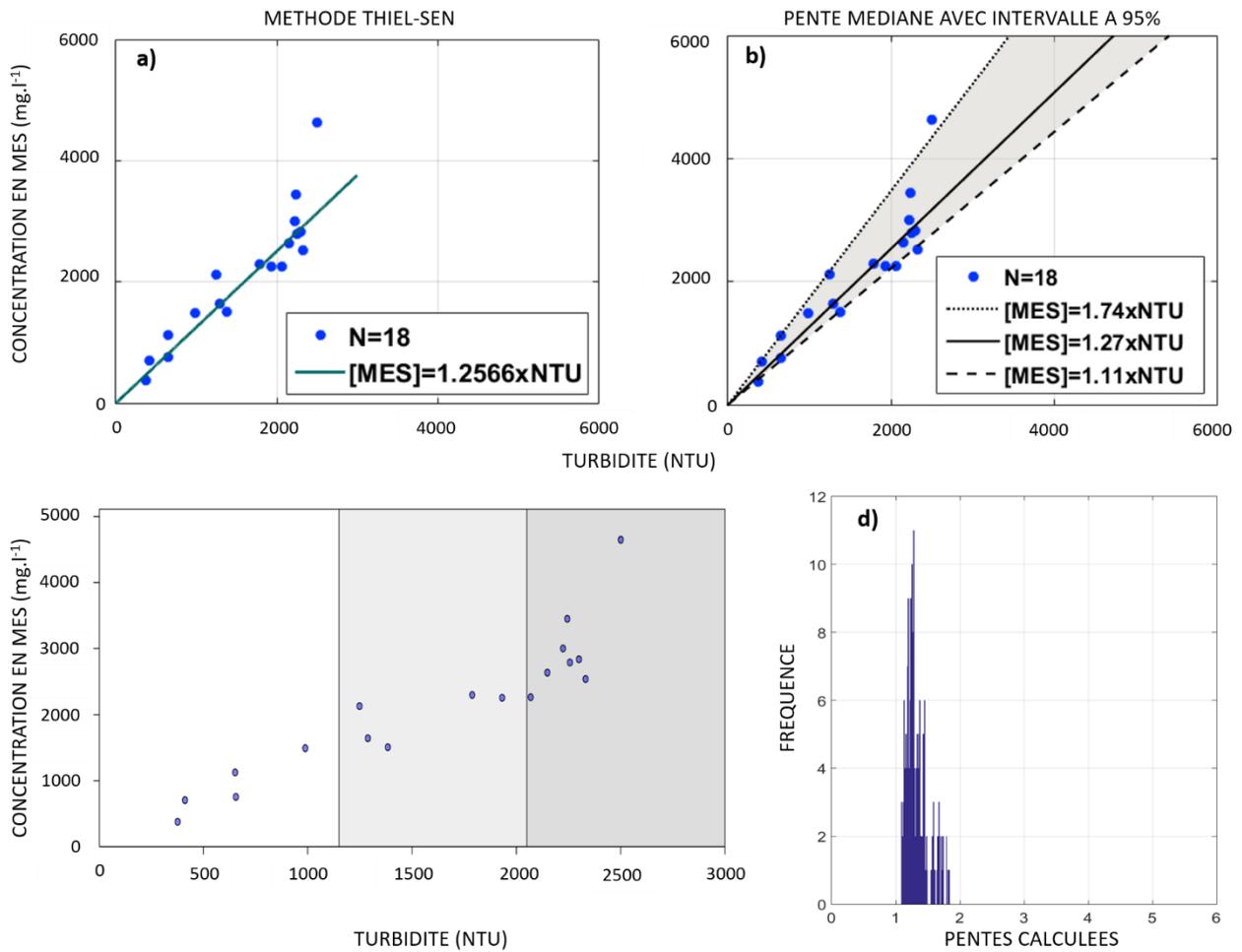


Figure 4 : Relation de calibration entre le signal de turbidité du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées (a) estimée par la méthode de Thiel-Sen et (b) estimée par une pente médiane (trait plein) avec un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour FATOUVILLE le 29/09/15 – (c) Répartition des couples turbidité/[MES] en classes de quantiles et (d) Distribution des pentes calculées avec l'ensemble des combinaisons testées.



CHAPITRE 3 – RESULTATS

Dans la suite de ce rapport, les relations de calibration MES/turbidité de chaque site sont étudiées dans le but de déceler de possibles variabilités de l'échelle annuelle aux cycles VE/ME. Une estimation de l'erreur relative sur la mesure est proposée afin d'évaluer la fiabilité des coefficients de calibration calculés. Les analyses et conclusions concernant le site de Fatouville serviront d'exemples et seront appliquées aux autres sites.

1 Site de FATOUVILLE

1.1 Variations observées de l'échelle annuelle aux cycles VE/ME

L'application de la méthodologie précédemment décrite permet d'associer à chaque campagne un coefficient de calibration dit 'journalier'. De manière générale, ces coefficients de calibration restent relativement constants et compris entre 1.05 et 1.6 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ pour le site de Fatouville (Figure 5), tant à l'échelle annuelle (entre 1.05 et 1.6) qu'à l'échelle du cycle VE/ME (entre 0.95 et 1.4). La faible variabilité observée selon les différentes échelles de temps considérées ne semble pas corrélée significativement aux conditions de débit pour l'échelle annuelle et de marée à l'échelle du cycle lunaire. Cette variabilité sera néanmoins confrontée ultérieurement aux données des autres instruments déployés durant les campagnes (teneur en matière organique, granulométrie, distribution des tailles de particules primaires, courantologie). Ces résultats diffèrent des précédentes observations lors des campagnes FLUMES2011 et SYNAPSES2015, qui montraient une forte variabilité à l'échelle du cycle VE/ME. Ces différences s'expliquent par les technologies des turbidimètres optiques utilisés : un capteur à rétrodiffusion entre 90° et 165° (OBS) lors des précédentes campagnes et un capteur à rétrodiffusion à 90° (YSI - néphélométrie), ce dernier étant moins sensible aux caractéristiques intrinsèques des particules en suspension.

Considérant la stabilité des coefficients de calibration, une relation de calibration 'unique' est proposée en analysant conjointement l'ensemble des données acquises entre février 2015 et juin 2016 (cycle annuel, cycle VE/ME étiage et cycle VE/ME crue - Figure 6). Le coefficient de calibration ainsi calculé est appelé coefficient de calibration 'unique' dans la suite du présent document. Pour le site de Fatouville ce coefficient de calibration vaut 1.18 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$. On peut également remarquer que les intervalles de confiance correspondent à approximativement à 50% de la valeur de la pente médiane (entre 46% et 54% pour les limites basses et hautes respectivement), témoignant d'une faible dispersion et de la très bonne représentativité des mesures de turbidité.



