



Suivi de la turbidité des eaux de Guyane. Etat des lieux et recommandations. Approche par télédétection

Rapport final

BRGM/RP-61632-FR

Avril 2014



Suivi de la turbidité des eaux de Guyane. Etat des lieux et recommandations. Approche par télédétection

Rapport final

BRGM/RP-61632-FR

Avril 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets
d'appui aux politiques publiques du BRGM 2011-2013 avec le soutien
de la DEAL Guyane

A. Blum, O. Rouzeau, Guiraud (Kalitéô)

Avec la collaboration de
S. Bourdaa, B. Joseph



Vérificateur :

Nom : S. Chevrel

Date : 06/06/2014

Signature :

Original signé

Approbateur :

Nom : J.-M. Mompelat

Date : 10/06/2014

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : cours d'eau, eau de surface, masses d'eau de surface, réseau, Guyane, turbidité, télédétection, SPOT, matières en suspension, réseau, données.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Blum A., Rouzeau O., Guiraud A. (2014), Suivi de la turbidité des eaux de Guyane. Etat des lieux et recommandations. Approche par télédétection. Rapport BRGM/RP-61632-FR.

Synthèse

En Guyane, la grande majorité de la population est alimentée en eau potable par les eaux de surface prélevées dans les différents fleuves que compte le département. Par rapport à la turbidité, cette eau peut être rendue impropre i) du fait du marnage au niveau des zones d'influence de la marée dans les fleuves, ce qui provoque une remise en mouvement importante des sédiments fluviaux et/ou marins, et ii) du fait de l'activité minière, essentiellement alluvionnaire, qui peut induire dans le réseau hydrographique en aval des sites d'orpaillage, le transfert d'énormes quantités de boues.

De nombreux acteurs (OEG, DEAL, IRD, ONF, Police de l'eau, PAG, HYDRECO, BRGM, FAG, ARS...) tentent depuis quelques années d'avoir un état de la turbidité des cours d'eau dans des secteurs spécifiques, à un pas de temps plus ou moins régulier. Malgré la variété des objectifs poursuivis par chacun (police de l'eau, lutte contre l'orpaillage illégal, suivi réglementaire en application de la directive cadre sur l'eau, protection des captages d'eau potable, etc....), la question de la mise en commun de ces données et d'un suivi partagé et rationalisé de la turbidité des eaux de Guyane se pose. Les difficultés et les coûts d'accès de certains secteurs renforcent la nécessité d'optimiser les efforts de surveillance, de contribuer à la mise en place d'un réseau commun et d'identifier de nouvelles approches pour suivre l'évolution de la turbidité.

L'augmentation anormale de la turbidité a par ailleurs des conséquences importantes et peut contribuer à la dégradation de l'état écologique des masses d'eau du district hydrographique Guyane (Comité de Bassin, 2014). Malgré ces enjeux, l'évaluation de l'état des masses d'eau de surface au regard du paramètre « turbidité » reste complexe, notamment en l'absence de norme de qualité dans les textes européens (Directive cadre sur l'eau 2000/60/CE et directive fille sur les substances prioritaires 2008/105/CE) et dans les arrêtés d'application (arrêté du 25 janvier 2010). Il conviendrait à l'avenir d'identifier une valeur seuil pour le paramètre turbidité pour la Guyane. Cette réflexion doit s'appuyer sur un état des lieux des données disponibles et sur une analyse statistique des valeurs généralement observées dans les milieux non impactés par les activités humaines.

Devant ces constats, la DEAL Guyane et le BRGM se sont associés pour :

- **Réaliser une expertise des données et des réseaux existants** : à partir du rassemblement de toutes les données disponibles et de la création d'un SIG, il s'agit d'analyser les forces et les faiblesses du réseau actuel (zones bien couvertes, zones sans données, acteurs impliqués, historiques, pérennité de la mesure, protocoles, matériels, etc....).

Près de 1500 données de turbidité remontant à 1988 ont ainsi été rassemblées pour constituer la première base de données de turbidité en Guyane. Cette base a permis de mieux cerner la répartition géographique des stations

existantes et les acteurs impliqués. Cet état des lieux a ensuite permis de faire des propositions pour améliorer le suivi de la turbidité en Guyane. Ces propositions portent sur la collecte des données, leur bancarisation, leur mise à disposition et sur les mesures à prendre pour renforcer ou optimiser la surveillance. Il en ressort que les données sont déjà très complètes mais que, d'une part la fréquence annuelle doit être renforcée sur beaucoup de stations (notamment en saison des pluies, période où la turbidité augmente), d'autre part que certaines zones restent, malgré l'importance des enjeux, trop peu surveillées (Lawa, Maroni, Mana notamment). Par ailleurs, à partir de cette analyse de l'existant, les bases d'un futur « méta-réseau » régional sont jetées, et des pistes sont données pour organiser et optimiser la circulation des données. L'utilisation d'un portail web pour collecter, diffuser et valoriser les données semble incontournable.

Cet exercice a également mis en évidence l'importance de la qualité de la donnée et les incertitudes de mesures qui existent d'un producteur à l'autre. La nécessité d'harmoniser les méthodes et les pratiques est devenue évidente, et a abouti à la publication **du premier guide technique de la turbidité en Guyane**. Ce guide, véritable document de référence pour les agents de terrain, est un pas important pour l'acquisition de données comparables entre elles et vers un futur réseau régional. Ce document a été accueilli très favorablement par les producteurs de données, témoignant ainsi de la dynamique qui existe en Guyane autour de cette question.

- **Animer le réseau d'acteurs impliqués dans le suivi de la turbidité en Guyane.** L'objectif était de fédérer tous les « acteurs du suivi de la turbidité » dans un collectif appelé à gérer et interpréter le réseau de mesures, associant pourvoyeurs de données (OEG, IRD, ONF, Police de l'eau, HYDRECO, BRGM, IFREMER, BRGM...) et utilisateurs finaux (services de la DEAL, Préfecture, Comité de Bassin, Collectivités...). Il s'agissait également de partager des expériences et, si possible, de mettre en commun des méthodes.

Dans ce cadre, au-delà de l'organisation de plusieurs réunions de pilotage du projet, la première journée technique réunissant tous les acteurs en charge, sur le terrain, de faire les mesures de turbidité, a été organisée. Un essai d'inter-comparaison des turbidimètres a mis en évidence que, pour une même eau ou un même étalon, la variabilité des mesures relevées par les différents appareils pouvait atteindre 40%. Ceci rappelle l'importance de la gestion du matériel et l'œil critique que l'on doit conserver sur les valeurs relevées.

- **Etudier la possibilité d'approcher la mesure de la turbidité par télédétection.** L'idée était d'évaluer si une corrélation entre les paramètres acquis par SPOT (réflectance) et la valeur de la turbidité des cours d'eau en surface existe. L'analyse de cette corrélation était motivée par la possibilité, jusqu'à 2013, d'utiliser gratuitement les images SPOT 5 acquises par la station SEAS-Guyane située à l'IRD. La DEAL et l'ONF ont par le passé déjà mené de tels tests mais, en l'absence de données suffisantes, ceux-ci n'avaient pas été concluants. Il était donc ici proposé, à partir de mesures de terrain synchrones

avec le passage du satellite SPOT 5, d'affiner la possibilité d'utiliser cette méthode.

Après plusieurs tests sur le terrain, l'expérimentation a montré que les **valeurs de réflectance enregistrées par les satellites SPOT pouvaient effectivement être comparées aux valeurs de turbidité des rivières de Guyane.**

Une étude sur le Kourou, où des mesures de turbidité ont été réalisées en synchrone avec une acquisition du satellite SPOT 5 le 14 novembre 2012, montre une excellente corrélation des bandes XS1 (vert) et XS2 (rouge) avec un coefficient R^2 de 0,973.

Appliquée aux valeurs d'archive de turbidité du département et malgré l'accès à la totalité des données images d'archives du SEAS-Guyane, les résultats obtenus sont décevants. Plusieurs hypothèses à cet état de fait :

- Les méthodes de mesure de la turbidité ne sont pas standardisées ou ont pu évoluer au cours du temps (appareillage, protocole d'échantillonnage...).
- La localisation des points historiques n'est pas bonne, ou prise en bordure de rivière, si bien qu'il n'est pas possible d'avoir exactement le même point sur les images satellites.
- Les dates entre mesure en rivière et images satellite sont trop décalées dans le temps.
- Le traitement des images, notamment la transformation du signal enregistré en réflectance, pourrait être amélioré.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Généralités	15
2.1. DEFINITIONS	15
2.1.1. Turbidité	15
2.1.2. Matières en suspension (MES)	16
2.2. PRINCIPALES TECHNIQUES DE MESURES	17
2.2.1. Turbidité	17
2.2.2. Matières en suspension	18
2.3. RELATIONS TURBIDITÉ - MES	19
2.4. NORMES ET SEUILS	21
2.4.1. Normes et valeurs guides pour les cours d'eau	21
2.4.2. Normes pour les rejets d'eaux usées	22
2.5. LA TURBIDITÉ EN GUYANE	22
3. Etat des lieux des mesures turbidité en Guyane	25
3.1. HISTORIQUE DES MESURES	25
3.2. PERENNITÉ DES DISPOSITIFS DE SUIVI	27
3.3. REPARTITION SPATIALE DES POINTS DE MESURES.....	27
3.4. PRODUCTEURS DE DONNÉES	29
3.5. LES PRINCIPAUX RÉSEAUX DE SUIVI DE LA TURBIDITÉ.....	31
3.6. FRÉQUENCES DE MESURE DES PRINCIPAUX RÉSEAUX.....	34
3.7. LIMITES DES DONNÉES COLLECTÉES	34
4. Recommandations pour la mise en place d'un réseau régional de suivi de la turbidité en Guyane.....	37
4.1. RECOMMANDATIONS POUR LE DIMENSIONNEMENT DU RÉSEAU RÉGIONAL.....	38
4.1.1. Pourquoi mettre en place un réseau régional ?	38
4.1.2. Où faire les mesures de turbidité ?.....	38

4.1.3. Quand et à quelle fréquence effectuer ces mesures.....	40
4.1.4. Comment réaliser les mesures ?	41
4.1.5. Vers un réseau régional ?.....	41
4.2. COLLECTE, BANCARISATION ET DIFFUSION DES DONNÉES.....	42
4.2.1. Format des données.....	42
4.2.2. Circulation des données, diffusion, valorisation	45
5. Animation du réseau d'acteurs	49
6. Approche par télédétection de la turbidité des cours d'eau de Guyane – Généralités.....	53
6.1. CONTRAINTES LIÉS À L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION	54
6.2. LA STATION SEAS-GUYANE	55
7. Manipulations expérimentales de mesures de turbidité synchrones avec le passage de SPOT	57
7.1. PROTOCOLE D'ACQUISITION DES DONNÉES	57
7.2. MÉTHODE DE TRAITEMENT DES IMAGES	59
7.2.1. Format de mise à disposition	60
7.2.2. Corrections atmosphériques des images.....	61
7.2.3. Le passage en luminance.....	61
7.2.4. Correction des effets atmosphériques	61
7.2.5. Corrections géométriques.....	64
7.3. RÉSULTAT OBTENUS SUR LE KOUROU LE 14 NOVEMBRE 2012	65
7.3.1. Les mesures de turbidité en rivière	65
7.3.2. Les valeurs de réflectance mesurées	66
7.3.3. Résultats statistiques obtenus	67
8. Approche statistique sur les valeurs de turbidité d'archives	75
8.1. BASE DE DONNÉES DES VALEURS DE TURBIDITÉ	75
8.2. COLLECTE DE DONNÉES D'ARCHIVE DE SPOT IMAGE	75
8.3. APPROCHE STATISTIQUE	76
8.4. CAS DE LA RIVIÈRE DE LA COMTÉ.....	80
9. Conclusions et perspectives	83

10. Bibliographie 85

Liste des illustrations

Illustration 1 : Classification des MES et des matériaux utilisés en métrologie. D'après Levine et al. (1985) dans Marechal (2000).	16
Illustration 2 : Disque de Secchi (utilisation in situ).	17
Illustration 3 : Principe et appareil de mesure turbidimètre. Exemple avec le modèle HANNA Instrument.	18
Illustration 4 : relation entre les mesures de turbidité (NTU) et les teneurs en MES (mg/L d'eau filtrée) dans un bassin versant guyanais. D'après Laperche et al. (2013).	20
Illustration 5 : Seuils d'aptitude à la biologie pour les paramètres MES et turbidité. D'après le SEQ-EAU version 2, 2001. Valeurs non réglementaires.	22
Illustration 6 : Confluence entre l'Inini, impactée par l'orpaillage illégal, et le Lawa (Maroni).	23
Illustration 7 : Evolution de la localisation des points de suivi de 1995 à 2012.	26
Illustration 8 : Répartition entre données de turbidité et de MES ponctuelles et données faisant partie d'un réseau de mesure.	27
Illustration 9 : Répartition spatiale de l'ensemble des stations de mesures collectées. Chaque point signifie qu'il existe au moins une mesure sur cette localisation.	28
Illustration 10 : Tableau récapitulatif des producteurs de données de turbidité en Guyane et nombre de données acquises.	30
Illustration 11 : Répartition des mesures par opérateur.	31
Illustration 12 : Localisation des stations appartenant à un réseau	33
Illustration 13 : Estimation du nombre de mesures par an et par producteur de données.	34
Illustration 14 : Impacts liés à l'orpaillage illégal. D'après Comité de Bassin (2014).	39
Illustration 15 : Champs à renseigner pour la bancarisation et l'envoi des données à l'organisme en charge de la centralisation.	43
Illustration 16 : Modèle de fiche de métadonnée proposé.	45
Illustration 17 : Schéma proposé pour la circulation des données du producteur à la diffusion.	46
Illustration 18 : journée technique d'échange sur le suivi de la turbidité en Guyane.	49
Illustration 19 : Essai d'intercalibration organisé à l'occasion de la journée technique d'échange du 16 avril 2013.	50
Illustration 20 : Tableau de synthèse des valeurs relevées par les participants lors de l'essai d'intercalibration organisé le 16 avril 2013.	51
Illustration 21 : Résultats de l'essai d'intercomparaison. Ecart et variabilité inter-organisme par gamme d'étalon.	51
Illustration 22 : Cercle de visibilité de la station SEAS-Guyane.	55

Illustration 23 : Profil de turbidité réalisé sur la Mana, le 14 mars 2012	57
Illustration 24 : Profil de turbidité réalisé sur l'Approuague, le 15 mars 2012	57
Illustration 25 : Images SPOT prises au cours des mesures synchrones sur la Mana (à gauche) et sur l'Approuague (à droite).	58
Illustration 26 : Localisation de la zone d'étude sur le Kourou.	59
Illustration 27 : Points de mesures de turbidité sur le Kourou le 14 novembre et image SPOT 5.	59
Illustration 28 : Logigramme de la méthodologie de traitement des images SPOT.	60
Illustration 29 : Paramètres principaux pour la correction atmosphérique de la scène SPOT du 14/11/2012.	62
Illustration 30 : Schéma explicatif expliquant les différentes valeurs d'angle.	64
Illustration 31 : Tableau des mesures de turbidité sur le Kourou le 14/11/2012	65
Illustration 32 : Tableau des valeurs de réflectance par bandes spectrales de SPOT.	66
Illustration 33 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } XS1)$	68
Illustration 34 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } XS1)$	68
Illustration 35 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } XS2)$	69
Illustration 36 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } XS2)$	69
Illustration 37 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } XS3)$	70
Illustration 38 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } XS3)$	70
Illustration 39 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } SWIR)$	71
Illustration 40 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } SWIR)$	71
Illustration 41 : Valeurs de turbidité en fonction des valeurs de réflectance des bandes spectrales de SPOT.....	72
Illustration 42 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance moyenne } XS1 \text{ et } XS2)$	73
Illustration 43 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance moyenne } XS1 \text{ et } XS2)$	73
Illustration 44 : Carte de la turbidité sur le Kourou.	74
Illustration 45 : Exemple d'une scène sur le Maroni avec a) très peu de couverture nuageuse – 7% b) avec 22% de couverture nuageuse c) avec 50% de couverture nuageuse.	76
Illustration 46 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité \text{ mesurée (archive)} = Turbidité \text{ calculée}$	77
Illustration 47 : Site de mesure pris certainement en bordure de rivière.	78
Illustration 48 : Effet de la profondeur de l'eau sur le pourcentage d'UVA (Fiche technique # 7 SODIS).....	78

Illustration 49 : Relation entre la profondeur de l'eau, la turbidité et la production végétale aquatique (Robert J. , 1961).....	79
Illustration 50 : Exemple d'images de réflectance sur 3 sites guyanais.....	79
Illustration 51 : Tableau des réflectances mesurées sur le site de la Comté.	80
Illustration 52 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue sur le site de la Comté.....	81

Liste des annexes

Annexe 1 Guide technique pour le suivi de la turbidité en Guyane	87
Annexe 2 Fiche d'intercalibration utilisée pour la journée technique.....	89
Annexe 3 Les satellites SPOT	93
Annexe 4 Protocole de mesures de la turbidité des sections de cours d'eau choisis au passage du satellite SPOT5.....	99
Annexe 5 Début du fichier METADATA.DIM de la scène SPOT du 14/11/2012.....	103
Annexe 6 Le modèle FLAASH (extrait du User's Guide d'ENVI).....	109
Annexe 7 Liste des scènes SPOT associées aux mesures de turbidité en rivière.....	113

Liste des abréviations

AEP – Alimentation en Eau Potable

ARS – Agence Régionale de Santé

BRGM – Bureau des Recherches Géologiques et Minières

DAF – Direction Agriculture et Forêt

DEAL – Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

DCE – Directive cadre sur l'eau 2000/60/CE

FAG – Forces Armées de Guyane

IRD – Institut de Recherche et de Développement

MES – Matières en Suspension

NQE – Normes de Qualité Environnementale

OEG – Office de l'Eau de Guyane

ONEMA – Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

ONF – Office Nationale des Forêts

PAG – Parc Amazonien de Guyane

SDAGE – Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

Remerciements

IRD – SEAS Guyane (C. CHARRON) pour la programmation des satellites et les échanges sur l'approche par télédétection.