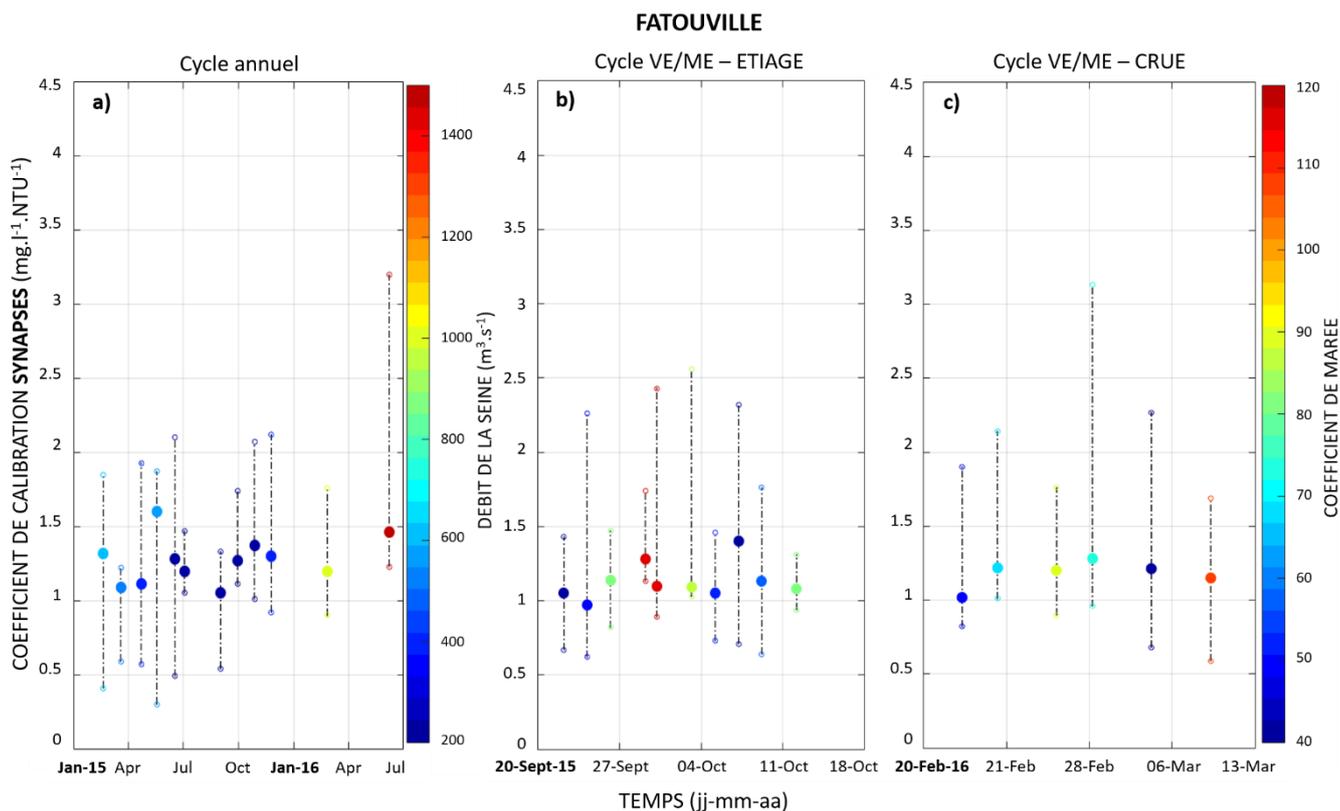


Figure 5 : Coefficients de calibration calculés à partir de données du réseau SYNAPSES, pour le cycle annuel (a) et le cycle VE/ME (b - c), à FATOUVILLE. Le coefficient de calibration et l'intervalle de confiance 'journalier' sont dessinés pour chacune des campagnes. Les barres de couleur représentent (a) le débit de la Seine pour le cycle saisonnier et (b - c) le coefficient de marée pour le cycle VE/ME.

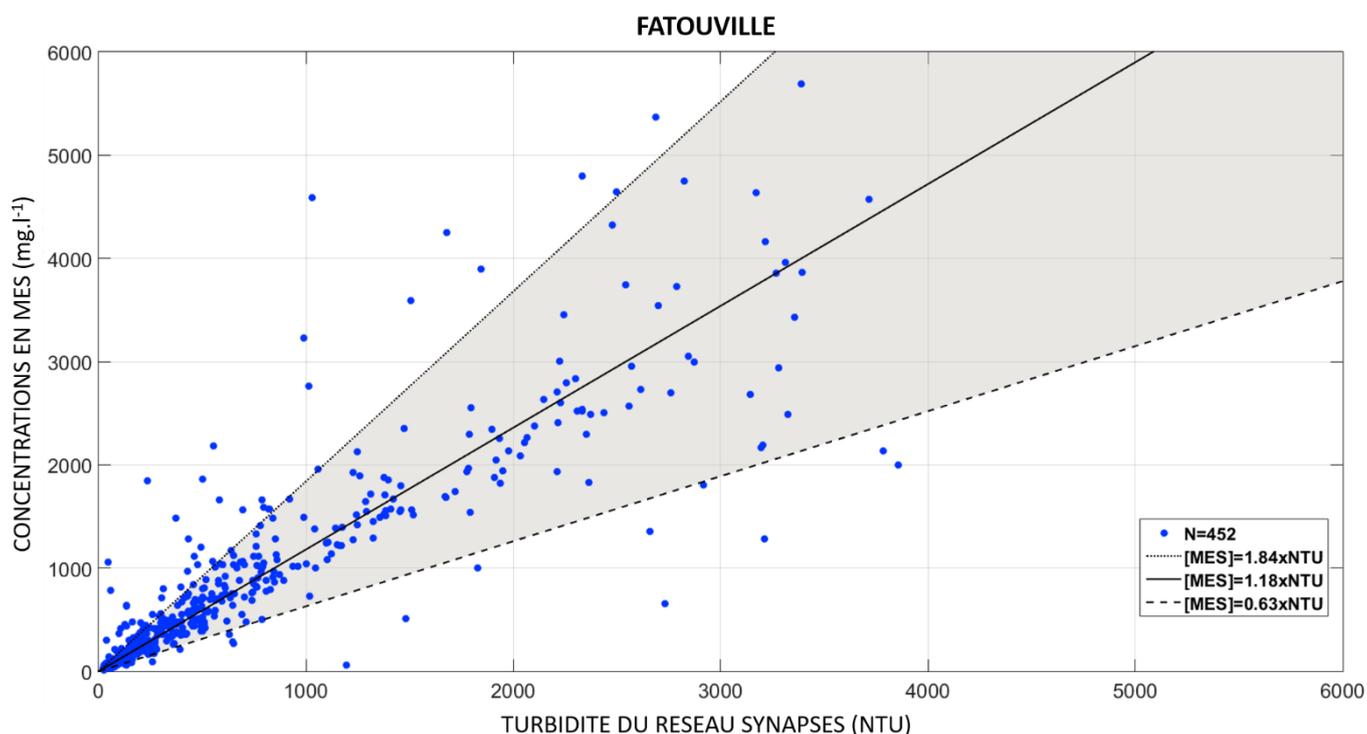


Figure 6 : Relation de calibration dite 'unique' (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour FATOUVILLE entre fév. 2015 et juin 2016.

1.2 Erreurs relatives calculées

La robustesse des coefficients de calibration ('journalier' et 'unique') est évaluée en calculant une erreur relative moyenne entre les valeurs de concentrations en MES mesurées et calculées à partir des coefficients de calibrations pour chacune des campagnes. L'erreur relative moyenne est définie comme suit :

$$\text{Erreur relative (\%)} = \left\langle \frac{[MES] \text{ théoriques (mg.l}^{-1}) - [MES] \text{ observées (mg.l}^{-1})}{[MES] \text{ observées (mg.l}^{-1})} \times 100 \right\rangle \quad (1)$$

La valeur de concentration calculées ($[MES] \text{ théoriques}$ en mg/l) est obtenue en multipliant les données de turbidité des instruments par le coefficient de calibration déterminé; et la valeur mesurées ($[MES] \text{ observées}$ en mg/l) correspond à la concentration obtenue par la pesée des filtrations réalisées à partir des prélèvements horaires.

Pour chaque campagne réalisée, 2 erreurs sont déterminées en calculant les concentrations en MES théoriques à partir (i) du coefficient de calibration 'journalier' et (ii) du coefficient de calibration 'unique'. Le but est d'estimer l'utilisation adéquate du coefficient de calibration, 'journalier' ou 'unique', dans la conversion des données de turbidité (NTU) en concentrations (mg/l) du réseau SYNAPSES.

Une illustration du calcul des erreurs relatives pour le site de Fatouville est disponible en Figure 7. Les deux erreurs relatives calculées sont du même ordre de grandeur et présentent des variations similaires, majoritairement entre 20% et 40%. L'utilisation du coefficient 'unique' commun à l'ensemble des campagnes n'engendrant pas significativement plus d'erreur que l'utilisation d'un coefficient journalier (moins de 10% d'écart entre les deux incertitudes), Il est donc proposé d'appliquer le coefficient de calibration 'unique' à l'ensemble des données de turbidité acquises par le réseau SYNAPSES à Fatouville.



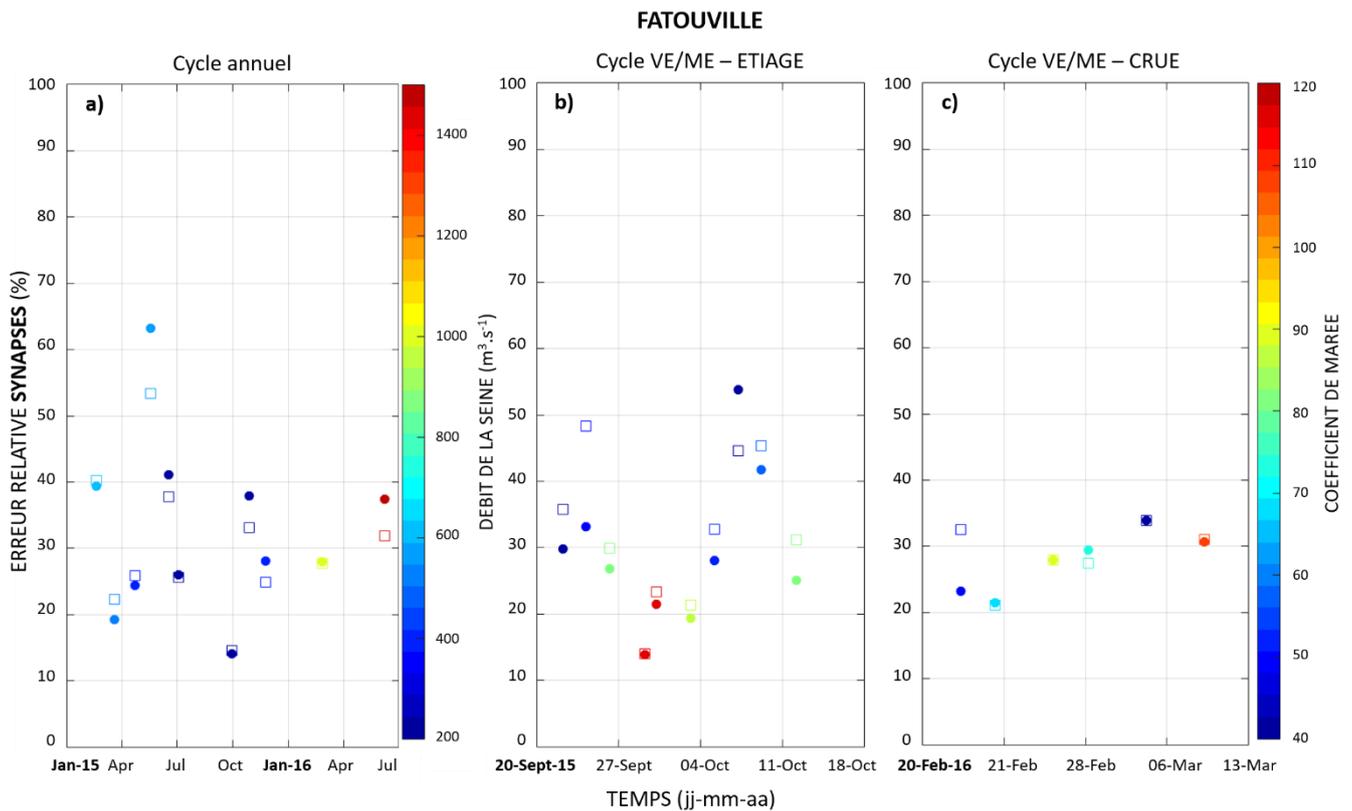


Figure 7 : Erreurs relatives du réseau SYNAPSES (%) calculées à partir du coefficient de calibration 'journalier' (symbole rond) et 'unique' (symbole carré) pour chacune des campagnes réalisées à FATOUVILLE, avec (a) le cycle annuel et (b - c) le cycle VE/ME. Les barres de couleur représentent (a) le débit de la Seine pour le cycle saisonnier et (b - c) le coefficient de marée pour le cycle VE/ME.

Sur le site de Fatouville, la transformation des données de turbidité du réseau SYNAPSES (acquises de l'échelle annuelle à l'échelle VE/ME) en concentration massique avec le coefficient de calibration 'unique', engendre une erreur relative moyenne de 31% comparée aux concentrations mesurées.

L'analyse des 3 autres sites étudiés permet de tirer des conclusions identiques, ainsi un coefficient de calibration 'unique' et une erreur relative moyenne associée sont calculés pour chaque site du réseau SYNAPSES. Les résultats sont présentés à la suite de cette partie.

2 Site de TANCARVILLE

De façon similaire aux observations de Fatouville, le coefficient de calibration « journalier » à Tancarville évolue très peu, entre 1.18 et 1.49 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ au cours de l'année (Figure 8) et sans corrélation spécifique avec le débit : approximativement le même coefficient de calibration autour de 1.4 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ est calculé en étiage (juillet 2015) et en crue (mars 2016). Les incertitudes relatives varient entre 20% et 45%, avec toutefois une variabilité saisonnière corrélée au débit : au-delà de 40% lorsque le débit est supérieur au débit moyen, en deçà de 30% sinon. Cette dynamique peut s'expliquer par les concentrations observées sur le site : i) en étiage (de juillet à octobre), le bouchon vaseux est situé à proximité de Tancarville, de fortes concentrations sont mesurées, qui sont généralement associées à de faibles incertitudes relatives ; ii) en crue, le bouchon vaseux est translaté en aval, et le bouchon vaseux n'atteint pas la station de Tancarville, qui est alors caractérisée par des concentrations plus faibles, mais également des incertitudes relatives plus fortes.

Pour Tancarville, le coefficient unique de calibration est évalué à 1.34 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ (Figure 9), avec des intervalles de confiance à 95% haut et bas de 2.25 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ et 1.07 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ respectivement. L'incertitude relative moyenne sur l'ensemble des prélèvements est de 47%.