Membres du comité de pilotage de l'étude : Stephanie REY, Myriam DEBRIS (DEAL), Franck CHOW-TOUN (OEG), Jean-Manuel FERNANDEZ (Gendarmerie), Vincent DIRIS (FAG) Régis VIGOUROUX, Philippe CERDAN (HYDRECO), Alain COPPEL (ONF), Bertrand GOGUILLON, Pierre JOUBERT (PAG), B. VAN GASTEL (ARS).

1. Introduction

La turbidité d'une eau constitue un paramètre essentiel de sa qualité. L'apport plus ou moins important de matières solides en suspension dans l'eau vient en effet détériorer son état, pouvant perturber très significativement le milieu aquatique (allant jusqu'à le rendre inapte aux conditions de vie pour la faune et la flore), et son aptitude à la production d'eau potable.

En Guyane, la grande majorité de la population est alimentée en eau potable par les eaux de surface prélevées dans les différents fleuves que compte le département. Par rapport à la turbidité, cette eau peut être rendue impropre i) du fait du marnage au niveau des zones d'influence de la marée dans les fleuves, ce qui provoque une remise en mouvement importante des sédiments fluviaux et/ou marins, et ii) du fait de l'activité minière, essentiellement alluvionnaire, qui peut induire dans le réseau hydrographique en aval des sites d'orpaillage, le transfert d'importantes quantités de boues. L'augmentation anormale de la turbidité et la pollution liée à l'utilisation illégale du mercure sont les deux enjeux majeurs de la préservation de la qualité des cours d'eau de Guyane (SDAGE 2010-2015).

De nombreux acteurs (OEG, DEAL, IRD, ONF, Police de l'eau, PAG, HYDRECO, BRGM, FAG, ARS, ...) tentent depuis quelques années d'avoir un état de la turbidité des cours d'eau dans des secteurs spécifiques, à un pas de temps plus ou moins régulier. Malgré la variété des objectifs poursuivis par chacun (police de l'eau, lutte contre l'orpaillage illégal, suivi réglementaire en application de la directive cadre sur l'eau, protection des captages d'eau potable, etc.), la question de la mise en commun de ces données et d'un suivi partagé et rationalisé de la turbidité des eaux de Guyane se pose. Les difficultés et les coûts d'accès de certains secteurs renforcent la nécessité d'optimiser les efforts de surveillance, de contribuer à la mise en place d'un réseau commun et d'identifier de nouvelles approches pour suivre l'évolution de la turbidité.

L'augmentation anormale de la turbidité a par ailleurs des conséquences importantes et peut contribuer à la dégradation de l'état écologique des masses d'eau du district hydrographique Guyane (Comité de Bassin, 2014). Malgré ces enjeux, l'évaluation de l'état des masses d'eau de surface au regard du paramètre « turbidité » reste complexe, notamment en l'absence de norme de qualité dans les textes européens (Directive cadre sur l'eau 2000/60/CE et directive fille sur les substances prioritaires 2008/105/CE) et dans les arrêtés d'application (arrêté du 25 janvier 2010). Il conviendrait à l'avenir d'identifier une valeur seuil pour le paramètre turbidité pour la Guyane. Cette réflexion doit s'appuyer sur un état des lieux des données disponibles et sur une analyse statistique des valeurs généralement observées dans les milieux non impactés par les activités humaines.

Devant ces constats, la DEAL Guyane a sollicité l'expertise du BRGM Guyane pour :

- **Réaliser une expertise des données et des réseaux existants** : à partir du rassemblement de toutes les données disponibles et de la création d'un SIG, il s'agit d'analyser les forces et les faiblesses du réseau actuel (zones bien couvertes, zones sans données, acteurs impliqués, historiques, pérennité de la mesure, protocoles, matériels, etc....). Cet état des lieux, qui fait l'objet du chapitre 3 du présent rapport, doit ensuite permettre de faire des propositions pour améliorer le suivi de la turbidité en Guyane. Ces propositions sont développées dans le chapitre 4. Elles portent sur la collecte des données, leur bancarisation, leur mise à disposition et sur les mesures à prendre pour renforcer ou optimiser la surveillance.
- **Animer le réseau d'acteurs impliqués dans le suivi de la turbidité en Guyane**. L'objectif est de fédérer tous les « acteurs du suivi de la turbidité » dans un collectif appelé à gérer et interpréter le réseau de mesures, associant pourvoyeurs de données (OEG, IRD, ONF, Police de l'eau, HYDRECO, BRGM, IFREMER, BRGM...) et utilisateurs finaux (services de la DEAL, Préfecture, Comité de Bassin, Collectivités...). Il s'agit également de partager des expériences et, si possible, de mettre en commun des méthodes. Les actions entreprises dans ce cadre sont exposées dans le chapitre 5 du rapport.
- **Etudier la possibilité d'approcher la mesure de la turbidité par télédétection**. L'idée est d'évaluer si une corrélation entre les paramètres acquis par SPOT (réflectance) et la valeur de la turbidité des cours d'eau en surface existe. L'analyse de cette corrélation est motivée par la possibilité d'utiliser gratuitement les images SPOT 5 acquises par la station SEAS-Guyane située à l'IRD. La DEAL et l'ONF ont par le passé déjà mené de tels tests mais, en l'absence de données suffisantes, ceux-ci n'avaient pas été concluants. Il est donc proposé aujourd'hui, à partir de mesures de terrain synchrones avec le passage du satellite SPOT 5, d'affiner la possibilité d'utiliser cette méthode. Les chapitres 6, 7 et 8 détaillent la méthodologie employée et les résultats obtenus.

Pour mener à bien ces missions, le BRGM s'est appuyé sur le bureau d'études KALITEO-Environnement qui a ainsi contribué à plusieurs tâches : collecte des données, organisation de la base de données, contribution aux expérimentations in situ et à l'animation du réseau.

2. Généralités

Ce chapitre expose très succinctement les définitions des paramètres « turbidité » et « matières en suspension » ainsi que leur relation. Un point sur les principales techniques de mesure de la turbidité dans les eaux est également proposé.

Il a été rédigé à partir des références suivantes : Maréchal (2000), Lefrancois (2007) et Ruban et al. (2007).

2.1. DEFINITIONS

2.1.1. Turbidité

La turbidité est définie comme la « réduction de la transparence d'un liquide par la présence de matières non dissoutes ». La turbidité correspond à la propriété optique de l'eau qui fait que la lumière incidente est diffusée ou absorbée. Il s'agit d'un paramètre dont la signification dépend de la technique de mesure utilisée. Plusieurs mesures optiques rendent compte de la turbidité comme la néphélométrie, l'opacimétrie et la turbidimétrie.

Dans le domaine de l'eau, deux grandes familles d'unité de mesure sont utilisées :

- La première utilisant la *formazine* comme étalon. Elle possède deux unités de mesure de la turbidité normalisées en (NF EN ISO 7027) :
 - o **NFU** (Formazine Nephelometric Unit), ou NFU utilisé dans le Décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles. Cette unité mesure la turbidité sous un angle de 90 ° à une longueur d'onde de 860 nm ;
 - o **FAU** (Formazine Attenuation Unit) mesure la lumière transmise à 180 °.
- La seconde unité de mesure, plus couramment utilisée, est le **NTU** (*Nephelometric Turbidity Unit*). Elle est prescrite par l'Environmental Protection Agency (EPA – USA).

Des correspondances ont été établies entre ces différentes unités :

- 1 NFU = 1 FAU ;
- Pour des turbidités inférieures à 10 - 20 NFU la relation entre unité de mesure est 1 NFU = 1 NTU ;
- Pour des turbidités supérieures à 20 NFU, la correspondance entre les deux types d'unité devient 1 NFU = 0,6 NTU.

2.1.2. Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension (MES) correspondent à des particules de faible taille et/ou de faible densité qui limite leur chute par gravité dans l'eau. Les MES représentent les matières non dissoutes maintenues en suspension dans le liquide par effet d'agitation. L'Illustration 1 donne un exemple de classification des MES.

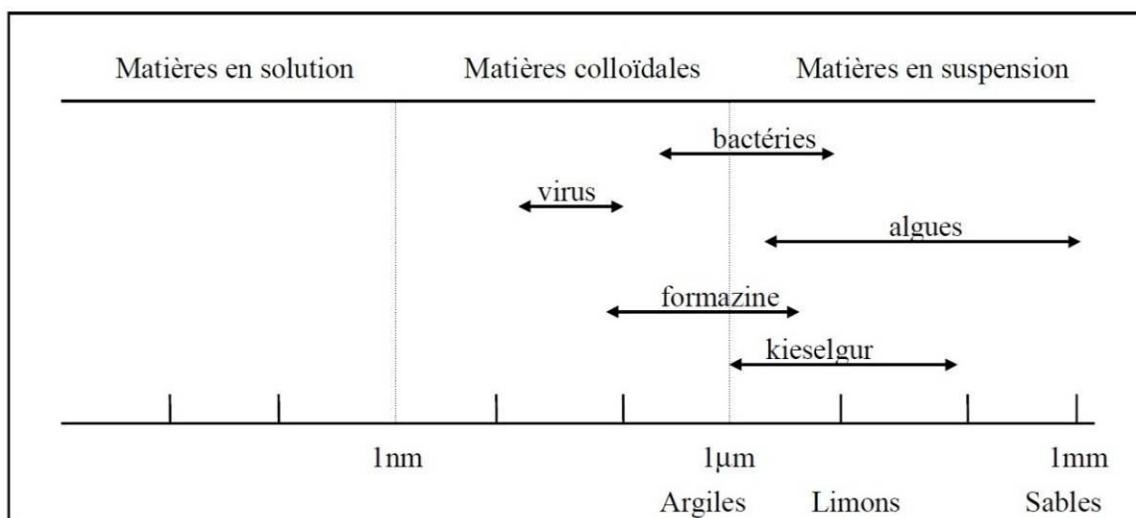


Illustration 1 : Classification des MES et des matériaux utilisés en métrologie. D'après Levine et al. (1985) dans Marechal (2000).

Les MES comprennent deux fractions distinctes dont les contributions respectives varient selon les saisons et les cours d'eau :

- **La matière minérale** venant de l'érosion des sols et du lit du cours d'eau. Elle est classée en fonction de sa granulométrie (Illustration 1). Cette fraction dépend de différents facteurs à l'échelle du bassin versant tels que la couverture pédologique, l'occupation du sol, la topographie, le climat ainsi que l'hydrologie.
- **La matière organique :**
 - o **Particulaire**, issue de la décomposition d'animaux ou de végétaux et des micro-organismes regroupant le phytoplancton (algues et cyanophycées) et le zooplancton (larves crustacées, rotifères,...) ;
 - o **Dissoute**, à la frontière entre matière particulaire en suspension et matière en solution, et dont l'origine peut être double avec :
 - Les matières autochtones venant de (i) la décomposition des bactéries et l'autolyse des organismes vivants, (ii) de l'excrétion

ou l'exsudation du phytoplancton (production extracellulaire) et (iii) des processus d'échange avec les sédiments.

- Les matières allochtones provenant de (i) l'entraînement par ruissellement des matières terrigènes (colloïdes, substances humiques), (ii) des rejets de produits domestiques et industriels, (iii) de l'apport par précipitation.

2.2. PRINCIPALES TECHNIQUES DE MESURES

2.2.1. Turbidité

In situ, deux méthodes sont fréquemment reproduites pour estimer la turbidité :

1. **Le disque de Secchi** (Illustration 2) qui permet d'apprécier la transparence de l'eau vue par un œil humain ou son opacité. C'est la seule mesure disponible actuellement pour prendre en compte à la fois les caractéristiques optiques de l'eau (teneur en particules), la pénétration de la lumière du jour (opacité), le contraste et la perception de l'œil. Cette transparence dépend de la coloration de l'eau (liée à la présence de substances dissoutes ou d'algues) et des teneurs en MES, provenant du lessivage des sols (particules terrigènes), de l'érosion des fonds des cours d'eau et de l'activité biologique.

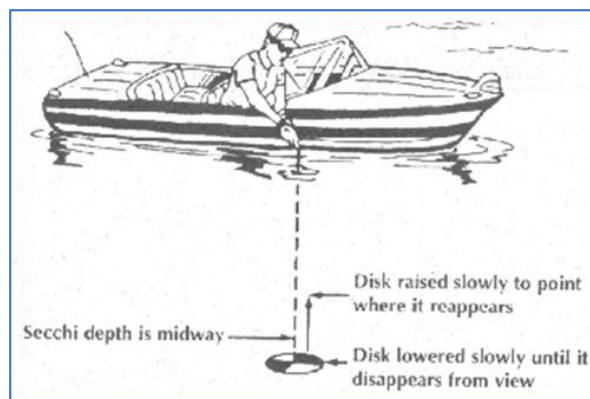


Illustration 2 : Disque de Secchi (utilisation in situ).

2. **La mesure NTU** est une méthode néphélométrique, actuellement normalisée, pour mesurer la turbidité de l'eau (NF EN ISO 7027 (2000)). Le turbidimètre néphélométrique mesure l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 90 degrés par rapport au trajet de la lumière incidente (Illustration 3). Cette

mesure détermine ainsi le coefficient angulaire de diffusion β_{90} . Dans le cas de petites particules, on calcule le coefficient de diffusion totale, b , à partir de ce paramètre β_{90} .

Cette diffusion est surtout liée aux matières en suspension et elle dépend de la taille, de la forme et de l'indice de réfraction des particules, ainsi que de la longueur d'onde de la lumière incidente.

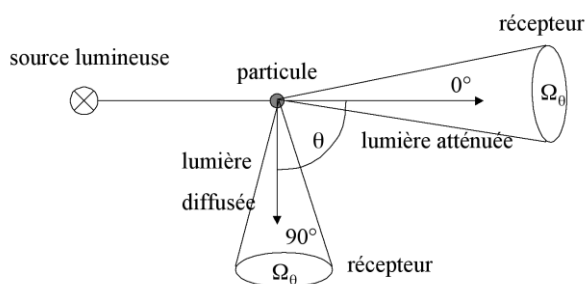


Illustration 3 : Principe et appareil de mesure turbidimètre. Exemple avec le modèle HANNA Instrument.

2.2.2. Matières en suspension

Il existe deux grands types de méthodes pour mesurer ou estimer les MES : les méthodes gravimétriques résultant d'une séparation physique (filtration, centrifugation), et les méthodes optiques dont la turbidimétrie.

La première méthode permet d'identifier et de quantifier les différentes fractions de la matière en suspension. De manière arbitraire, dans un échantillon d'eau, la norme AFNOR NF T 90-105 (1996) définit les MES par critères opérationnels. Elles sont obtenues soit par filtration sur membrane poreuse de $0.45 \mu\text{m}$ (ex : membrane au

Keisलगुर), soit par centrifugation (temps minimum 15 min, accélération moyenne de 2800 à 3200 g).

La deuxième méthode détermine de manière qualitative la charge en MES totale d'une eau mesurée indépendamment du type de MES présent. Elle est normalisée NF EN ISO 7027 (2000). Elle fixe la longueur d'onde utilisée et la nature de la suspension étalon définissant les unités de turbidité.

2.3. RELATIONS TURBIDITÉ - MES

La turbidité, telle qu'elle est définie dans la méthode néphélométrique, correspond à une mesure non spécifique de la concentration des solides en suspension. Des particules, en concentrations très différentes, peuvent avoir les mêmes valeurs de turbidité si elles sont de types très différents. La mesure néphélométrique de turbidité est en effet fonction de la concentration, de la taille, de la forme et des coefficients de réfraction des particules présentes.

La corrélation entre le coefficient de diffusion b , calculé en mesure NTU, et la masse totale des MES dépend donc de :

- la répartition en taille des particules,
- la relation entre le volume total et la masse totale. Le coefficient de diffusion b dépend du volume de l'ensemble des particules rencontrées. Pour obtenir la conversion en termes de masse, il faut connaître la valeur moyenne de la masse volumique du volume d'eau échantillonné.

Le coefficient de corrélation entre la mesure optique et la masse des particules est donc lié à la nature des particules. Ce facteur va ainsi avoir une composante géographique, selon que l'on sera plus ou moins éloigné d'une embouchure de fleuve, et une composante saisonnière importantes.

Seules des analyses complémentaires peuvent permettre de renseigner sur les différents types d'échantillons, selon qu'ils sont plus ou moins favorables à une dominante biogénique ou lithogénique.

D'une manière générale, la corrélation entre le coefficient de diffusion et la teneur en MES est tout à fait satisfaisante pour une région donnée. **En définitive, pour obtenir une relation cohérente entre la turbidité et les matières en suspension, les mesures doivent se faire dans un même milieu avec un même appareil, calibré avec les mêmes étalons.**

A titre d'exemple, la figure suivante illustre la relation turbidité-MES dans un bassin versant minier de Guyane et met en évidence la variabilité de cette relation d'une saison à l'autre.