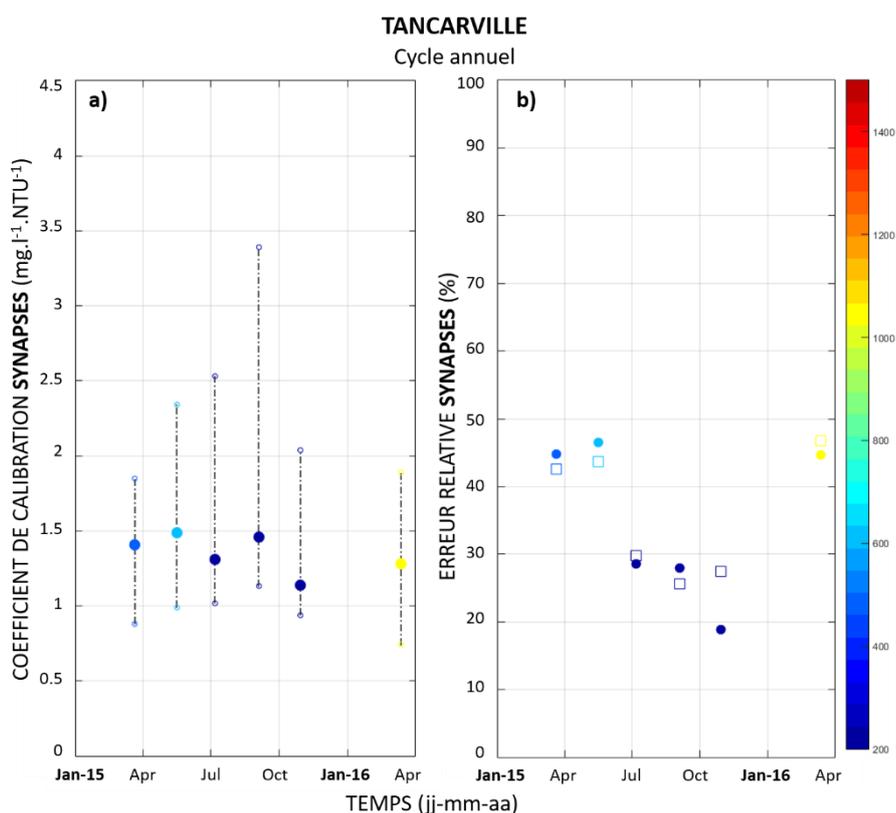


Figure 8 : (a) Coefficients de calibration calculés à partir de données du réseau SYNAPSES, pour le cycle annuel à TANCARVILLE. Le coefficient de calibration et l'intervalle de confiance 'journalier' sont dessinés pour chacune des campagnes. (b) Erreurs relatives du réseau SYNAPSES (%) calculées à partir du coefficient de calibration 'journalier' (symbole rond) et 'unique' (symbole carré) pour chacune des campagnes réalisées à TANCARVILLE, pour le cycle annuel. Les barres de couleur représentent le débit de la Seine.

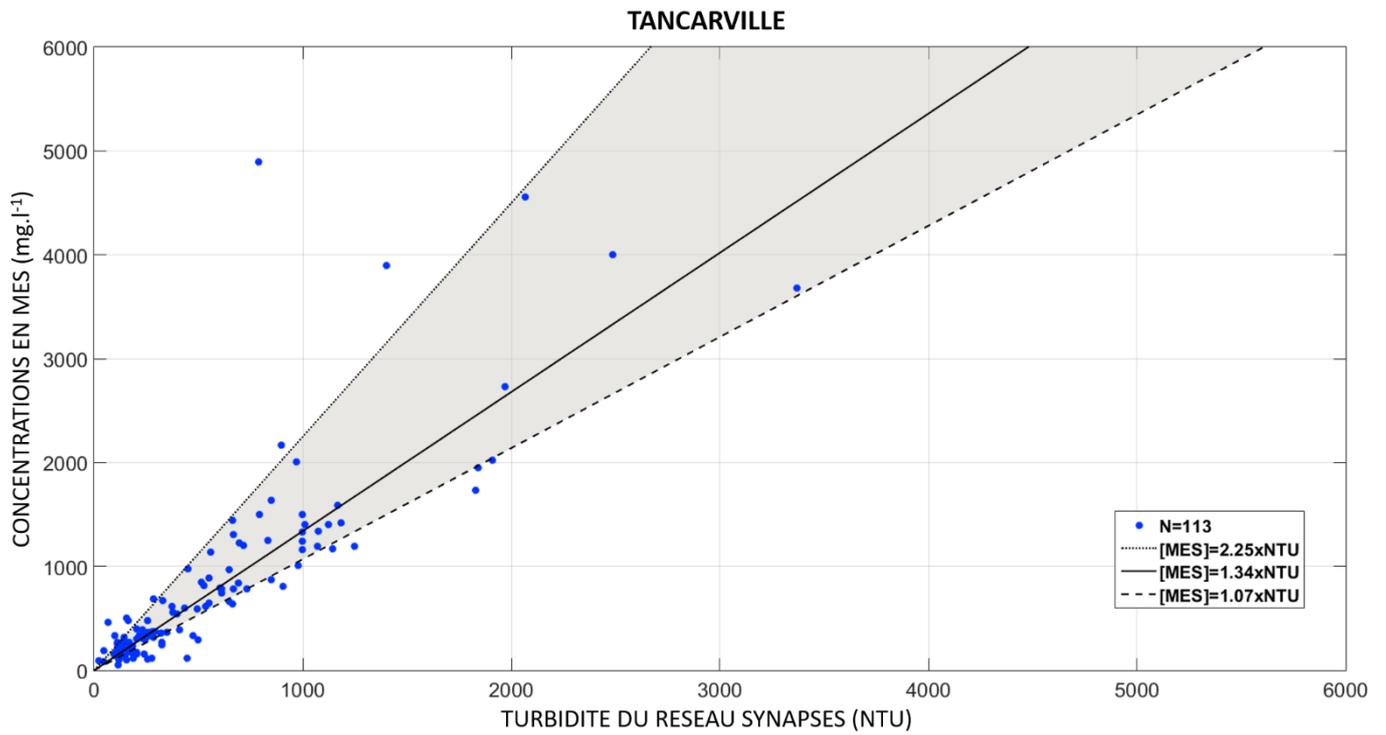


Figure 9 : Relation de calibration dite 'unique' (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour TANCARVILLE entre mars 2015 et mars 2016.

3 Site de VAL DES LEUX

La dynamique des coefficients de calibration est également faible sur le site amont de Val des Leux, variant entre 1.01 et 1.76 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$, à l'exception d'une campagne isolée, où une valeur supérieure à 2 est calculée (Novembre 2015 - Figure 10). Aucune variabilité n'est reliée au cycle VE/ME (valeurs entre 1.3 et 1.4 en crue ou étiage). Toutefois les erreurs relatives sont globalement plus importantes qu'à Fatouville (entre 20% et 50% - Figure 11) et présentent une variabilité saisonnière inversée par rapport à Tancarville : faible incertitude en crue, forte incertitude en étiage. Là encore la variabilité saisonnière des niveaux de MES est certainement associée à la dynamique crue/étiage, les concentrations en estuaire amont étant plus fortes en crues qu'en étiage. La calibration unique est de $1.31 \text{ mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$, avec un intervalle de confiance plus fin, de l'ordre de 30% de la valeur médiane, et une erreur relative moyenne de 25% (Figure 12 et Tableau 3).

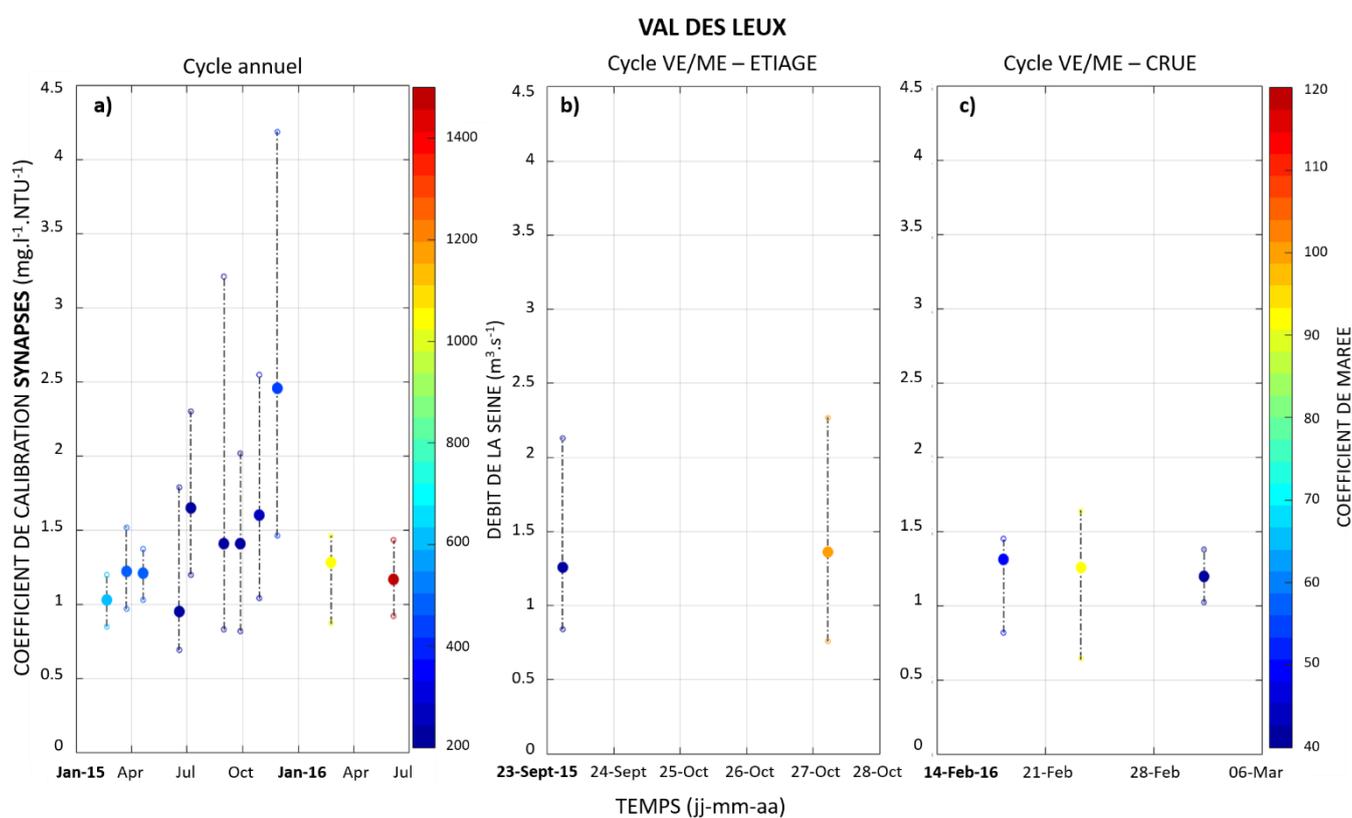


Figure 10 : Coefficients de calibration calculés à partir de données du réseau SYNAPSES, pour le cycle annuel (a) et le cycle VE/ME (b - c), à VAL DES LEUX. Le coefficient de calibration et l'intervalle de confiance 'journalier' sont dessinés pour chacune des campagnes. Les barres de couleur représentent (a) le débit de la Seine pour le cycle saisonnier et (b - c) le coefficient de marée pour le cycle VE/ME.

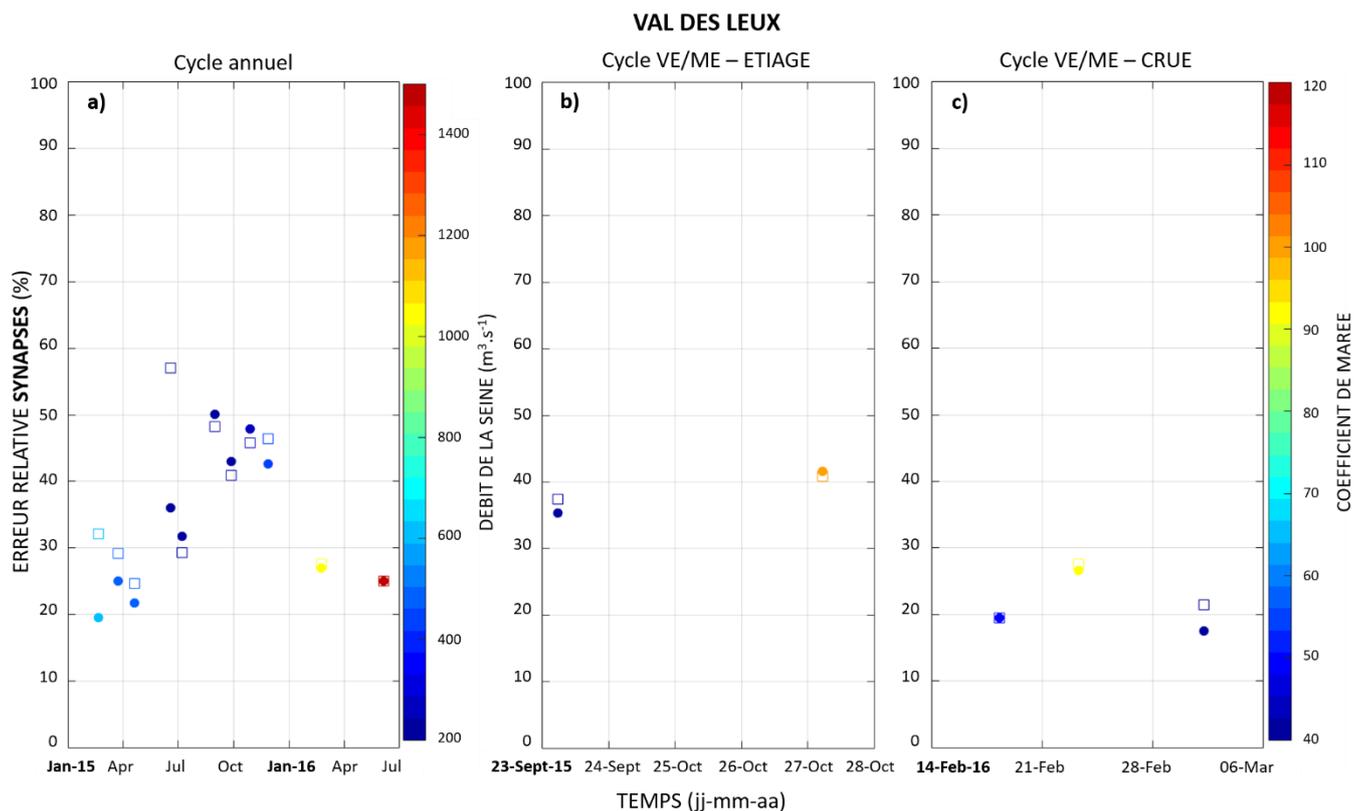


Figure 11 : Erreurs relatives du réseau SYNAPSES (%) calculées à partir du coefficient de calibration 'journalier' (symbole rond) et 'unique' (symbole carré) pour chacune des campagnes réalisées à VAL DES LEUX, avec (a) le cycle annuel et (b - c) le cycle VE/ME. Les barres de couleur représentent (a) le débit de la Seine pour le cycle saisonnier et (b - c) le coefficient de marée pour le cycle VE/ME.