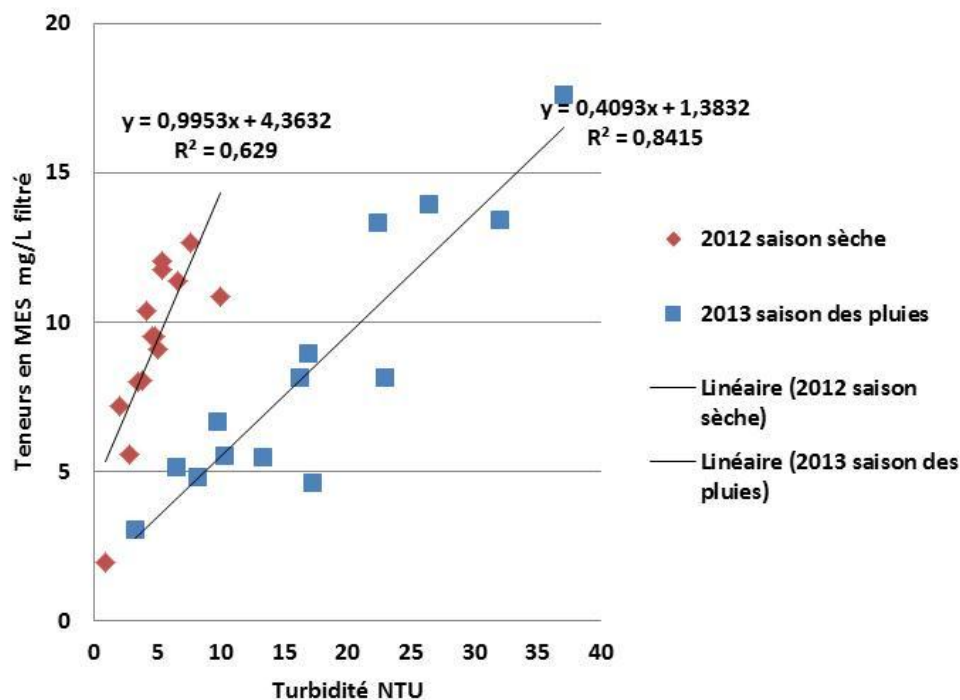


Illustration 4 : relation entre les mesures de turbidité (NTU) et les teneurs en MES (mg/L d'eau filtrée) dans un bassin versant guyanais. D'après Laperche et al. (2013).

La turbidité traduit la présence de particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...). La présence plus ou moins importante de matières solides en suspension influe sur la transparence.

Cette mesure de qualité de l'eau caractérise le poids de matière particulaire par unité de volume d'eau.

La turbidité de l'eau vient de la présence de diverses matières en suspension telles que les argiles, les limons, la matière organique et minérale en fines particules, le plancton. Les matières en suspension sont définies comme étant l'ensemble du matériel particulaire entraîné passivement dans l'eau (vivant ou détritique, minérale ou organique).

2.4. NORMES ET SEUILS

Les normes et seuils s'appliquent distinctement aux milieux (cours d'eau, eaux littorales, eaux souterraines) et aux rejets (rejets de stations d'épuration, rejets miniers....). Il n'existe donc pas de valeur unique mais une variété de normes réglementaires ou de valeurs guide selon les milieux et les usages. Ce paragraphe résume les principales valeurs existantes afin de donner des clés de lecture et d'interprétation des données acquises en Guyane.

2.4.1. Normes et valeurs guides pour les cours d'eau

A chaque usage de l'eau (eau potable, suivi environnemental...) correspondent des normes et des objectifs. Concernant le **suivi général de l'état chimique et écologique des cours d'eau exigé par la Directive cadre sur l'eau 2000/60/CE qui organise la gestion de l'eau dans les Etats membres**, il n'existe à ce jour aucune norme ou valeur seuil. Ce texte ne prend cependant pas en compte les spécificités des régions d'outre-mer et, dans le cas de la Guyane, le contexte amazonien et équatorial impose un suivi régulier de la turbidité et des MES. L'impact de certaines activités, et notamment l'orpaillage illégal, le confirme.

Lorsqu'il s'agit de prélever de l'eau pour la production d'eau potable, des normes de qualité pour l'eau brute prélevée existent. Elles sont inscrites dans l'arrêté du 11 janvier 2007. Ce texte exige ainsi que **la concentration en MES des eaux superficielles prélevées pour la consommation humaine ne dépasse pas 25 mg/L. Pour la turbidité aucune limite sur eau brute n'est fixée.**

Les MES et la couleur de l'eau font partie des paramètres qui contribuent à l'altération de la qualité de l'eau et qui pénalisent ainsi potentiellement les **fonctions biologiques de cours d'eau**. Sans que des valeurs seuils ou des normes n'aient pu être déterminées, le SEQ-Eau (Système d'Evaluation de la Qualité des eaux), développé à la fin des années 90 et au début des années 2000 par les agences de l'eau et le ministère de l'environnement, prévoyait un classement des eaux pour les paramètres MES et turbidité selon les valeurs présentées dans Illustration 5 (Agences de l'eau, 1999 ; Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2001). **Ces valeurs peuvent être utilisées comme des valeurs guides. Elles ne sont nullement réglementaires.** Elles ont par ailleurs été définies pour des cours d'eau métropolitains et ne prennent pas en compte les spécificités des rivières de Guyane.

<i>Classe d'aptitude</i> →	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
<i>Indice d'aptitude</i> →	80	60	40	20	
PARTICULES EN SUSPENSION					
MES (mg/l)	25	50	100	150	
Turbidité (NTU)	15	35	70	100	
Transparence (m)	2	1	0,5	0,25	

Illustration 5 : Seuils d'aptitude à la biologie pour les paramètres MES et turbidité. D'après le SEQ-EAU version 2, 2001. Valeurs non réglementaires.

2.4.2. Normes pour les rejets d'eaux usées

L'arrêté du 22 juin 2007 exige que les concentrations en **MES** dans les eaux rejetées par les stations d'épuration ne dépassent pas **35 mg/L**. Cette norme s'applique également aux rejets miniers.

2.5. LA TURBIDITÉ EN GUYANE

La turbidité peut être causée par des phénomènes naturels mais également anthropiques. En Guyane, la turbidité peut naturellement varier en relation avec différents phénomènes:

- inondations,
- ruissellement (notamment en cas de forte pluie),
- marnage,
- morphologie du cours d'eau (présence d'un saut, d'un bras, d'une confluence, d'un banc de sable, etc....).

Les conditions hydro-climatiques (débit des cours d'eau, pluies) conditionnent également la turbidité des cours d'eau.

Les activités anthropiques influencent également ces valeurs et notamment :

- La déforestation, elle-même liée à plusieurs activités (exploitation du bois, aménagements urbains ou routiers, activités extractives, agriculture) ;
- Le trafic fluvial ou la présence de bateaux du type dragage ;

- les activités extractives légales (mines, carrières, prélèvements ponctuels de sables dans les cours d'eau) ou illégales (orpaillage illégal).

L'orpaillage illégal est de loin l'activité qui impacte le plus la turbidité des cours d'eau de Guyane (Illustration 6).



Illustration 6 : Confluence entre l'Inini, impactée par l'orpaillage illégal, et le Lawa (Maroni).

L'ordre de grandeur des valeurs de turbidité en Guyane est le suivant :

- Estuaires – zone de marnage : 10-100 NTU ;
- Cours d'eau non impacté : 5-15 NTU ;
- Cours d'eau impacté par orpaillage illégal : 50-150 NTU ;

Ce ne sont évidemment que des ordres de grandeur destinés à guider le lecteur et non des valeurs absolues.

3. Etat des lieux des mesures turbidité en Guyane

Aujourd'hui, et depuis de nombreuses années, beaucoup d'organismes réalisent des mesures de turbidité dans les cours d'eau de Guyane : IRD, BRGM, FAG, DEAL, HYDRECO, ONF, PAG, ARS, OEG, notamment. Les méthodes de mesures comme les motivations pour la réalisation de ces mesures varient. La DEAL collecte une partie de ces données mais leur hétérogénéité, tout comme l'absence de base de données centralisée, rend cette tâche difficile. Par ailleurs, il est regrettable que chacun ne puisse accéder facilement aux données acquises par d'autres organismes. C'est pourquoi, afin de préparer la création d'une future base de données commune, la DEAL a souhaité faire le point sur les données disponibles et sur les principaux producteurs impliqués.

Cet état des lieux a été mené à partir d'une collecte exhaustive des données (turbidité et MES) auprès des producteurs cités précédemment, et d'une recherche bibliographique. Dans la mesure du possible, les données disponibles dans la documentation ont été saisies.

Près de 1500 données ont ainsi été collectées et rassemblées pour la première fois. Ce chapitre fait la synthèse et l'analyse des données ainsi récoltées, en abordant successivement l'historique, la pérennité des données, la répartition spatiale des stations de mesure, les producteurs impliqués et les fréquences d'acquisition des réseaux existants.

La base complète des données collectées à la date de fin de réalisation de cette tâche (mars 2012) est disponible sous format Excel sur le CDROM joint à ce rapport.

3.1. HISTORIQUE DES MESURES

Historiquement, c'est d'abord les mesures de MES que l'on trouve dans la littérature. Les premières mesures de MES auraient été acquises par l'IRD en 1988 dans le cadre d'un programme sur l'alimentation en eau potable des populations urbaines et rurales de Guyane (Vauchel et Browne, 1992).

En 1992, dans le cadre d'un projet de Recherche visant à étudier l'érosion chimique et mécanique du bassin versant forestier du prospect de Yaou, le BRGM a réalisé 117 mesures de MES (Farah, 1994).

Les données de turbidité les plus anciennes connues datent de 1988 et ont été acquises par HYDRECO.

Ensuite, comme l'illustrent les cartes suivantes, les mesures restent ponctuelles et éparpillées jusqu'à la mise en place en 2007 du réseau de surveillance de l'état chimique

et écologique des masses d'eau de surface au titre de la DCE. Cette date marque la première structuration d'un réseau de suivi de la turbidité en Guyane.

Remarque : le terme « réseau » est utilisé dès lors qu'un maître d'ouvrage est identifié et qu'il assure le suivi de la turbidité ou des MES selon un pas de temps défini et sur plus de 2 stations.

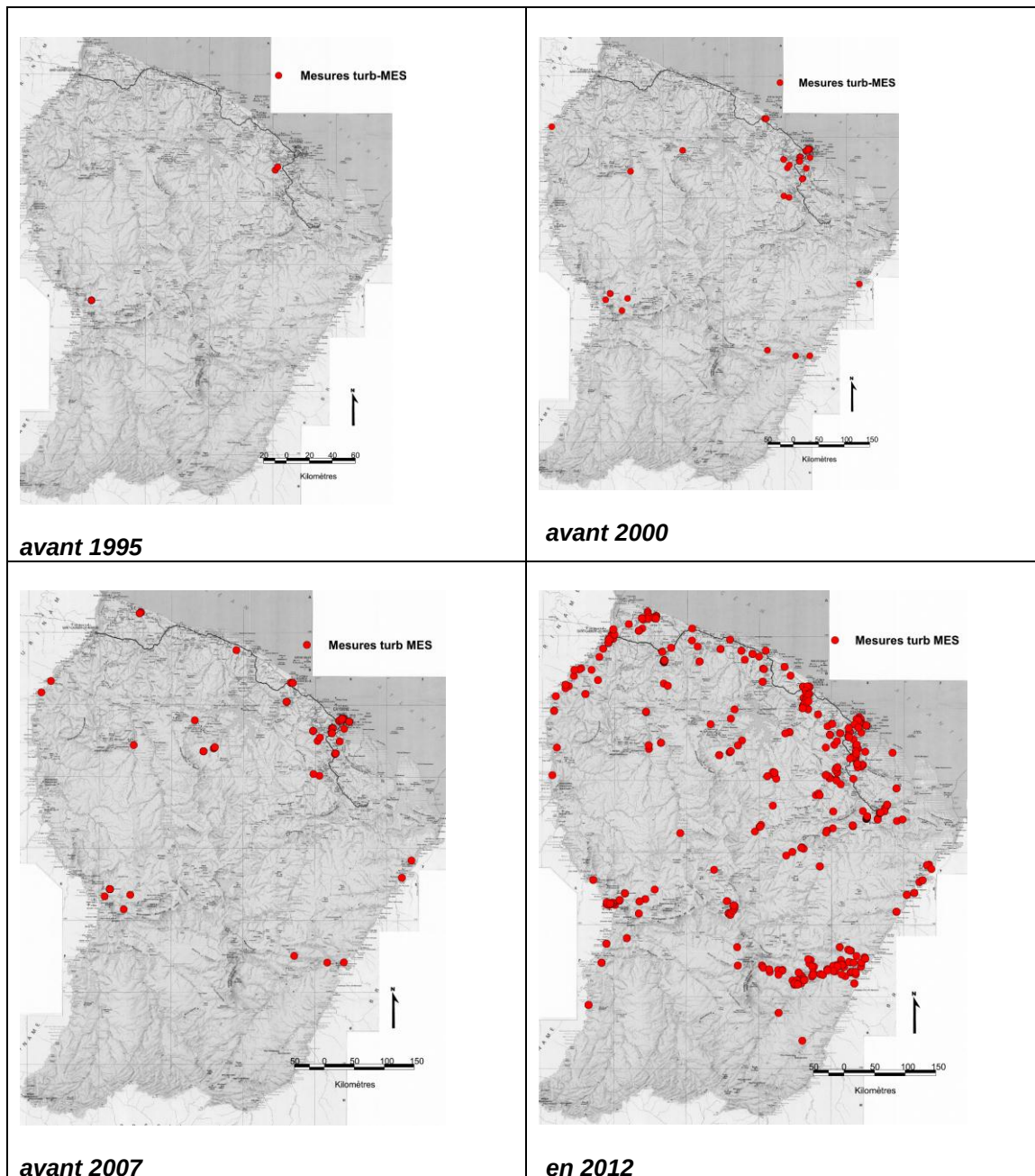


Illustration 7 : Evolution de la localisation des points de suivi de 1995 à 2012.

3.2. PERENNITÉ DES DISPOSITIFS DE SUIVI

La collecte des données engagées entre octobre 2011 et mi-2012 a permis de rassembler **1485 mesures de turbidité et 641 de MES**. Il faut cependant distinguer les mesures ponctuelles, qui ne sont pas toujours facilement exploitables, des campagnes de mesures réalisées sur une fréquence prédéfinie et suffisamment significative pour permettre de mieux suivre l'évolution de la turbidité. L'illustration suivante présente la répartition, égale, entre ces deux catégories de données.

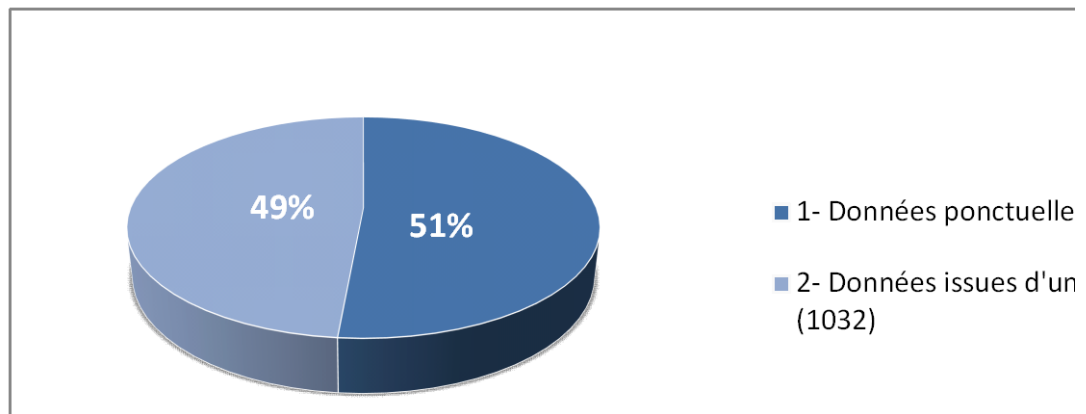


Illustration 8 : Répartition entre données de turbidité et de MES ponctuelles et données faisant partie d'un réseau de mesure.

3.3. REPARTITION SPATIALE DES POINTS DE MESURES

La répartition spatiale des stations de mesures collectées est assez hétérogène. A l'évidence, les mesures sont beaucoup plus fréquentes sur les secteurs avec des enjeux potentiellement forts (en lien le plus souvent avec l'orpaillage).

La cartographie suivante présente l'ensemble des stations de mesures collectées jusqu'au mois de mars 2012. Même si il existe des sous-secteurs non étudiés, on retrouve des mesures sur l'ensemble des régions hydrographiques. Elles sont cependant principalement réparties dans la zone Nord à l'exception de la région hydrographique de l'Oyapock où un effort important a été mené sur le secteur de Camopi. Cette multiplication de stations correspond à une surveillance de l'activité d'orpaillage illégal par le PAG et les FAG.