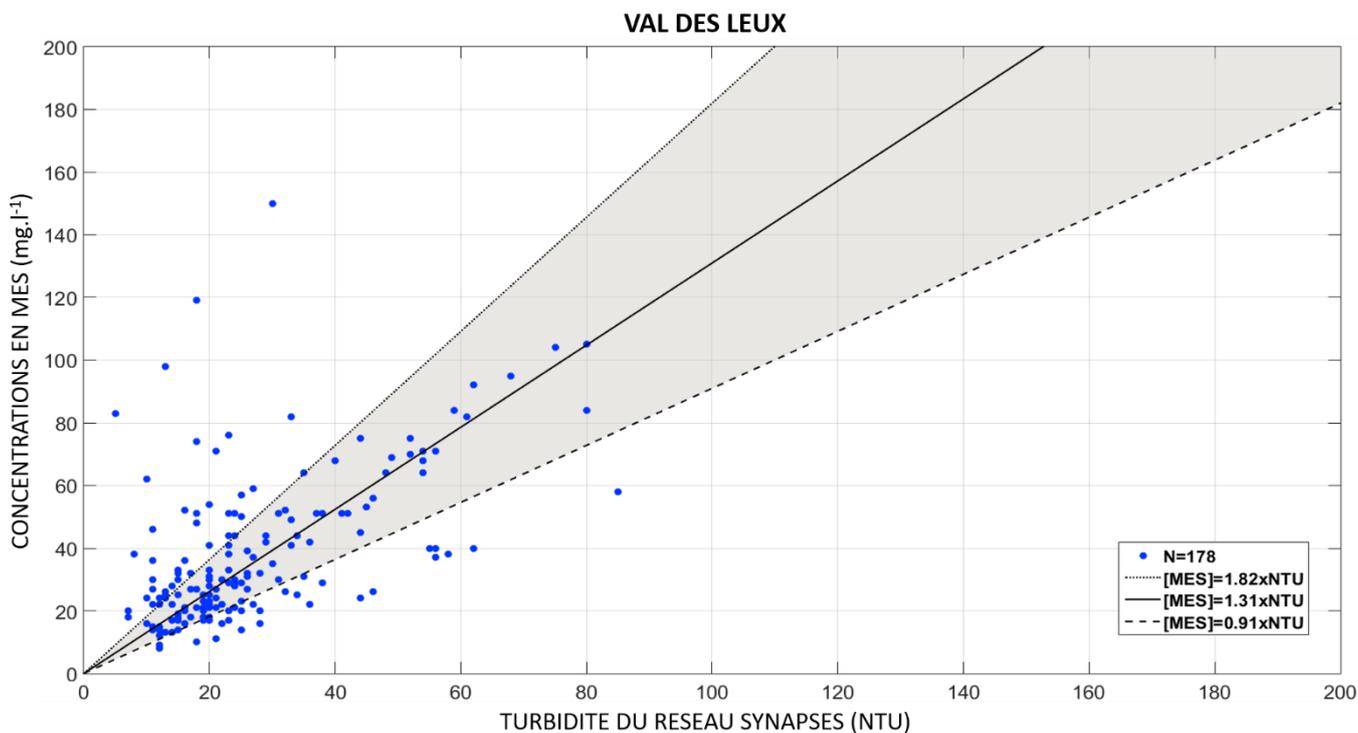


Figure 12 : Relation de calibration dite 'unique' (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour VAL DES LEUX entre février 2015 et juin 2016.

4 Site de ROUEN

Le site de Rouen présente des coefficients de calibration journaliers plus faibles que les autres sites (globalement entre 0.9 et 1.37 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ exception faite de la campagne en mars 2015, associée à un coefficient de 0.61 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ - Figure 13), mais des erreurs relatives du même ordre de grandeur. Aucune saisonnalité notable n'est observée pour les erreurs relatives. Le coefficient de calibration unique, évalué à 1.04 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$, n'introduit pas d'incertitude supplémentaire sauf pour la journée de mars 2015, qui traduit une forte dispersion des données acquises (Figure 14).

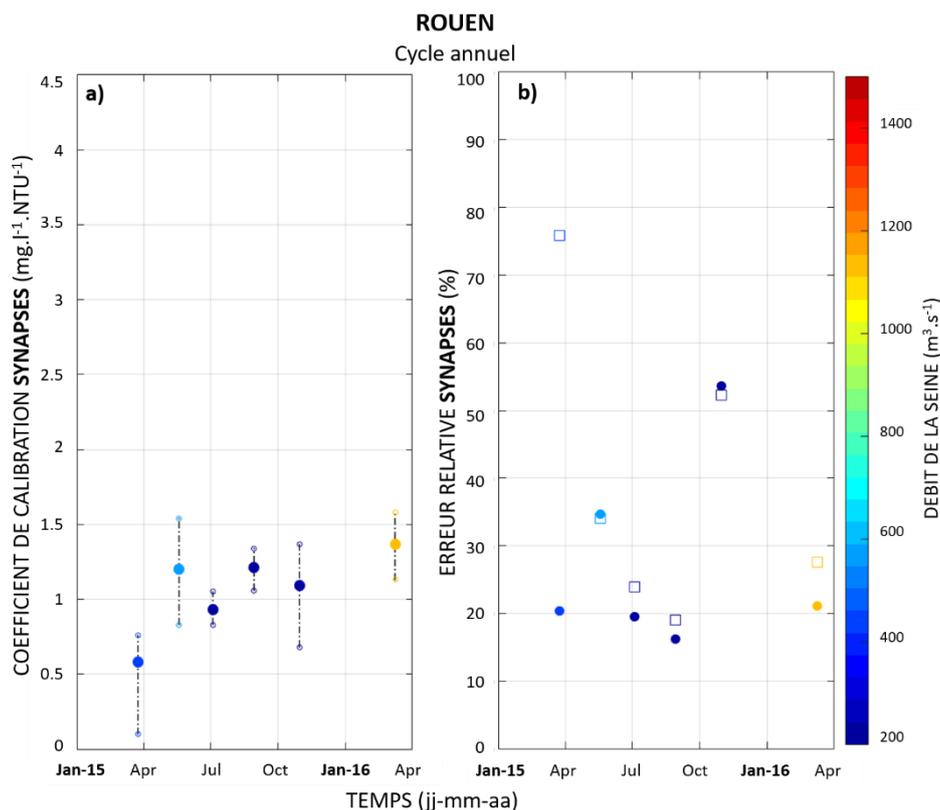


Figure 13 : (a) Coefficients de calibration calculés à partir de données du réseau SYNAPSES, pour le cycle annuel à ROUEN. Le coefficient de calibration et l'intervalle de confiance 'journalier' sont dessinés pour chacune des campagnes. (b) Erreurs relatives du réseau SYNAPSES (%) calculées à partir du coefficient de calibration 'journalier' (symbole rond) et 'unique' (symbole carré) pour chacune des campagnes réalisées à ROUEN, pour le cycle annuel. Les barres de couleur représentent le débit de la Seine.

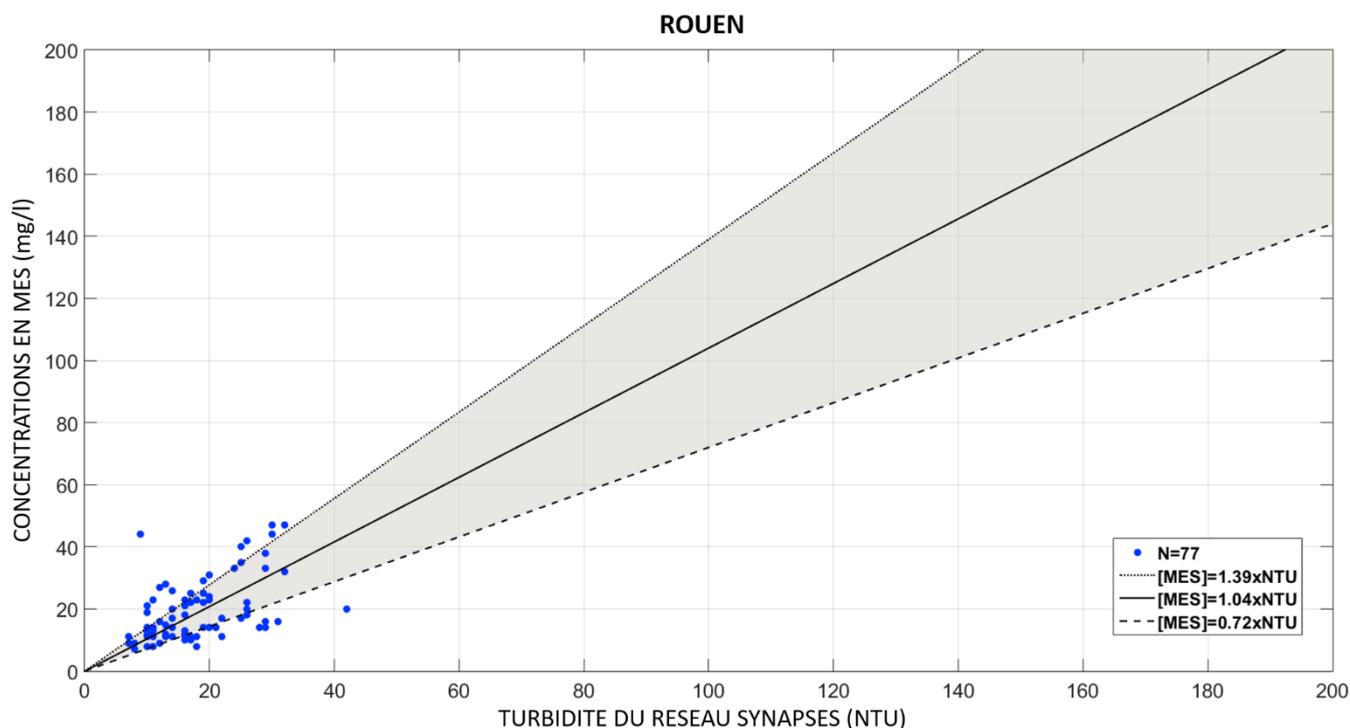


Figure 14 : Relation de calibration dite 'unique' (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée), pour ROUEN entre mars 2015 et mars 2016.

5 Calibration inter-sites

Les coefficients de calibration 'unique' obtenus précédemment montrent peu de variabilité entre les stations SYNAPSES (variabilité dite inter-sites variant entre 1.04 à 1.34 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$). Au vu de ces résultats, le choix d'une seule relation de calibration MES/turbidité a été testé pour l'ensemble des stations de l'Estuaire de Seine. La Figure 15 ci-dessous reprend l'ensemble des données de turbidité et des concentrations en MES acquises entre février 2015 et juin 2016 sur les sites de Fatouville (bleu) / Tancarville (bordeaux) / Val des Leux (jaune) et Rouen (vert). Après intégration de l'ensemble des données acquises, un coefficient de calibration de **1.21** $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ est obtenu, avec des courbes d'intervalle de confiance haut et bas de 0.59 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$ et de 2.22 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$. Une erreur relative moyenne est également définie à **36%**, plus importante que les valeurs de calibration uniques par site mais raisonnable en première approximation si aucune ou peu données de calibration ne sont disponibles, comme pour Balise A, cas traité ci-dessous.

De la même manière, 2 relations de calibration sont établies en fonction des compartiments amont (Rouen / Val des Leux : 1.27 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$) et aval (Tancarville / Fatouville : 1.21 $\text{mg.l}^{-1}.\text{NTU}^{-1}$) de l'Estuaire de Seine. Ces résultats sont repris sous forme d'un tableau de synthèse dans la dernière partie du rapport (Tableau 3).

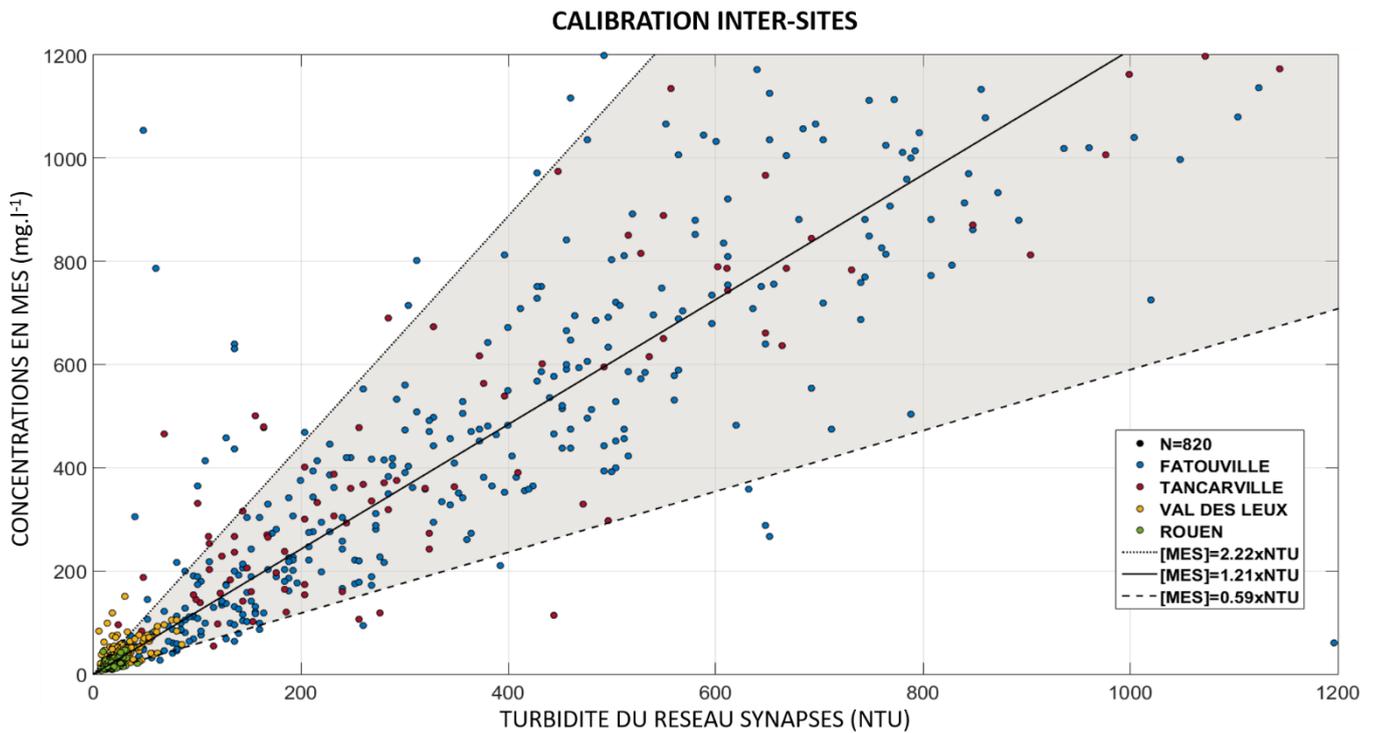


Figure 15 : Relation de calibration INTER-SITES (trait plein) entre le signal de turbidité obtenu à partir des données de turbidité du réseau SYNAPSES et les concentrations en MES calculées, avec l'estimation d'un intervalle de confiance à 95% (zone grisée).

A partir de cette nouvelle relation inter-sites, la représentativité des prélèvements réalisés à Balise A est évaluée. Pour rappel, une seule campagne de mesures a été faite sur ce site en mars 2015 pendant 5h. La Figure 16 ci-contre reprend (i) l'ensemble des données acquises sur chacune des stations SYNAPSES (points gris), (ii) la relation de calibration inter-sites définie précédemment et (iii) les prélèvements effectués à Balise A (points bleus). Ces derniers présentent une variabilité comparable à celle observée sur les autres sites. Les points sont globalement centrés autour de la droite de calibration (trait plein). L'utilisation du coefficient de calibration inter-sites est donc proposée pour quantifier les concentrations en MES sur le site de Balise A. La réalisation de prélèvements supplémentaires permettrait de confirmer cette hypothèse, et également d'associer une erreur relative des concentrations calculées pour le site de Balise A.

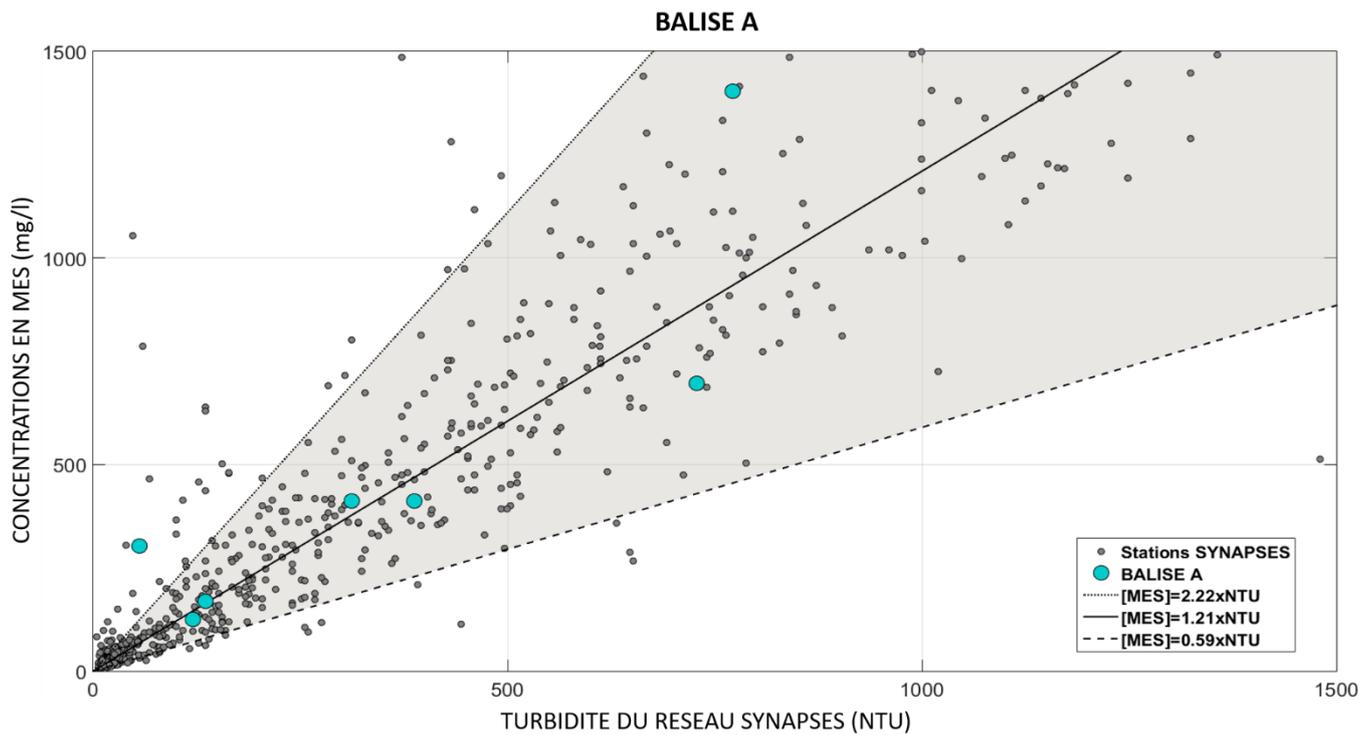


Figure 16 : Représentativité des points de prélèvements effectués à BALISE A (mars 2015) par rapport à la relation de calibration INTER-SITES présentée en Figure 15.

SYNTHESE DES RESULTATS

L'ensemble des résultats présentés précédemment est résumé dans le tableau de synthèse ci-dessous (Tableau 3). Un coefficient de calibration est déterminé pour chacune des stations du réseau SYNAPSES, pour les compartiments amont/aval de l'Estuaire de Seine (amont et aval) et pour l'ensemble des sites. Les erreurs relatives moyennes associées permettent d'évaluer la robustesse des relations établies.

La dispersion du coefficient de calibration, observée par l'intervalle de confiance, témoigne d'une variabilité annuelle propre à chaque site de mesure. Cette variabilité dite intra-site est plus importante que la variabilité dite inter-sites (variant entre 1.04 et 1.34 mg.l⁻¹.NTU⁻¹). Les coefficients de calibration 'individuels' s'avèrent être les plus fiables pour convertir les données de turbidité du réseau SYNAPSES (NTU) en concentrations de MES (mg.l⁻¹) dans la colonne d'eau.

Tableau 3 : Tableau de synthèse reprenant les coefficients de calibrations et les erreurs relatives calculés par stations de mesures, par compartiments spécifiques (amont et aval) et par regroupement de l'ensemble des sites. Le nombre de couples MES/NTU utilisé pour établir la relation de calibration est précisé.

Stations SYNAPSES	Coefficient de calibration	Intervalle de confiance		Erreur relative moyenne (%)	Nombre de couples MES/NTU
		Limite inférieure	Limite supérieure		
FATOUVILLE	1.18	0.63	1.84	31	452
TANCARVILLE	1.34	1.07	2.25	47	113
VAL DES LEUX	1.31	0.91	1.82	25	178
ROUEN	1.04	0.72	1.39	28	77
AVAL (Fatouville/Tancarville)	1.21	0.63	1.93	37	565
AMONT (Rouen/Val des Leux)	1.27	0.86	1.82	38	255
INTER-SITES	1.21	0.59	2.22	36	820



BIBLIOGRAPHIE

- Chapalain M., Verney R., Druine F., Fettweis M. and Le Hir P., 2016. **Dynamics of suspended particulate matter and related measurement uncertainties in coastal waters (Bay of Seine, France)**. 5th Particles in Europe conference (PiE), 03-05 October, 2016, Budapest, Hungary.
- Deloffre J., Druine F., Verney R., Lemoine J-P. and Lafite R., 2016. **Automated network in estuaries: challenging issues associated with sensor and SPM variability**. SPM Workshop, 24-25 February, 2016, Brussels, Belgium.
- Druine F., Lafite R., Deloffre J., Verney R. and Lemoine J-P., 2014. **Flux sédimentaires en estuaire de Seine : Quantification et variabilité multi-échelle sur la base de mesures de turbidité**. Réunion du SNO DYNALIT, 17 novembre 2014, Nantes, France.
- Druine F., Lafite R., Deloffre J., Verney R. and Lemoine J-P., 2015 (a). **Sediment fluxes in the Seine Estuary: quantification and variability based on suspended solid concentration**. 18ème Journées de l'Ecole Doctorale (JED EdNBISE), 26-27 mars 2015, Rouen, France.
- Druine F., Lafite R., Deloffre J., Verney R. and Lemoine J-P., 2015 (b). **Suspended solid concentration in the Seine Estuary based on the SYNAPSES Turbidity network: quantification and variability**. 13th International Conference on Cohesive Sediment Transport Processes (INTERCOH 2015), 07-11 September, 2015, Rouen, France.
- Druine F., Lafite R., Deloffre J., Verney R. and Lemoine J-P., 2016 (a). **Suspended solid concentration quantification and variability from an automated monitoring network (SYNAPSES)**. 19ème Journées de l'Ecole Doctorale (JED EdNBISE), 10-11 mars 2016, Rouen, France.
- Druine F., Lafite R., Deloffre J., Verney R. et Lemoine J-P., 2016 (b). **Quantification et variabilité des concentrations en MES dans l'estuaire de Seine, sur la base de mesures de turbidité (SYNAPSES)**. 25^{ème} Réunion des Sciences de la Terre (RST), 24-26 Octobre 2016, Caen, France.
- Druine F., Lafite R., Deloffre J., Verney R. and Lemoine J-P., 2016 (c). **Suspended particulate matter dynamics from optical backscatter sensor calibrations (Seine Estuary, France)**. 5th Particles in Europe conference (PiE), 03-05 October, 2016, Budapest, Hungary.
- Landemaine, V., Cerdan, O., Laignel, B., Fournier, M., and Copard, Y., 2014. **Estimating of suspended sediment loads of rivers in the Seine downstream basin and coastal rivers in Southeastern Channel**. EGU General Assembly 2014, 27 April – 2 May, 2014 in Vienna, Austria.
- Landemaine, V., 2016. **Erosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle**. PhD Thesis, University of Rouen, 234 pp.

POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval
Pôle Régional des Savoirs
115 boulevard de l'Europe
76100 ROUEN
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

Flavie DRUINE, Robert LAFITE, Julien DELOFFRE, Romaric VERNEY et Jean-Philippe LEMOINE, 2016. **SUSPENSE : Rapport technique sur la variabilité des coefficients de calibration NTU/mg.l-1 du réseau SYNAPSES**. Rapport Seine-Aval 5, 27p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :