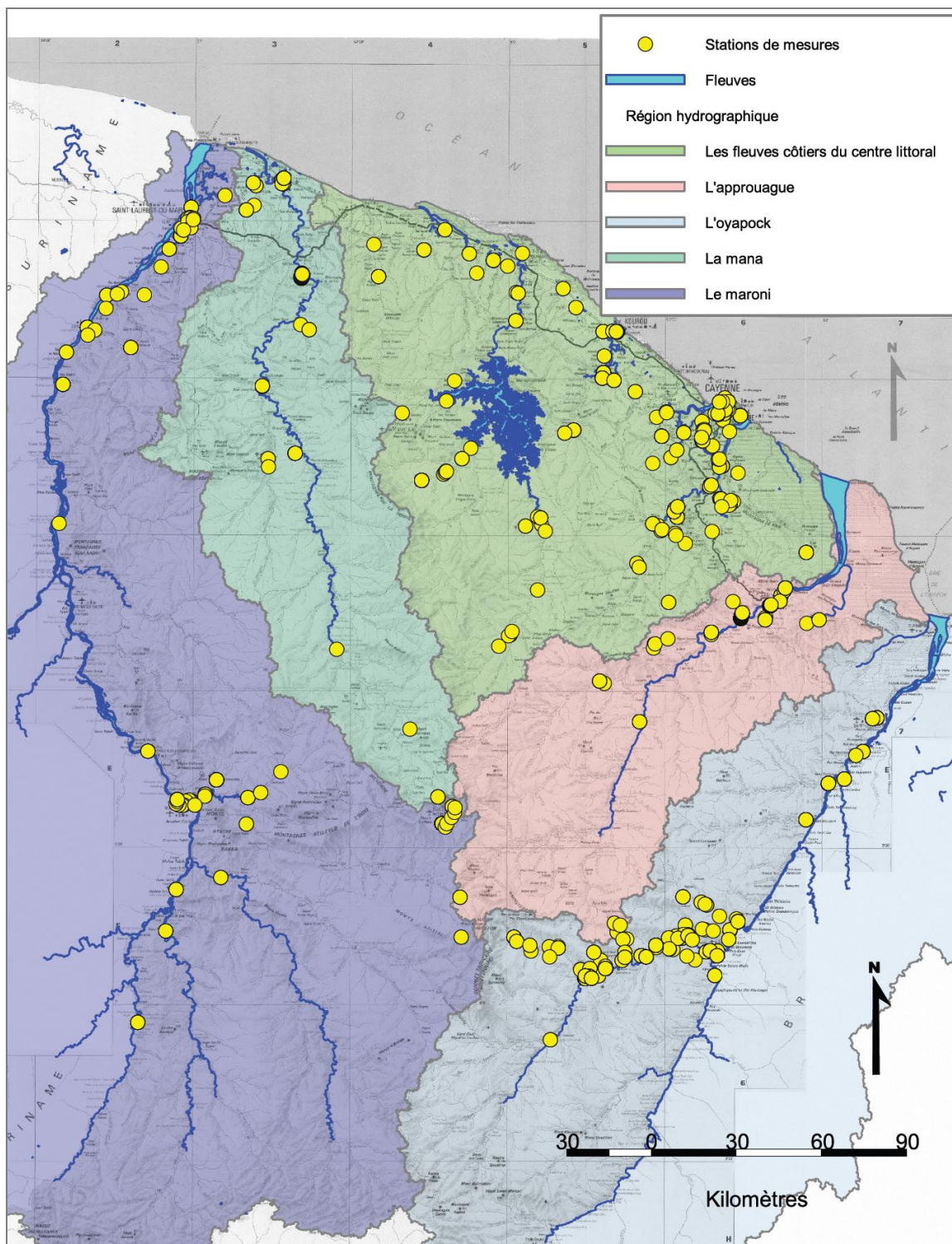


Illustration 9 : Répartition spatiale de l'ensemble des stations de mesures collectées. Chaque point signifie qu'il existe au moins une mesure sur cette localisation.

3.4. PRODUCTEURS DE DONNÉES

En Guyane, il existe de nombreux organismes qui suivent la turbidité. Leurs objectifs sont variables : surveillance de l'orpaillage illégal, surveillance de la conformité de l'eau prélevée pour l'AEP, évaluation de l'état chimique et écologique du milieu aquatique, recherches multiples, etc.

Il existe par ailleurs des mesures réalisées directement par des organismes publics et d'autres réalisées par des commanditaires privés, soit pour leurs propres besoins, soit pour le compte d'organismes publics.

Les données turbidité issues du **secteur privé** sont souvent moins accessibles. Elles sont intégrées dans des campagnes plus globales et il est assez difficile de connaître leur existence. Généralement, l'existence de ces données est connue grâce aux bureaux d'études qui réalisent les campagnes de mesures. Ils n'ont pas d'obligation de diffusion. Une convention doit être signée entre le comité scientifique de Petit-Saut et la DEAL afin que cette dernière puisse exploiter les données acquises par EDF. A ce jour, ces données n'ont toujours pas été intégrées dans la base.

Les données dites « **publiques** » sont relativement simples à collecter, il existe de véritables réseaux de mesures de la turbidité comme le réseau DCE. Les données sont parfois même disponibles en ligne.

Les principaux producteurs de données sont :

- L'Agence Régionale de Santé (ARS) ;
- La DEAL (Direction de l'Environnement l'Aménagement et le Logement) ;
- L'Office de l'Eau Guyane (OEG) ;
- La DAF (Direction Agriculture et Forêt) ;
- L'ONEMA (Office National des Eaux et Milieux Aquatiques) ;
- Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) ;
- Le PAG (Parc Amazonien Guyane) ;
- Les FAG (Forces Armées de Guyane) ;
- L'ONF (Office National des Forêts) ;
- L'IRD (Institut de Recherche pour le Développement).

A noter : la DDE (Direction départemental des Equipements) a été intégrée à la DEAL et la DSDS (Direction de la santé et du Développement Social) est devenue l'ARS.

Le tableau suivant indique le nombre de données acquises par organisme.

Producteurs de données		Objectifs associés	Nombre de mesures
	DEAL	-Réseau DCE ; -Evaluation de l'impact de l'orpaillage alluvionnaire sur l'environnement ; -Mesures ponctuelles version papier avant 2000.	582
	PAG	- Suivi de l'orpaillage et de la qualité des cours d'eau	375
	DAF	-Evaluation de l'impact quantitatif et qualitatif de l'exploitation aurifère sur le milieu récepteur	334
	BRGM	-Réseau DCE de suivi de l'état physico-chimique des cours d'eau (partenariat ONEMA, suivi DEAL/OEG)	320
	ARS	-Contrôle sanitaire pour le captage des eaux superficielles;	213
	OEG	-Réseau DCE de suivi de l'état écologique des cours d'eau; -Réservoirs biologiques de Guyane Française.	116
	ONF	-Etude de la qualité des eaux de surface sur d'anciens sites miniers. -Suivi de la qualité des petites masses d'eau.	44
	IRD	-Elaboration de l'indice biotique de qualité des milieux continentaux.	28

Illustration 10 : Tableau récapitulatif des producteurs de données de turbidité en Guyane et nombre de données acquises.

Comme le montre l'illustration 11, ces producteurs de données sont parfois seulement commanditaires et n'effectuent pas toujours les mesures eux-mêmes. Par ailleurs, beaucoup de bureaux d'études réalisent des mesures de turbidité à l'occasion d'études d'impact, de dossiers d'autorisation (loi sur l'eau, ICPE...). Les bureaux d'études, et

notamment le laboratoire HYDRECO qui est le plus impliqué dans ces suivis, sont donc eux-aussi acteurs du suivi de la turbidité en Guyane.

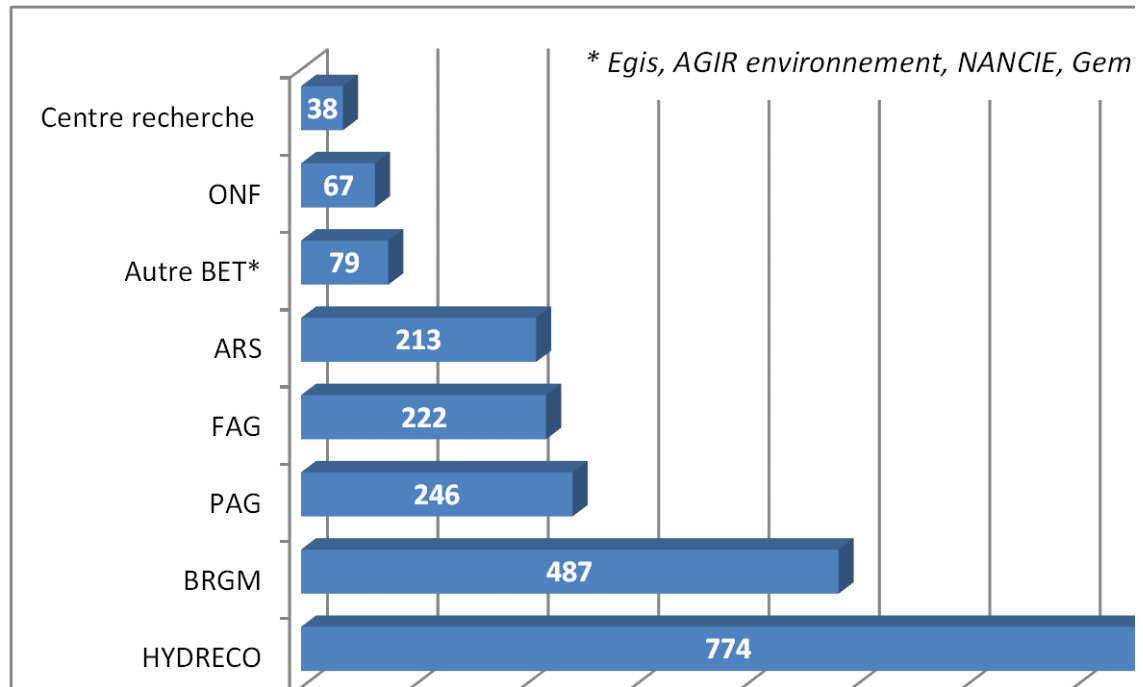


Illustration 11 : Répartition des mesures par opérateur..

3.5. LES PRINCIPAUX RÉSEAUX DE SUIVI DE LA TURBIDITÉ

À partir du travail de collecte des données et de la bibliographie, cinq grands réseaux ont été identifiés:

1. **Le réseau du PAG** : mis en place autour de Saül en 2009, le réseau a été étendu en 2011 sur le Haut-Oyapock dans la région de Camopi. En 2012, le PAG a également initié un suivi sur le Haut-Maroni.

Objectif : suivi de l'orpaillage et de la qualité de l'eau.

2. **Le réseau ONF « PME » (« Petites Masses d'Eau »)** : depuis 2010, la DEAL a signé une convention avec l'ONF pour la réalisation de mesures de turbidité sur les « petites masses d'eau » (têtes de bassin versant) à l'occasion des missions de suivi de l'impact de l'orpaillage légal et illégal. Ce suivi s'inscrit dans le cadre de la DCE.

Objectif : suivi de l'impact de l'orpaillage sur les petites masses d'eau.

3. **Le réseau FAG** : depuis 2010, les FAG réalisent un suivi de la turbidité sur le secteur de Camopi avec une transmission mensuelle des résultats à la DEAL.

***Objectif** : suivi de la qualité des eaux et de l'orpaillage illégal sur le secteur de Camopi.*

4. **Le réseau de contrôle de surveillance de l'état chimique et écologique des cours d'eau au titre de la DCE (OEG, DEAL, HYDRECO, BRGM)** : en 2007, ce réseau était constitué de 17 stations de référence. En 2008, il s'est agrandi avec la mise en place de 43 stations de surveillance dont 20 de référence. En 2009, il était constitué de 53 stations avec une analyse en saison sèche et une analyse en saison des pluies. Depuis 2010, une seule campagne annuelle est réalisée en saison sèche. Ces mesures sont assurées par le BRGM pour le compte de la DEAL et de l'OEG avec le soutien de l'ONEMA.

En 2010, en incluant les relevés faits par HYDRECO durant les campagnes hydrobiologiques, 73 mesures ont été effectuées. En 2011, 106 mesures turbidité ont été répertoriées (53 durant la campagne physico-chimique et 53 durant la campagne hydrobiologique).

***Objectif** : Evaluation de l'état chimique et écologique des cours d'eau.*

5. **Le réseau ARS** : dans le cadre du contrôle sanitaire et conformément aux exigences de la réglementation¹, l'ARS réalise, sur chaque captage d'eau de surface destiné à l'AEP, des mesures régulières de la turbidité et des MES. La turbidité ne doit en effet pas dépasser 1 NFU au point de distribution et, au point de prélèvement, les MES ne doivent pas dépasser 25 mg/L.

***Objectif** : contrôle de la conformité de l'eau prélevée pour l'alimentation en eau potable.*

La carte suivante présente les stations de mesures appartenant à un de ces cinq réseaux.

¹ Arrêtés du 11 janvier 2007 et du 21 janvier 2010

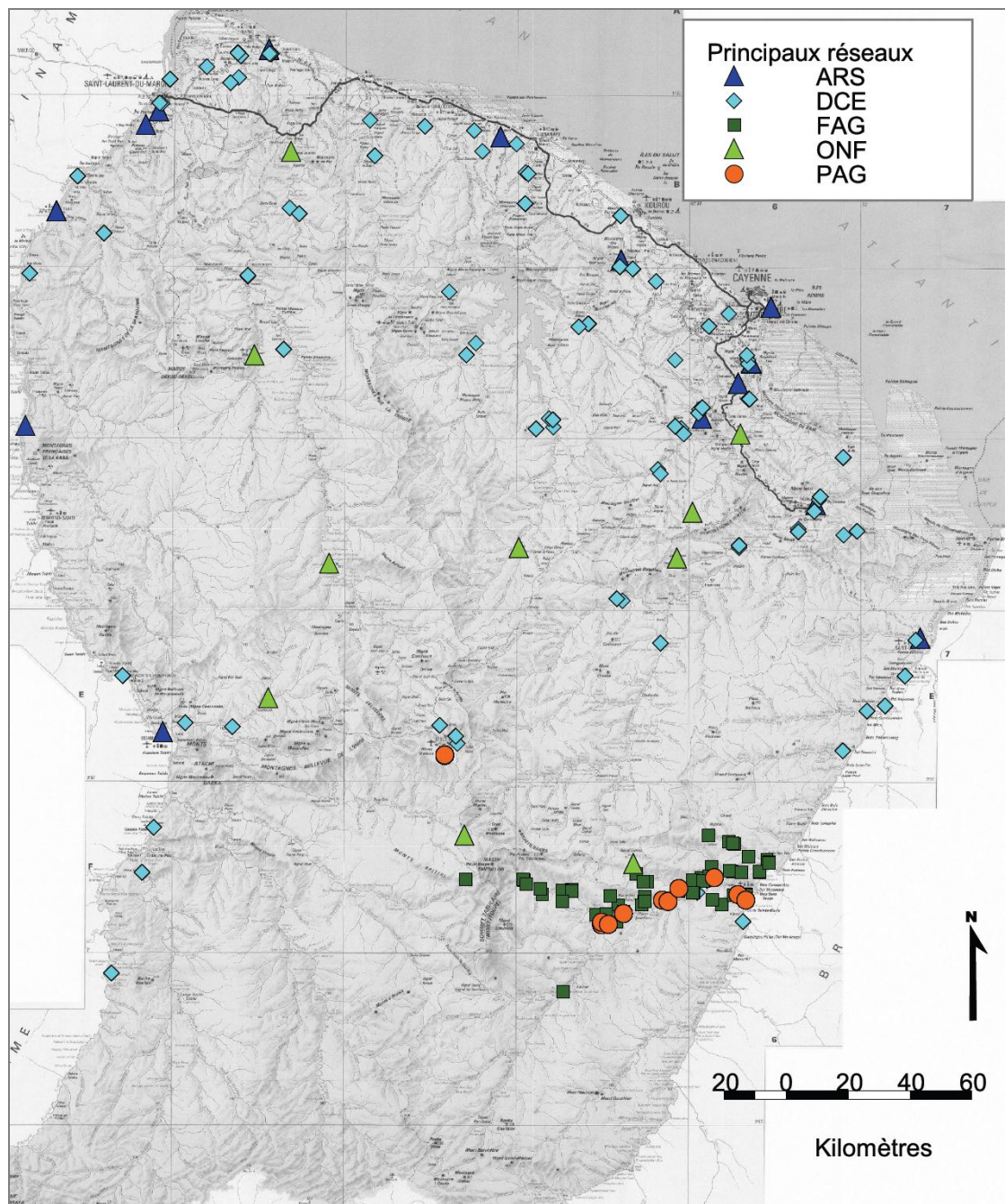


Illustration 12 : Localisation des stations appartenant à un réseau

3.6. FRÉQUENCES DE MESURE DES PRINCIPAUX RÉSEAUX

Les cinq réseaux décrits précédemment sont assez récents. Le plus « ancien » est le réseau DCE mis en place en 2007. Les réseaux FAG et ONF ont été mis en place en 2010 sous l'impulsion de la DEAL qui a souhaité étendre sa connaissance et développer un maillage plus dense des mesures de qualité des eaux (au moins pour le paramètre turbidité).

Le réseau ARS est variable et dépend bien entendu des stations de pompage mises en place et de leur date de mise en service. En application de l'arrêté du 21 janvier 2010, les fréquences varient également en fonction du nombre d'utilisateurs et des volumes prélevés. L'ARS réalise ainsi de une mesure par an sur les petits captages à douze mesures par an sur le captage de la Comté qui alimente une partie des communes du Centre Littoral.

Ces cinq grands réseaux fournissent plus de 500 mesures de turbidité par an, réparties de la manière suivante :

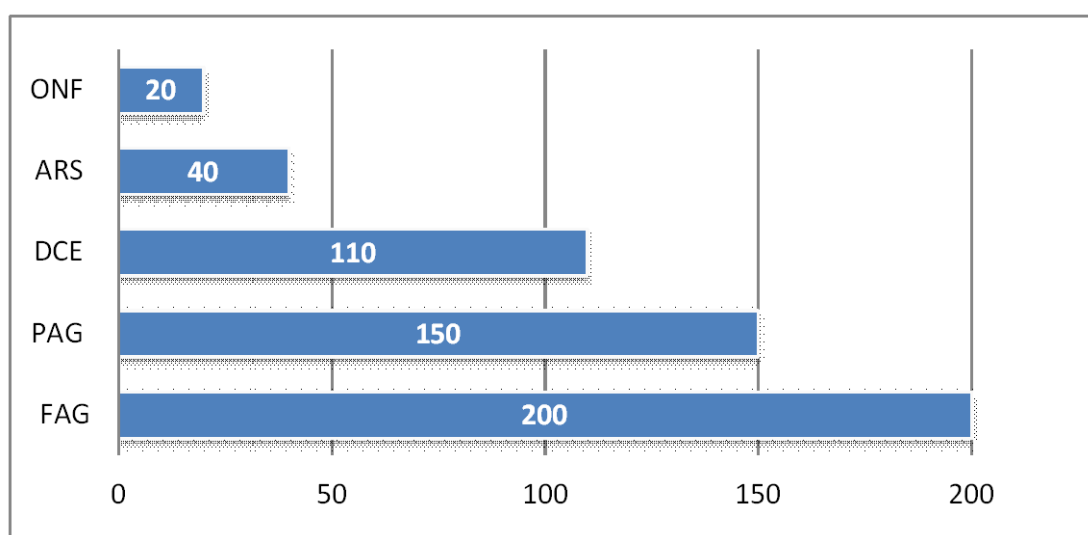


Illustration 13 : Estimation du nombre de mesures par an et par producteur de données.

3.7. LIMITES DES DONNÉES COLLECTÉES

Il est important de prendre en compte la notion de fiabilité des données afin de relativiser les résultats qui pourraient être exploités. En effet, une mesure n'a pas d'intérêt s'il n'y a pas d'indication précise sur la date, le lieu ou encore les conditions dans lesquelles l'analyse a pu être effectuée.

Or, l'ensemble des données récoltées souffre de nombreux manques, imprécisions et hétérogénéités. Par exemple, pour certaines données, nous pouvons constater :

- L'absence de géolocalisation qui rend les données inexploitable ;
- L'absence d'information sur les systèmes de projections, ce qui entraîne des difficultés, voir des erreurs, pour le report des points sur une carte ou dans un SIG ;
- Le manque d'information sur les protocoles, le lieu exact de la mesure ou le matériel utilisé. Ceci constitue un frein à l'harmonisation et à la mise en commun, des données.

Ces constats accentuent la nécessité de mettre en place un protocole et un format d'échange de données communs.

4. Recommandations pour la mise en place d'un réseau régional de suivi de la turbidité en Guyane

Les objectifs de chaque producteur de données étant variables et parfois contraints par un cadre réglementaire, il n'est nullement question ici de mettre en place un réseau qui remplacerait les suivis actuels.

Il s'agit cependant de réfléchir à l'opportunité d'un « méta-réseau » de stations à l'échelle régionale, regroupant les réseaux des différents producteurs de données identifiés, complété, si nécessaire, par de nouvelles stations sur les zones peu surveillées.

Les avantages d'un tel réseau seraient :

- Un meilleur partage des données de turbidité acquises en Guyane, entre producteurs de données mais également vis-à-vis des collectivités, des bureaux d'études et du grand public ;
- Une meilleure visibilité des efforts faits pour suivre la turbidité en Guyane. Une base de données commune et actualisée permettra en effet de mieux valoriser les données acquises ;
- Un partage d'expériences entre les différents producteurs de données. La mise en place d'un réseau régional doit être en effet participative, et doit être un fédérateur auquel chacun participe. Son animation permettra aux producteurs de données de se réunir annuellement et d'échanger sur leurs protocoles ;
- A terme, un meilleur suivi des zones peu surveillées et si nécessaire, une optimisation des suivis sur les secteurs où les mesures pourraient être redondantes.

La DEAL souhaite en effet, à partir de l'analyse des données existantes, identifier les zones où des suivis manquent, et les acteurs potentiellement mobilisables pour combler ces manques. Elle souhaite également localiser et lister les stations qui doivent impérativement être pérennisées pour donner une image « minimale » de la turbidité des cours d'eau de Guyane (un socle de stations).

Pour répondre à ces attentes, le chapitre suivant donne des recommandations sur le dimensionnement du réseau régional (localisation, fréquences, méthodes), la bancarisation et la diffusion des données ainsi que leur valorisation.

4.1. RECOMMANDATIONS POUR LE DIMENSIONNEMENT DU RÉSEAU RÉGIONAL

Dimensionner un réseau de suivi revient à définir **pourquoi** le mettre en place (objectifs), **où** faire les mesures, **quand** (fréquences, périodes de l'année) et **comment** (protocole, matériel, méthodes). C'est sous ces quatre angles que, sur la base du diagnostic des données existantes présenté précédemment, des recommandations sont établies.

A ces questions s'ajoute généralement la question du ou des paramètres à mesurer (**quoi ?**) que nous considérerons comme réglé en entrée car c'est bien le paramètre « turbidité » qui est abordé ici et non la mesure des MES. La question d'étendre le suivi aux MES et plus largement aux autres paramètres physico-chimiques in situ se pose, pour optimiser les déplacements comme pour améliorer l'interprétation des données. Elle ne sera cependant pas abordée ici et pourra l'être dans un autre cadre.

4.1.1. Pourquoi mettre en place un réseau régional ?

Les objectifs du réseau doivent être définis pour en déterminer les contours et les spécifications. Le souhait de la DEAL Guyane est global, et sa volonté est de disposer d'un jeu de données et de stations qui permettent à la fois de suivre la qualité générale des cours d'eau, en l'occurrence la turbidité naturelle des fleuves et leur évolution saisonnière, et de disposer d'un suivi de l'impact des activités humaines (de l'orpaillage illégal en particulier). Ces suivis doivent donner des informations à court, moyen et long terme.

4.1.2. Où faire les mesures de turbidité ?

Dans ces conditions, tous les bassins versants impactés par les activités humaines, et notamment par l'orpaillage illégal, doivent être suivis : cours d'eau de la bande littorale + cours d'eau impactés représentés sur l'illustration 14.

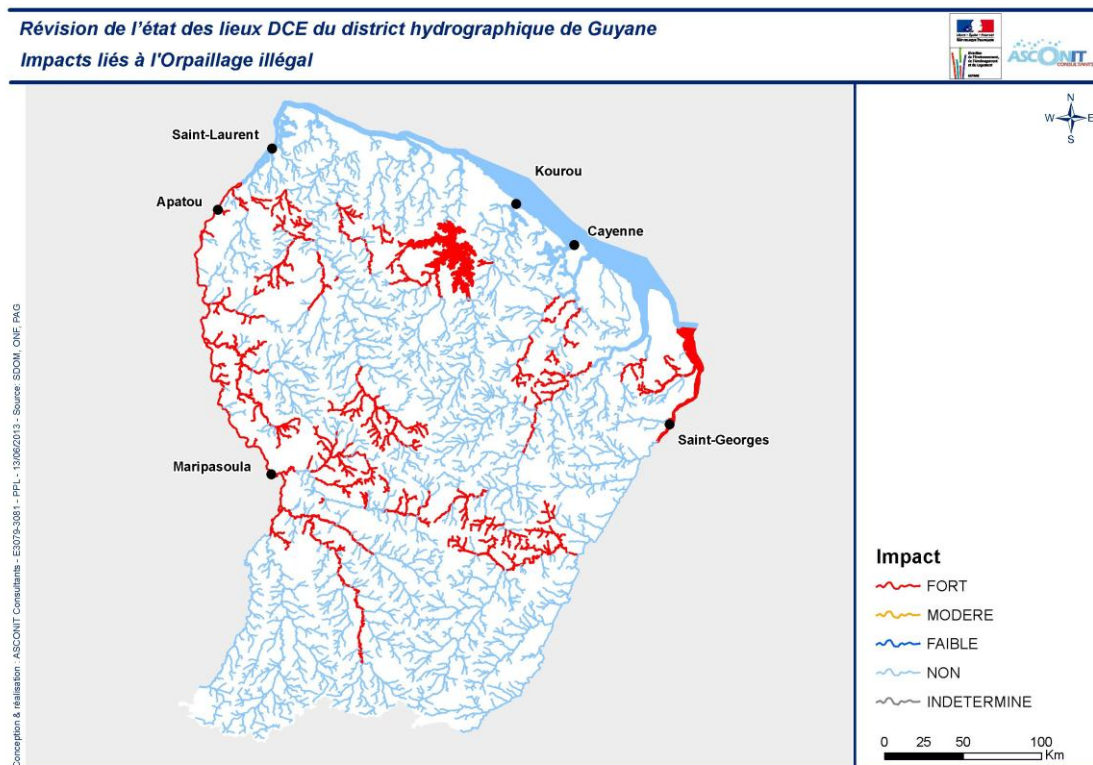


Illustration 14 : Impacts liés à l'orpaillage illégal. D'après Comité de Bassin (2014).

Une comparaison entre ces zones à suivre (c'est-à-dire le littoral + les cours d'eau figurés sur l'illustration 14 ou drainant la « ceinture des roches vertes »²) et l'état actuel des suivis pérennes (Illustration 12) permet d'identifier les secteurs où il y a peu ou pas de suivi, et où il serait pertinent de rajouter des stations de mesure :

- Tampok et Inini (à minima avant la confluence avec le Lawa et si possible des stations complémentaires en amont) : ce suivi pourrait être réalisé par le PAG et/ou les FAG ;
- Lawa au niveau de Papaichton/Loka, en amont et en aval des abattis Cottica, au niveau de Grand-Santi. L'orpaillage illégal est très actif dans ces zones qui mériteraient l'installation d'un suivi pérenne, par le PAG, les FAG et/ou l'ONF ;
- L'Abounami : très impactée elle aussi par l'orpaillage illégal, cette crique est peu, voire pas du tout, surveillée. Un suivi pérenne a *minima* à l'aval, avant la

² Entité géologique aurifère

confluence avec le Maroni, serait pertinent. Il pourrait être réalisé par l'ONF et/ou FAG/Gendarmerie.

- La Haute-Sparouine ;
- La Haute Mana : surveillée par l'ONF d'après l'illustration 12 mais ce suivi est-il pérenne ?

Il convient de noter qu'il ne s'agit ici que de préconisations générales pour soutenir l'évolution des suivis et pour alimenter les réflexions sur le futur réseau régional. D'autres facteurs doivent être pris en compte pour une mise en œuvre effective et le choix des stations : **la logistique**, **le coût**, les **conditions d'accès** ainsi que la **sécurité des agents** en charge des suivis.

Pour atteindre les objectifs d'un réseau régional représentatif, ce dispositif doit être complété par des mesures de la turbidité naturelle sur des cours d'eau non impactés. A priori, d'un point de vue géographique, les stations de suivi de l'état chimique et écologique DCE répondent bien à ce besoin et il n'apparaît pas utile de rajouter des stations pour atteindre cet objectif. Le renforcement doit plutôt porter sur une augmentation des fréquences de mesure (cf. paragraphe suivant).

Cas des estuaires et des cours d'eau sous influence du marnage : compte tenu de l'extrême variabilité spatio-temporelle de la turbidité dans ces zones, il n'est pas recommandé de mettre en place un suivi ponctuel pérenne de la turbidité, même à des fréquences rapprochées. Il est préférable de privilégier des études exhaustives visant à caractériser cette variabilité spatio-temporelle ou la mise en place de stations de mesures en continu. De tels équipements sont relativement faciles à mettre en place. Il faut ensuite en assurer l'entretien et le relevé des données. La plus grande faiblesse du dispositif repose sur le risque de vandalisme de l'équipement.

4.1.3. Quand et à quelle fréquence effectuer ces mesures

Sur les cours d'eau impactés par l'orpaillage illégal, les mesures doivent si possible être mensuelles voir plus fréquentes encore, et a minima réalisées 3 fois par an : en fin de saison sèche (novembre), en fin de petite saison des pluies (février) et en fin de saison des pluies (juillet). Ces préconisations doivent évidemment être adaptées aux conditions d'accès du point. Certains points sont inaccessibles en fin de saison sèche (débit du cours d'eau insuffisant pour naviguer). Des mesures adaptées à la connaissance des chantiers illégaux sont également pertinentes (comme c'est déjà fait par les FAG).

Pour les cours non impactés, il serait utile de suivre moins de stations mais plus souvent. Le réseau DCE et les mesures réalisées par le BRGM et HYDRECO ne fournissent qu'une valeur par an, en saison sèche. C'est le seul dispositif de suivi des cours d'eau non impacté. Il serait intéressant de compléter ce dispositif par deux mesures en saison des pluies sur une sélection de stations représentatives et

accessibles (sélection d'une dizaine de stations à faire parmi les 36 stations du réseau en disposant à la fois d'aval de grands fleuves, de PME et des grands bassins versants). Ces compléments seraient utiles. Peut-être à minima une ou deux années pour vérifier si il existe une grande variabilité interannuelle des données. Il conviendra cependant de se poser la question du coût de ces compléments au regard de leur intérêt. Optimiser ces nouvelles mesures avec d'autres analyses (physico-chimie in situ, MES, biologie, autre) devra également être envisagé.

4.1.4. Comment réaliser les mesures ?

Il est absolument impératif que les données acquises dans le cadre du réseau régional ou destinées à l'intégrer soient réalisées selon un protocole commun, par des agents formés utilisant un matériel connu, en bon état et étalonné.

Devant l'hétérogénéité des données collectées et des méthodes employées par chacun, un **guide technique de bonnes pratiques** a été rédigé dans le cadre de ce projet. Ce guide figure dans **l'annexe 1** du présent rapport. Il est destiné aux agents en charge des mesures, qu'ils soient spécialistes des suivis de terrain en environnement ou non. Il comprend des rappels sur la turbidité, des conseils pour savoir où mesurer et surtout des indications sur la gestion du matériel, son entretien et son étalonnage. Enfin il propose une fiche type pour les relevés de terrain (cf. fichier Excel joint sur le CDROM).

Pour un réseau régional, les mesures devront être effectuées en triplicat au milieu de la rivière dans le courant principal et dans le respect des prescriptions du guide.

4.1.5. Vers un réseau régional ?

Un réseau régional, à la fois complet au regard des objectifs, et minimal en nombre de stations serait composé :

- Des 36 stations de suivi DCE complétées par une mesure, voire deux, en saison des pluies ;
- D'une partie des stations suivies par le PAG et les FAG sur la Camopi et l'Oyapock ;
- Des stations de suivi du PAG aux alentours de Saül ;
- D'un suivi sur le Lawa/Maroni et ses affluents principaux impactés (Inini, Tampok, Sparouine, Abounami) à partir de l'existant complété comme suggéré ci-dessus.

4.2. COLLECTE, BANCARISATION ET DIFFUSION DES DONNÉES

4.2.1. Format des données

L'harmonisation des données et la gestion facilitée d'une banque de données passe par l'utilisation d'un **modèle de fichier commun** précisant les champs à renseigner obligatoirement et ceux qui restent optionnels. Ce fichier type est disponible sur le CDROM joint ou auprès de la DEAL Guyane ou du BRGM. L'illustration 15 reporte les champs demandés.

Compte tenu de la variété des acteurs en jeu, la collecte des données doit être accompagnée d'un descriptif de chaque réseau contributeur. Dans cet objectif, une **fiche de métadonnées** est proposée (Illustration 16).

Pour mémoire, « une métadonnée est une donnée qui renseigne sur la nature de certaines données et qui permet ainsi leur utilisation pertinente. L'ensemble des métadonnées existantes constituent ainsi une sorte de dictionnaire des fichiers de données disponibles » (<http://seig.ensg.ign.fr>)

Cette fiche a été élaborée grâce au modèle de fiche de métadonnée proposées dans le cadre de la mise en œuvre de la directive INSPIRE. Pour chacun des réseaux identifiés, une fiche a été renseignée (cf. fiches disponibles sur le CDROM).

Proposition d'un format commun de fichier pour le suivi de la turbidité des eaux de Guyane - Version 2 - février 2014

	Cours d'eau	Commune	Code masse d'eau	Code BD Carthage	Commanditaire (si différent de l'organisme en charge de la mesure)	Organisme en charge de la mesure	Nom du préleveur	X	Y	Référentiel pour coordonnées GPS	Date de la mesure	Heure	Turbidité	Unité
champs grisés : champs à renseigner obligatoireent														
les autres sont optionnels														
* (sans activité, orpaillage illégal, légal, agriculture, extraction bois, route, ville, village...)														

Référence du turbidimètre	Etalonnage avant mesure? (oui/non)	Sous influence du marnage? (oui, non)	Lieu de mesure (rive gauche, droite, milieu, autre)	Activités humaines à proximité *	Moyens accès (pirogue, pont, canoé....)

Illustration 15 : Champs à renseigner pour la bancarisation et l'envoi des données à l'organisme en charge de la centralisation

 Fiche de métadonnées simplifiée	
Commanditaire	Entité qui commande une prestation d'analyse à une autre entité, moyennant rémunération.
Titre de la campagne/ de l'étude	Document d'où les mesures turbidité ont été extraites.
Contexte	Présentation du cadre dans lequel ces mesures ont été effectuées.
Maître d'œuvre	Entité qui réalise les mesures de terrain.
Nombre de stations	Dénombrement des stations de mesures.
Fréquence	Nombre d'analyses effectuées par station.
Période	Période sur laquelle ces mesures ont été effectuées.
Localisation	Localisation géographique des lieux d'analyses.
Protocole	Description du protocole d'analyse.
Document de référence	Bibliographie
Fiche métadonnée	Date de création de la fiche de métadonnées. Nom de la fiche de métadonnées.

Illustration 16 : Modèle de fiche de métadonnée proposé.

4.2.2. Circulation des données, diffusion, valorisation

Il est nécessaire que la centralisation des données soit assurée par un organisme unique qui serait en charge de la réception des données, de leur validation (en terme de vraisemblance par rapport aux données « habituelles », échange à prévoir en cas de problème avec le producteur), de leur intégration dans une base données et de leur diffusion.

Deux circuits producteurs de données → organisme centralisateur peuvent être envisagés comme le montre l'illustration suivante :

- Soit le producteur de données dispose déjà de sa propre base de données et de son système d'information (cas de l'ARS avec la banque SISE-EAUX). Dans ce cas, pour ne pas rajouter des tâches à l'organisme, une interface informatique entre la base du producteur et la base turbidité peut être développée. Et les chargements faits annuellement ou à une fréquence plus resserrée si cela est pertinent et techniquement faisable.
- Soit le producteur de données n'a pas de base propre : dans ce cas il est invité à utiliser le fichier Excel commun, à y saisir directement ses données au retour du terrain et à transmettre ce fichier à l'organisme qui centralise. Cet envoi peut être a minima annuel, au mieux après chaque mission de terrain (et après validation par le producteur).

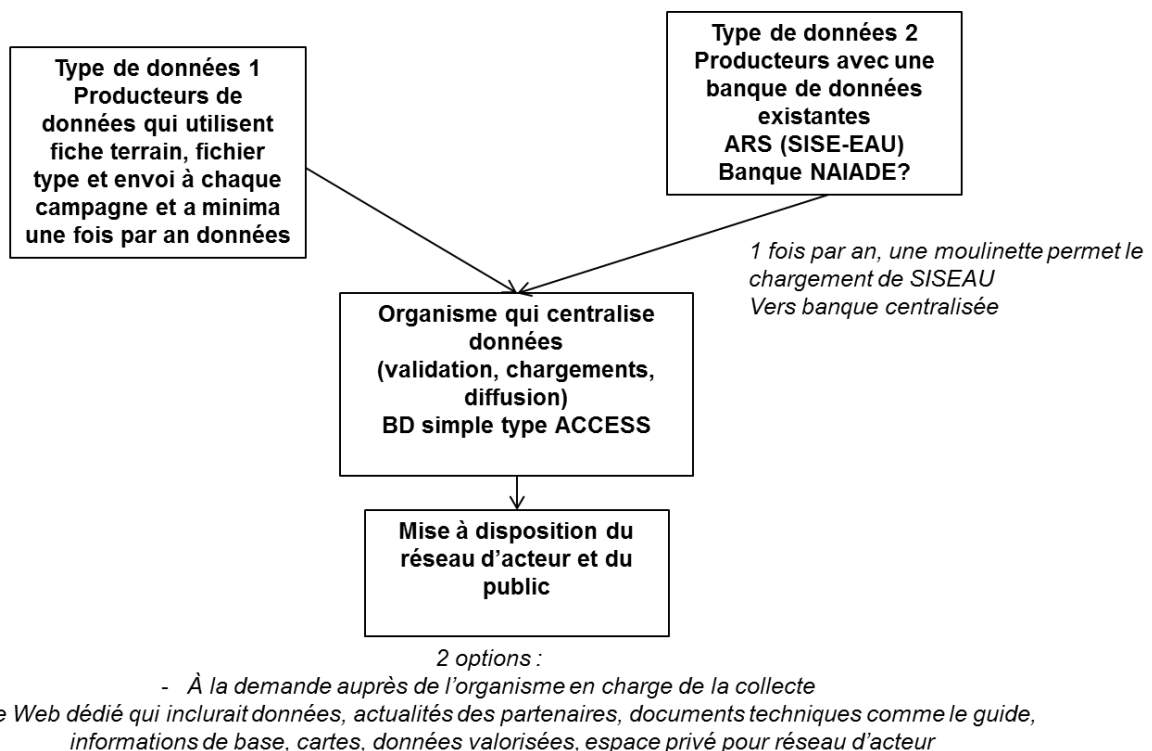


Illustration 17 : Schéma proposé pour la circulation des données du producteur à la diffusion.

Les besoins en termes de diffusion de données sont les suivants :

- Pouvoir accéder à toutes les mesures de turbidité en Guyane ;
- Disposer de cartes régionales sur la turbidité des cours d'eau ;

- Disposer d'informations générales sur le suivi de la turbidité en Guyane ;
- Disposer d'une plateforme d'échange entre producteurs avec accès réservé.

Pour répondre à ces besoins, il est recommandé de développer un portail Web dédié au suivi de la turbidité en Guyane. Pour éviter la création de nouveaux portails, une insertion sur le site du Comité de Bassin pourrait être envisagée. De même une alimentation du portail GEOGUYANE doit être programmée.

L'autre solution serait de développer un portail spécifique avec :

- Des informations générales grand public sur la turbidité des cours d'eau de Guyane (définitions, enjeux, mesures, acteurs....) ;
- Un bulletin annuel faisant le bilan des valeurs de turbidité et des zones impactées par les activités humaines ;
- Un espace de téléchargement des données (y compris avec des webservices cartographiques) ;
- Un espace à accès réservé pour les partenaires et les acteurs du réseau, espace qui permettrait de déposer les fichiers de données, d'accéder aux compte rendus de réunion et tout autre document de travail.

A titre d'exemple, un tel portail pourrait ressembler aux SIGES développés en métropole (Systèmes d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines³), ou aux portails développés par l'ONEMA et le MEEDDE (www.eaufrance.fr). Tout ceci n'est que proposition et des spécifications détaillées doivent être élaborées pour être sûrs que le portail répond aux besoins de tous les acteurs de Guyane. De même il est essentiel de créer des liens avec les autres systèmes d'information déjà existants (GEOGUYANE, eaufrance, comité de bassin...).

³ Exemples : <http://sigescen.brgm.fr/> ou <http://sigespoc.brgm.fr/> ou <http://sigessn.brgm.fr/>

5. Animation du réseau d'acteurs

De 2011 à début 2014, 5 réunions du comité de pilotage ont été organisées. Ces réunions ont permis de mieux cerner les attentes des producteurs de données et de présenter l'avancement des travaux. Il en ressort une très forte mobilisation des partenaires et de fortes attentes en termes de partage d'information et d'expérience et d'amélioration des pratiques.

C'est dans ce cadre que le 16 avril 2013, une journée technique été organisée par le BRGM, Kaliteo et la DEAL. Les objectifs de cette journée étaient de :

- Former les agents qui réalisent des mesures de la turbidité en Guyane à des pratiques communes qui permettront d'harmoniser les données ;
- Partager les expériences de terrain des acteurs impliqués dans les mesures ;
- Enrichir le guide de bonnes pratiques de la mesure de la turbidité en Guyane en intégrant le retour d'expérience des différents organismes impliqués.

Cette journée a permis de réunir 20 participants (Illustration 18) issus des différents organismes impliqués : BRGM (3), Kaliteo (1), DEAL (2), PAG (4), FAG (2), Gendarmerie (2), ONF (1), NBC (2), HYDRECO (3). D'après un questionnaire rempli en fin de séance tous les participants étaient très satisfaits ou satisfaits de cette journée et recommandent qu'elle soit renouvelée annuellement.



Illustration 18 : journée technique d'échange sur le suivi de la turbidité en Guyane.

Aucune compétence technique initiale n'était requise. Le déroulé de la journée s'est articulé autour :

- D'une partie théorique avec : présentation générale sur la turbidité des cours d'eau en Guyane et les données disponibles, présentation du guide de bonnes pratiques ;
- D'une partie pratique avec utilisation et suggestions d'amélioration de la fiche type de terrain, essai d'inter-calibration entre les turbidimètres utilisés par chaque organisme (Illustration 19). L'objectif était en effet de démontrer combien la bonne gestion du turbidimètre et de ses étalons était importante. Il s'agissait également d'estimer les incertitudes et les différences d'un appareil à l'autre. Pour accompagner cet essai, plusieurs étalons ont été préparés par l'IRD de Cayenne et mis à disposition des participants : 0,02 ; 10 ; 50 ; 100 NTU. Chaque participant a ensuite été invité à mesurer en triplicat la valeur de turbidité avec son propre appareil et de remplir une fiche (annexe 2).



Illustration 19 : Essai d'intercalibration organisé à l'occasion de la journée technique d'échange du 16 avril 2013.

Le tableau suivant reporte les valeurs mesurées par les participants.

Organisme	0,02 NTU			10 NTU			50 NTU			100 NTU		
HYDRECO	0.09	0	0.31	8.13	8.25	8.2	45	56	–	93	93	–
BRGM	0.08	0	0	11.39	10.85	9.48	49.2	49.1	49	98.8	101	98.5
FAG	–	–	–	9.04	9.41	–	44.5	44.4	–	96	96.5	–
PAG	0.02	0.14	0.18	9.05	9.42	9.1	47.6	47.1	47.4	95.5	96.1	96.1
ONF/KALITEO	0.43	0.55	0.43	11.1	11.3	11.2	55	55.5	55.5	103	103	103
DEAL	0.01	0.01	0.01	7.3	7.38	7.28	39.9	39.3	39	80.9	79.8	79.4

Illustration 20 : Tableau de synthèse des valeurs relevées par les participants lors de l'essai d'intercalibration organisé le 16 avril 2013.

L'examen des données ainsi collectées montre que :

- Il existe peu de variabilité de la mesure avec le même appareil ;
- Pour une même solution, les résultats sont variables d'un appareil à l'autre et d'un producteur à l'autre. Le tableau suivant donne l'écart et la variabilité totale par gamme d'étalon
- La variabilité est évidemment plus grande pour les petites gammes de valeurs que pour les plus grandes.

On retiendra surtout que la gestion du matériel, le type de turbidimètre, la gestion des étalons et le mode de mesure de chaque producteur influence considérablement le résultat et que pour une même eau, pour des valeurs généralement rencontrées en Guyane, la variabilité peut atteindre 41% ! Pour éviter de tels écarts, il est nécessaire de suivre le protocole commun exposé dans le guide de bonnes pratiques.

	0.02 NTU	10 NTU	50 NTU	100 NTU
Min	0.00	7.28	39.00	79.40
Max	0.55	11.39	56.00	103.00
écart	0.55	4.11	17.00	23.60
variabilité (%)	-	41%	34%	24%

Illustration 21 : Résultats de l'essai d'intercomparaison. Ecart et variabilité inter-organisme par gamme d'étalon.

6. Approche par télédétection de la turbidité des cours d'eau de Guyane – Généralités

Pour compléter l'approche terrain et explorer de nouvelles façons suivre la turbidité des eaux de Guyane, notamment pour les cours d'eau les plus inaccessibles, un travail visant à déterminer si les images du satellite SPOT pouvaient être exploitées a été engagé. L'objectif est d'évaluer si une corrélation entre les paramètres acquis par SPOT (réflectance) et la valeur de la turbidité des cours d'eau en surface existe. L'analyse de cette corrélation est motivée par la possibilité d'utiliser gratuitement les images SPOT 5 acquises par la station SEAS-Guyane située à l'IRD.

La DEAL et l'ONF ont par le passé déjà mené de tels tests mais, en l'absence de données suffisantes, ceux-ci n'avaient pas été concluants. De nouveaux tests ont donc été menés en 2012 et 2013.

Le travail était organisé en trois tâches :

- Réalisation d'une **synthèse méthodologique sur les possibilités de la télédétection en matière de caractérisation de la transparence de l'eau** (ou son contraire, la turbidité) et des difficultés de mise en corrélation d'un système d'interprétation basé sur l'analyse spectrale d'images, avec la réalité du terrain et la valeur réelle de la turbidité en eaux. Ce travail a fait l'objet d'un rapport remis à la DEAL fin 2011 (Rouzeau, 2011). Pour ces grandeurs, la littérature est très importante depuis les années 1970 où les premiers satellites de télédétection ont permis d'approcher ces paramètres suivant des lois empiriques calées par rapport à des mesures de terrain. Chaque auteur (ou équipe scientifique) a bâti des modèles de paramètres de la qualité de l'eau à la fois propres au dispositif satellite utilisé et en fonction des zones d'études choisies et de leurs conditions d'écoulement.
- **Mise en place d'une manipulation expérimentale in-situ** en mesurant à plusieurs endroits en même temps la turbidité de l'eau au moment du passage des satellites de surveillance environnementale sur la zone d'étude, et ensuite en tentant d'établir une relation comparative et reproductible entre les mesures au sol et l'interprétation des images satellites, en termes de « couleur de l'eau » du fleuve (corrélation gamme de turbidité en NTU, et valeurs spectrales sur images satellite).
- **Exploitation « rétro-active » des données de turbidité existantes et des images satellites** : le travail de collecte des données existantes présenté dans le chapitre 3 a permis de collecter près de 1500 valeurs de turbidité et/ou de MES en Guyane, acquises entre 1988 et 2012. Par ailleurs, il est possible en Guyane d'obtenir gratuitement des données du satellite SPOT 5 via la station de réception du SEAS-Guyane (gérée par l'IRD). C'est pourquoi, il est proposé ici de croiser ces données en recherchant les valeurs de turbidité acquises les

jours favorables à leur exploitation par image satellite (absence de couverture nuageuse).

Après un bref rappel des contraintes liées à l'utilisation de la télédétection et des caractéristiques des images réceptionnées par la station SEAS, les chapitres suivants exposent les résultats obtenus pour ces deux dernières tâches.

6.1. CONTRAINTES LIÉS À L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION

Si on essaie de quantifier le signal enregistré par des satellites en termes de turbidité, il faut tenir compte d'un certain nombre de contraintes dues à leurs caractéristiques :

- Spectrales : il n'est enregistré que certaines longueurs d'onde (appelée bandes spectrales) qui ne sont pas forcément optimisées pour l'analyse fine de la turbidité ;
- Spatiales : la résolution au sol peut être de quelques centimètres à plusieurs dizaines, voire centaines de mètres ce qui ne permet pas voir distinctement toutes les rivières en fonction de leur largeur ou de l'abondance des couverts végétaux de leurs berges ;
- Temporelle : le laps de temps entre deux survols consécutifs de la même zone au sol peut varier de quelques heures à quelques dizaines de jours. Le synchronisme entre les mesures en rivière et les passages du satellite ne sont donc pas forcément immédiats ;
- Climatique : les satellites utilisables pour ce genre de mesures acquièrent des informations en mode passif dans le domaine optique visible-proche infrarouge. Ce sont les luminances réfléchies par la surface de la Terre qui sont enregistrées et parfois celles-ci sont perturbées voire occultées par la couverture nuageuse. De plus, l'ombre des nuages perturbe grandement le signal enregistré qui devient alors inexploitable.

La solution retenue est d'utiliser les images issues des satellites SPOT 4 et SPOT 5 dont les caractéristiques détaillées sont décrites en annexe 3.

La résolution au sol des bandes spectrales retenues est de 10 mètres et, comme ce type de satellites a la possibilité de pouvoir dépointer son axe de visée de part et d'autre de la trace du satellite, la répétitivité d'enregistrement du même point de la surface de la Terre est réduite à 2 ou 3 jours.

L'abondance de la couverture nuageuse guyanaise et le besoin de disposer d'informations actualisées et durables, nécessaires au suivi de la turbidité sur l'ensemble du département, font qu'il est nécessaire d'avoir une facilité d'acquisition et de programmation du satellite pour des coûts financiers réduits.

Cette facilité a été possible grâce au partenariat avec la station de réception d'images satellitaires SEAS-Guyane (Surveillance de l'Environnement Amazonien par Satellite).

6.2. LA STATION SEAS-GUYANE

Inaugurée le 7 février 2006 à Cayenne la station SEAS-Guyane permet d'exploiter directement les images acquises par les satellites d'observation de la Terre, SPOT et ENVISAT, avec un objectif affiché : créer un centre de référence pour la connaissance et le suivi des dynamiques de l'environnement amazonien et caribéen.

Cette plate-forme technologique, mise en place par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), est unique en Amérique du Sud et en Europe. Elle a été cofinancée en grande partie par la Région Guyane, le CNES, l'État et les fonds européens (FEDER), et fait l'objet d'un partenariat scientifique étroit entre l'IRD et la société Spot Image. Les autres partenaires du projet sont le Conseil général de la Guyane, l'Université des Antilles et de la Guyane, le Pôle Universitaire de la Guyane, l'ESA et Guyane Technopole.

SEAS-Guyane permet, de programmer, de recevoir, de stocker et de traiter les flux de données issus des satellites Spot (2, 4 et 5) et Envisat (Asar et Meris). Pour cela, une antenne capable de recevoir en temps réel des images acquises par les satellites a été installée sur le site du Montabo du CNES-CSG. Les terminaux de réception et le centre de traitement d'images ont été installés au centre IRD de Cayenne, au sein d'un laboratoire de recherche associant partenaires publics et privés.

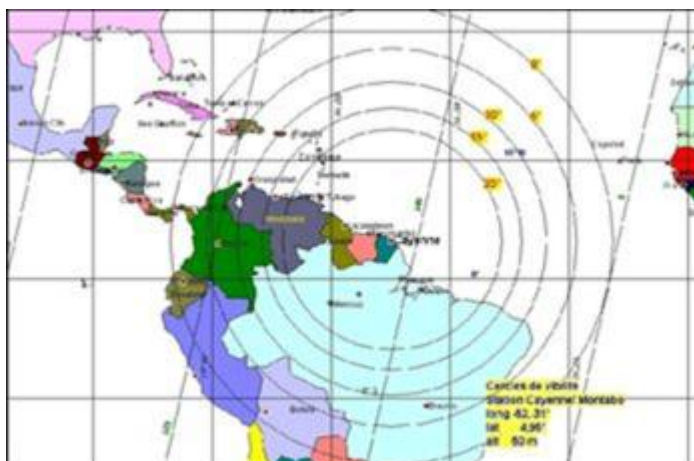


Illustration 22 : Cercle de visibilité de la station SEAS-Guyane

Un appel à projets permanent permet aux différents utilisateurs potentiels de proposer leurs applications à partir des images obtenues. Dans ce cadre, l'ensemble de la

communauté scientifique, des collectivités et des services de l'État bénéficient ainsi d'un accès gratuit aux données recueillies sur le territoire guyanais⁴.

En ce qui concerne le terminal SPOT, celui-ci reçoit, traite et archive la télémesure image des satellites SPOT directement sur le site d'opération. Ceci inclue :

- Le décodage de la télémesure et production des fichiers catalogue ;
- La gestion de l'archive ;
- La production des données image en niveaux 1A, 1B, 2A (voir ces caractéristiques en annexe 1) ;
- L'interface avec le centre de programmation et le support opérationnel de la société propriétaire des satellites SPOT à savoir Astrium Services.

⁴ Jusqu'à l'évolution fin 2013 de la gouvernance de la station SEAS dont la gestion est aujourd'hui assurée par la Région Guyane. Avec le rachat de SPOT par EADS Astrium, les images ne sont plus gratuites.

7. Manipulations expérimentales de mesures de turbidité synchrones avec le passage de SPOT

7.1. PROTOCOLE D'ACQUISITION DES DONNÉES

La première démarche était d'essayer de calibrer les luminances enregistrées par le satellite SPOT avec des mesures de turbidité effectuées en rivière. Pour ce faire, plusieurs demandes de programmation ont été demandées à SEAS-Guyane.

Une première série de programmation a été effectuée pendant la petite saison sèche de 2012, avec une acquisition programmée sur la Mana le 14 mars, et une autre sur l'Approuague le 15 mars. Aux heures de passage des satellites, des profils de turbidité ont été levés (Illustration 23, Illustration 24).

Les mesures ont été effectuées à bord de pirogues à la surface des rivières (profondeur d'une main soit environ 10 cm), afin éviter de prélever des particules en suspension de surface notamment d'origine végétale. Les échantillons sont relevés sur l'axe médian du cours de la rivière. Les turbidimètres ont été étalonnés au préalable.

Les mesures ont été réalisées sur l'Approuague par le BRGM, et sur la Mana par KALITEO. Le protocole de terrain est commun aux deux équipes (détaillé en annexe 4). Seul le modèle du turbidimètre est différent (Turbidimètre HI 98713 d'Hanna Instrument pour KALITEO, turbidimètre TN-100 d'Eutech Instruments pour le BRGM).



Illustration 23 : Profil de turbidité réalisé sur la Mana, le 14 mars 2012

(Image de fond : BD-Ortho de l'IGN)



Illustration 24 : Profil de turbidité réalisé sur l'Approuague, le 15 mars 2012

(Image de fond : BD-Ortho de l'IGN)

Malheureusement, si les mesures de turbidité ont bien été réalisées en rivière, la couverture nuageuse, trop importante les jours des levés, n'a pas permis d'observer la surface du sol depuis SPOT (Illustration 25).

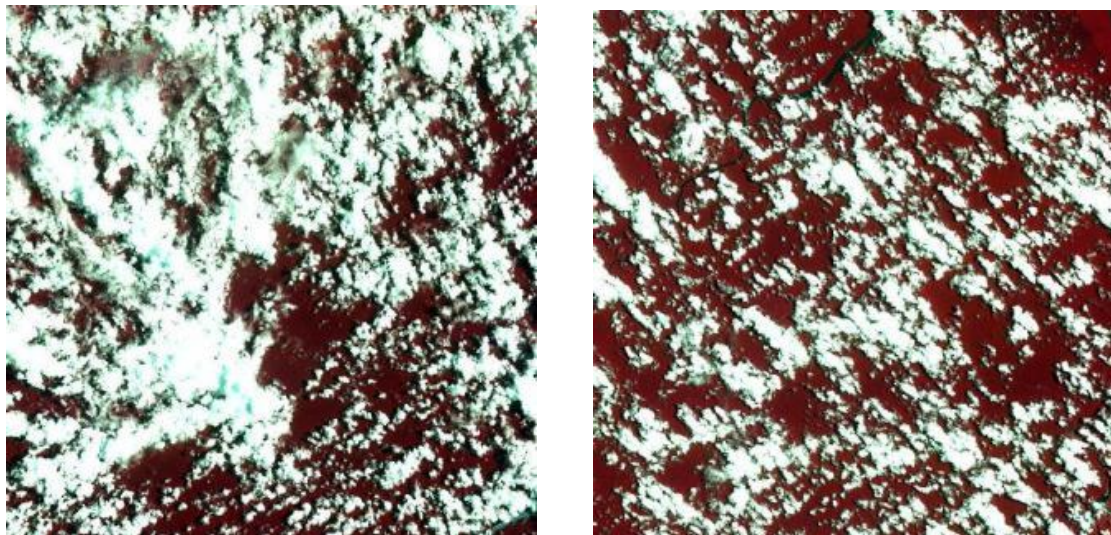


Illustration 25 : Images SPOT prises au cours des mesures synchrones sur la Mana (à gauche) et sur l'Approuague (à droite).

C'est pourquoi une nouvelle campagne a été programmée pour la saison sèche 2012. Deux rivières ont été sélectionnées : le Kourou aval et la Lawa, aux confluences avec l'Inini et le Tampok. L'objectif était de disposer de deux zones avec des valeurs de turbidité suffisamment contrastées et représentant deux enjeux différents : zone sous marnage dans le cas du Kourou, avec facilités d'accès, zone impactée par l'orpaillage illégal dans le cas du Lawa (Illustration 6 pour mémoire).

Sur chaque cours d'eau, deux profils synchronisés avec deux programmations ont été organisés : les 14 et 19 novembre sur le Kourou, et les 19 et 29 novembre sur le Lawa. Sur ces quatre acquisitions, seul le relevé du 14 novembre sur le Kourou est exploitable (Illustration 26, Illustration 27). Le 19 novembre, la couverture nuageuse sur le Kourou était trop importante. Sur le Lawa, l'image du 19 novembre était bonne mais n'a jamais été communiquée par SPOT. Le 29 novembre, un problème de programmation par SPOT n'a pas permis l'acquisition de l'image.

La suite du travail s'intéresse donc à l'exploitation des données acquises le 14 novembre sur le Kourou.



Illustration 26 : Localisation de la zone d'étude sur le Kourou.

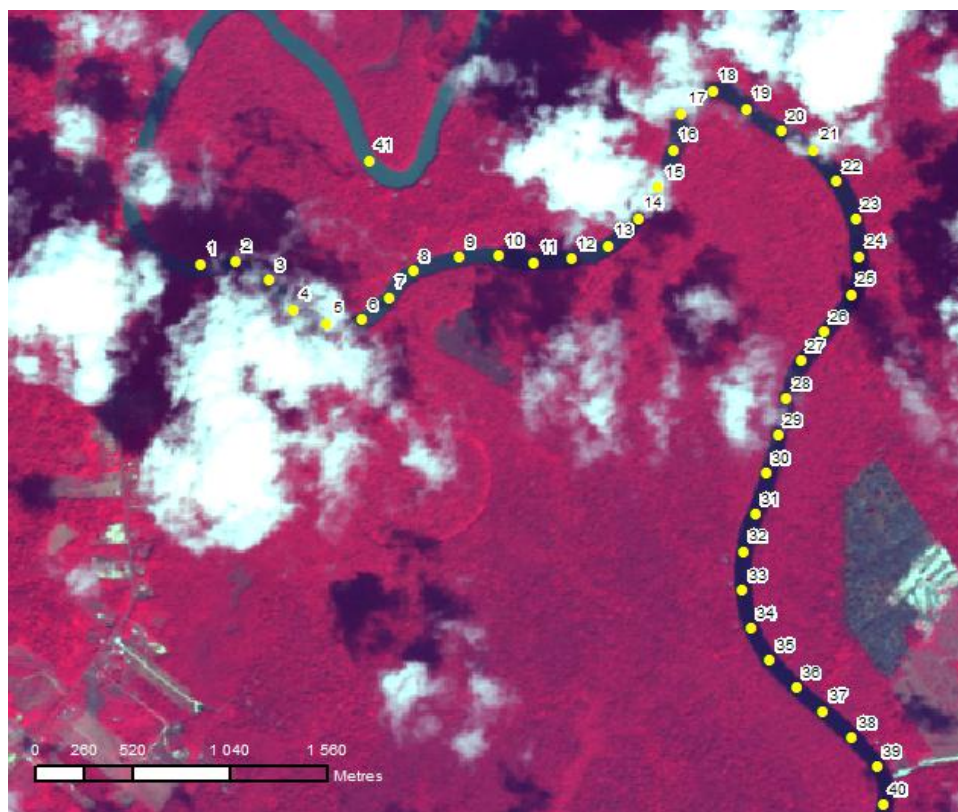


Illustration 27 : Points de mesures de turbidité sur le Kourou le 14 novembre et image SPOT 5.

(Image SPOT 5 690-340 14/11/14 13:42:01)

7.2. MÉTHODE DE TRAITEMENT DES IMAGES

Schématiquement, le traitement des images SPOT est représenté sur le logigramme suivant (Illustration 28). Il requiert l'utilisation de plusieurs logiciels :

- Le logiciel de traitement d'images ENVI (ici en version 5.0) et son module annexe de correction atmosphérique FLAASH (voir § 4.2.2) ;
- Le Système d'Information Géographique ARCGIS (ici la version 10) ;
- Le tableur Excel (ici la version 10) avec son module externe XLStat (version 2012).

Pour être plus explicite, l'ensemble des traitements seront ci-après expliqués à partir de l'image SPOT du 14 novembre 2012.

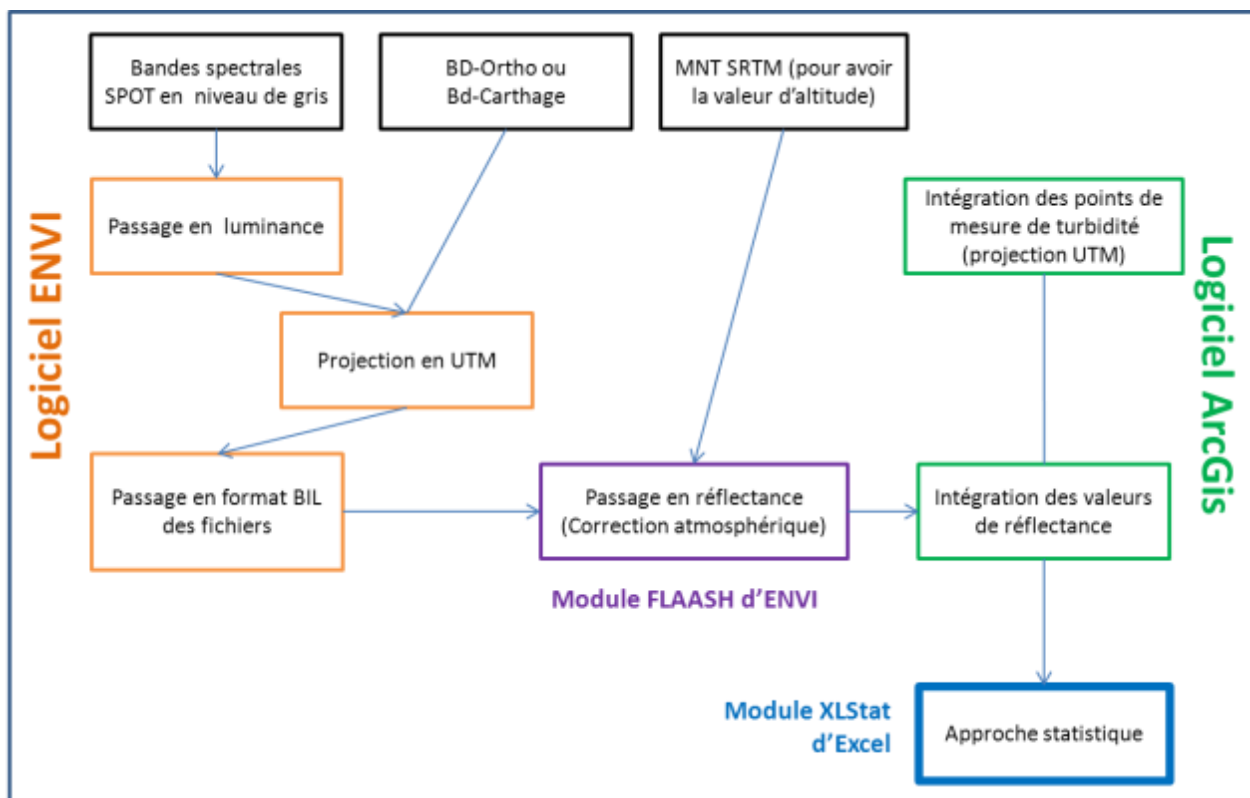


Illustration 28 : Logigramme de la méthodologie de traitement des images SPOT.

7.2.1. Format de mise à disposition

Les images SPOT fournies par SEAS-Guyane sont soit en format 2A (cas de l'image du 14/11/2012) soit en format 1B. Ces spécifications sont expliquées en annexe 5.

7.2.2. Corrections atmosphériques des images

Afin de standardiser le signal enregistré par les satellites, il est nécessaire d'effectuer des corrections radiométriques. Celles-ci consistent dans un premier temps à convertir les valeurs numériques de chaque image (niveaux de gris) en luminance (exprimées en $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) et ensuite d'extraire de cette nouvelle variable les perturbations atmosphériques afin d'aboutir finalement à une mesure physique de la réflectance au niveau de la surface visée.

7.2.3. Le passage en luminance

La première étape consiste à convertir le niveau de gris (DC digital number) en luminance en utilisant les gains absolus fournis avec l'image SPOT. Pour chaque

bande spectrale XSi ($i = 1, 2, 3$ et 4), la conversion de DC^i en luminance L_{sat}^i au niveau du satellite est donnée par la relation suivante :

$$L_{sat}^i = \frac{DC^i}{G^i}$$

Où G^i est le facteur de calibration (*Gain* exprimé en $W^{-1} m^2 sr \mu m$) pour la bande i .

Pour l'image SPOT du 14/11/2012, les G^i sont respectivement 1,106236 1,567885 1,681130 et 10.495446 (voir annexe 7).

7.2.4. Correction des effets atmosphériques

Le module de Correction Atmosphérique FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube) du logiciel de traitement d'image ENVI permet de transformer les images de luminance en réflectance au sol en tenant compte des facteurs atmosphériques. ENVI traite chaque image et chaque empreinte atmosphérique individuellement, afin de créer à chaque fois un modèle unique. Ce modèle sera alors une représentation fiable et spécifique de la scène.

Basé sur un modèle MODTRAN (Matthew al, 2000), FLAASH a été développé par la société Sciences Spectrale Incorporated (SSI). Les scientifiques de SSI ont élaboré des codes informatiques largement reconnus dans le domaine de la modélisation des conditions environnementales et atmosphériques, à des longueurs d'ondes infrarouges, visibles et ultraviolettes. SSI est également bien connu pour son expertise dans le développement d'algorithmes, pour éliminer les effets atmosphériques des données spectrales, acquises au-dessus de la surface de la Terre.

Le module de correction atmosphérique d'ENVI supporte à la fois les données multispectrales et hyperspectrales, acquises par une large gamme de capteurs et dispose de différentes options d'analyse en fonction des besoins spécifiques.

L'annexe 6 (en anglais) explique succinctement le principe du module FLAASH.

Les illustrations suivantes montrent les paramètres à prendre en compte pour effectuer la correction de l'image du 14/11/2013.

The screenshot shows the 'FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters' dialog box. It contains several input fields and buttons for configuring the atmospheric correction process.

Input Radiance Image		
E:\BRGM\images\SELECT\GU_002832\Bradiance_56903401211141342012J		
Output Reflectance File		
E:\BRGM\images\SELECT\GU_002832\REFLECTANCE		
Output Directory for FLAASH Files		
E:\BRGM\images\SELECT\GU_002832\		
Rootname for FLAASH Files		
ROOT_		
Scene Center Location DD <-> DMS		
Lat	Sensor Type	Flight Date
5.010120	SPOT5	Nov 14 2012
Lon	Sensor Altitude (km)	Flight Time GMT (HH:MM:SS)
-52.801212	800.000	11:42:01
	Ground Elevation (km)	
	0.022	
	Pixel Size (m)	
	10.000	
Atmospheric Model Tropical		
Aerosol Model Rural		
Water Retrieval No		
Aerosol Retrieval None		
Water Column Multiplier 1.00		
Initial Visibility (km) 40.00		
Apply Cancel Help Multispectral Settings... Advanced Settings... Save... Restore...		

The screenshot shows the 'FLAASH Advanced Settings' dialog box. It contains several input fields and buttons for configuring advanced settings for the atmospheric correction process.

Spectrograph Definition File	
Aerosol Scale Height (km)	1.50
CO2 Mixing Ratio (ppm)	390.00
Use Square Slit Function	No
Use Adjacency Correction	Yes
Reuse MODTRAN Calculations	No
Modtran Resolution	15 cm-1
Modtran Multiscatter Model	Scaled DISORT
Number of DISORT Streams	8
For Non-nadir Looking Instruments DD <-> DMS	
Zenith Angle	165.728201
Azimuth Angle	-167.385931
Use Tiled Processing	Yes
Tile Size (Mb)	100
Radiance Image	Spatial Subset
Re-define Scale Factors For Radiance Image	Choose
Output Reflectance Scale Factor	10000
Automatically Save Template File	Yes
Output Diagnostic Files	No
OK Cancel Help	

Illustration 29 : Paramètres principaux pour la correction atmosphérique de la scène SPOT du 14/11/2012.

Calcul ou obtention de certains paramètres :

- **Luminance** : la luminance de SPOT est fournie en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$. FLAASH requiert des luminances en $\mu\text{W.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$. Il faut donc multiplier le résultat de la luminance obtenue précédent par 10 (*Scale factor*).
- **Heure GMT** : l'heure fournie dans le fichier METADATA.DIM (annexe 2) est en heure locale. Il faut donc retrancher 3 heures pour obtenir l'heure GMT.
- **Altitude** : l'altitude (*Ground elevation*) a été calculée à partir du MNT SRTM. Elle doit être fournie en km.
- **Altitude du satellite** : celle-ci est directement fournie par le logiciel en choisissant SPOT 5 au niveau de *Sensor Type*.
- Nous n'avons pas sélectionné de modèle d'extraction d'aérosol, faute d'information suffisante sur la connaissance régionale des aérosols. En effet, l'établissement de ces modèles se fait normalement à partir d'un réseau régional d'instruments de mesures qui permet de définir les propriétés optiques des aérosols.
- Pour les capteurs comme SPOT qui ont la possibilité d'être dépointé par rapport à la visée verticale, le module FLAASH demande de spécifier les angles zénithal et azimutal.
 - L'angle d'incidence peut être exprimé à partir de la valeur de l'angle zénithal fourni dans le fichier METADATA.DIM (voir annexe 2). Cependant, pour FLAASH, le nadir est considéré à 180 degrés. Dans le cas de la scène du 14/11/2012, on doit donc soustraire 180 à 14.271799 soit 165.728201 degrés décimaux.
 - L'orientation de la scène est calculée à partir de l'angle azimutal. Pour FLAASH, l'orientation de scène depuis le capteur est prise directement en direction du Nord qui est à 0 degré. Ainsi dans le cas de la scène du 14/11/2014 cela signifie que l'image a été prise à 12,614069 degrés par rapport au Nord. Cependant FLAASH veut la valeur de l'angle comme si on regardait le capteur depuis la Terre, c'est-à-dire l'angle opposé. Sur un cercle de 360 degrés, l'opposé de 12,614069 degrés est $360 - 12,614069$ soit 347,385931 degrés. Comme les valeurs doivent être entre -180 et + 180, la valeur demandée est $-(180-12,614069) = -167.385931$ degrés décimaux.

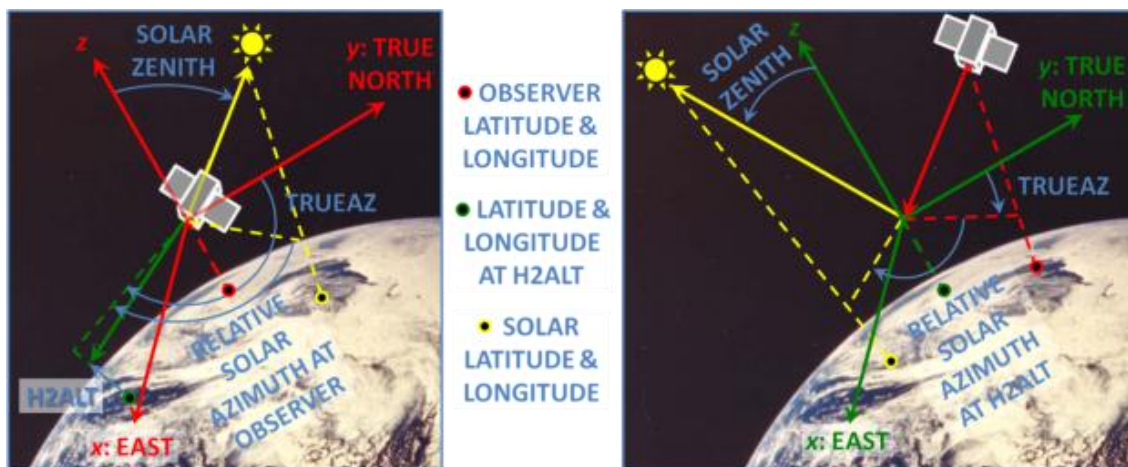


Illustration 30 : Schéma explicatif expliquant les différentes valeurs d'angle.

7.2.5. Corrections géométriques

Malgré les enregistreurs de bord du satellite qui permettent de définir la position du satellite par rapport au sol, il est tout de même nécessaire de corriger plus précisément la géométrie des images notamment sur les zones étudiées.

Cette correction est réalisée à partir de la technique de la prise de points d'amers identiques entre l'image et une réalité terrain parfaitement calée.

En générale, nous avons utilisé soit la BD-Ortho de l'IGN, soit le réseau de cours d'eau issu de la version bêta de la BD Carthage de Guyane.

7.3. RÉSULTAT OBTENUS SUR LE KOUROU LE 14 NOVEMBRE 2012

7.3.1. Les mesures de turbidité en rivière

Les données de terrain sont rassemblées dans le tableau suivant.

Points	CoordX RGFG95	CoordY RGFG95	Heure	Me1 NTU	Me2 NTU	Me3 NTU	Moyenne	Écart- type	Médiane	Météo
1	313 090	557 603	10:58	85,4	88,7	91,4	88,50	3,00	88,7	Nuageux ensoleillé courant vers l'aval
2	313 277	557 619	11:00	70,6	72,4	70,5	71,17	1,07	70,6	Marée descendante
3	313 452	557 515	11:04	82,4	80,8	78,6	80,60	1,91	80,8	Marée descendante
4	313 581	557 357	11:07	81,3	80,2	81,6	81,03	0,74	81,3	Marée descendante
5	313 758	557 283	11:11	60	61	63	61,33	1,53	61	Marée descendante
6	313 944	557 304	11:15	67,7	67,9	65,5	67,03	1,33	67,7	Marée descendante
7	314 095	557 423	11:18	68,1	67,7	66	67,27	1,12	67,7	Marée descendante
8	314 231	557 564	11:23	49,3	49,1	52	50,13	1,62	49,3	Marée descendante
9	314 472	557 638	11:26	49,4	51,2	49,7	50,10	0,96	49,7	Marée descendante
10	314 677	557 648	11:31	38,4	39,1	39,5	39,00	0,56	39,1	Marée descendante
11	314 872	557 612	11:35	37,1	35,5	36,8	36,47	0,85	36,8	Marée descendante
12	315 071	557 631	11:39	44,6	44	46,1	44,90	1,08	44,6	Marée descendante
13	315 270	557 699	11:44	34,6	33,4	33	33,67	0,83	33,4	Marée descendante
14	315 421	557 848	11:51	29,3	31,8	28,9	30,00	1,57	29,3	Marée descendante
15	315 539	558 014	11:55	25,1	24,3	25,2	24,87	0,49	25,1	Marée descendante
16	315 620	558 211	12:00	27,2	29,5	30,1	28,93	1,53	29,5	Marée descendante
17	315 664	558 409	12:04	27,1	25	25,9	26,00	1,05	25,9	Peu de courant
18	315 831	558 531	12:09	20,2	20,5	20,3	20,33	0,15	20,3	Peu de courant
19	316 009	558 434	12:13	23,8	23,2	23,5	23,50	0,30	23,5	Peu de courant
20	316 188	558 316	12:17	20,6	21,8	20,9	21,10	0,62	20,9	Peu de courant
21	316 367	558 210	12:22	20,6	20,5	19,2	20,10	0,78	20,5	Peu de courant
22	316 485	558 044	12:25	17,5	18	18,6	18,03	0,55	18	Peu de courant
23	316 585	557 840	12:29	12,8	12,2	11,4	12,13	0,70	12,2	Peu de courant
24	316 614	557 641	12:35	15	14,4	15,4	14,93	0,50	15	Peu de courant
25	316 571	557 440	12:40	14,4	14,7	13,4	14,17	0,68	14,4	Peu de courant
26	316 423	557 240	12:44	12,7	13,1	13,1	12,97	0,23	13,1	Peu de courant
27	316 297	557 082	12:49	12	12,2	13,4	12,53	0,76	12,2	Peu de courant
28	316 220	556 880	12:54	13,6	13,6	14,2	13,80	0,35	13,6	Peu de courant
29	316 176	556 687	12:59	12,2	11,1	13,1	12,13	1,00	12,2	Peu de courant
30	316 114	556 482	13:03	11,2	12,7	11,4	11,77	0,81	11,4	Peu de courant
31	316 050	556 264	13:09	12,5	12,9	12,8	12,73	0,21	12,8	Pas de courant
32	315 992	556 061	13:13	9,69	11	9,39	10,03	0,86	9,69	Pas de courant
33	315 981	555 855	13:17	12,9	13,06	13	12,99	0,08	13	Pas de courant
34	316 028	555 653	13:24	13,4	14,9	14,7	14,33	0,81	14,7	Pas de courant
35	316 130	555 478	13:29	9,1	10,1	10,3	9,83	0,64	10,1	Pas de courant
36	316 276	555 334	13:34	12	11,7	12,2	11,97	0,25	12	Pas de courant
37	316 421	555 207	13:39	11,11	10,1	10	10,40	0,61	10,1	Pas de courant
38	316 573	555 067	13:43	10,3	9,85	9,79	9,98	0,28	9,85	Pas de courant
39	316 706	554 910	13:47	10,4	12	12,2	11,53	0,99	12	Pas de courant
40	316 740	554 705	13:52	7,97	8,46	8,33	8,25	0,25	8,33	Pas de courant
41	313 988	558 155	14:37	95,9	98,2	99,6	97,90	1,87	98,2	Marée montante

Illustration 31 : Tableau des mesures de turbidité sur le Kourou le 14/11/2012

7.3.2. Les valeurs de réflectance mesurées

Seuls 24 points ont été retenus pour essayer de trouver une loi de régression entre les valeurs de réflectance de chaque bande spectrale de SPOT et les valeurs mesurées de turbidité (voir tableau suivant).

En effet, au vu de l'image de l'illustration 27, les points de mesure suivants n'ont pas été retenus :

- Les points 3, 4, 5, 14, 15, 17, 18, 19, 21 et 28 se trouvent sous des nuages ou des voiles nuageux ;
- Les points 1, 2, 10, 11, 12, 20, 25 se trouvent dans l'ombre des nuages.

Points	Réflectance XS1	Réflectance XS2	Réflectance XS3	Réflectance SWIR
6	0,1044	0,1247	0,1264	0,0895
7	0,0900	0,1241	0,1137	0,0818
8	0,0833	0,1119	0,0959	0,0713
9	0,0795	0,1055	0,0962	0,0768
13	0,0665	0,0930	0,0861	0,0738
16	0,0714	0,0900	0,1000	0,0924
22	0,0413	0,0611	0,0629	0,0922
23	0,0363	0,0604	0,0637	0,0736
24	0,0388	0,0547	0,0694	0,0656
26	0,0443	0,0546	0,0736	0,0685
27	0,0364	0,0592	0,0688	0,0767
29	0,0461	0,0551	0,0789	0,0741
30	0,0426	0,0524	0,0653	0,0688
31	0,0408	0,0472	0,0660	0,0663
32	0,0424	0,0447	0,0664	0,0664
33	0,0392	0,0459	0,0665	0,0612
34	0,0347	0,0425	0,0622	0,0720
35	0,0403	0,0429	0,0578	0,0585
36	0,0356	0,0429	0,0581	0,0666
37	0,0453	0,0464	0,0677	0,0693
38	0,0401	0,0425	0,0677	0,0665
39	0,0395	0,0421	0,0630	0,0638
40	0,0293	0,0384	0,0579	0,0611
41	0,1399	0,1778	0,1448	0,0691

Illustration 32 : Tableau des valeurs de réflectance par bandes spectrales de SPOT.

7.3.3. Résultats statistiques obtenus

La recherche de corrélation a été faite en essayant de trouver des lois de régression linéaire entre les valeurs de turbidité mesurées et les réflectances enregistrées par le satellite dans les différentes bandes spectrales.

La régression linéaire

La régression linéaire est sans aucun doute la méthode statistique la plus utilisée et à défaut celle que l'on a utilisé.

Le principe de la régression linéaire est de modéliser une variable dépendante quantitative Y , au travers d'une combinaison linéaire de p variables explicatives quantitatives, $X_1, X_2, \dots, X_p$. Le modèle déterministe (ne prenant pas en compte d'aléa) s'écrit pour une observation i ,

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i$$

Où y_i est la valeur observée pour la variable dépendante pour l'observation i , x_{ij} est la valeur prise par la variable j pour l'observation i , et ε_i est l'erreur du modèle.

Le cadre statistique et les hypothèses qui l'accompagnent ne sont pas nécessaires pour ajuster ce modèle. Par ailleurs, la minimisation par la méthode des moindres

carrés (on minimise la somme des erreurs quadratiques ε_i^2) fournit une solution analytique exacte.

Le coefficient de détermination du modèle R^2 s'interprète comme la proportion de la variabilité de la variable dépendante expliquée par le modèle. Plus le R^2 est proche de 1, meilleur est le modèle. L'inconvénient du R^2 est qu'il ne prend pas en compte le nombre de variables utilisées pour ajuster le modèle.

Voici ci-après les corrélations obtenues bande par bande (les résultats ont été synthétisés sous XStat).

Bande XS1 (vert)

Ci-après les résultats obtenus pour la réflectance de la bande XS1 (Vert) suivant un modèle de régression linéaire.

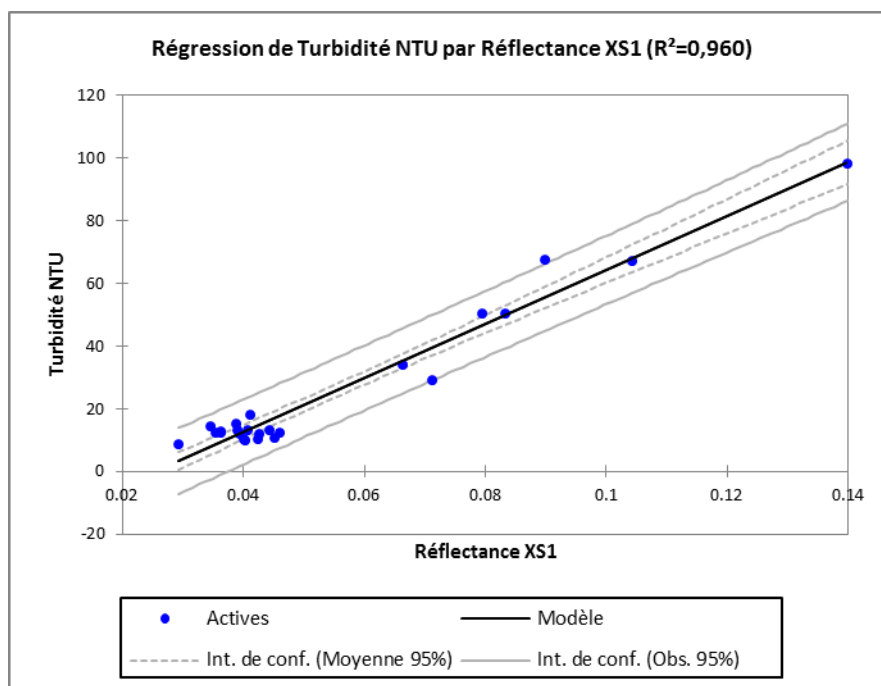


Illustration 33 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } XS1)$.

L'équation du modèle est :

$$Turbidité_{NTU} = 860,523 \cdot \text{Réflectance}_{XS1} - 21,833$$

Les paramètres du modèle sont (t : tolérance et Pr : prédiction du modèle) :

Source	Valeur	Écart-type	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-21,833	2,273	-9,607	< 0,0001	-26,546	-17,119
Réflectance XS1	860,523	37,472	22,965	< 0,0001	782,811	938,234

Illustration 34 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance } XS1)$

Bandes XS2

Ci-après les résultats obtenus pour la réflectance de la bande XS2 (Rouge) suivant un modèle de régression linéaire.

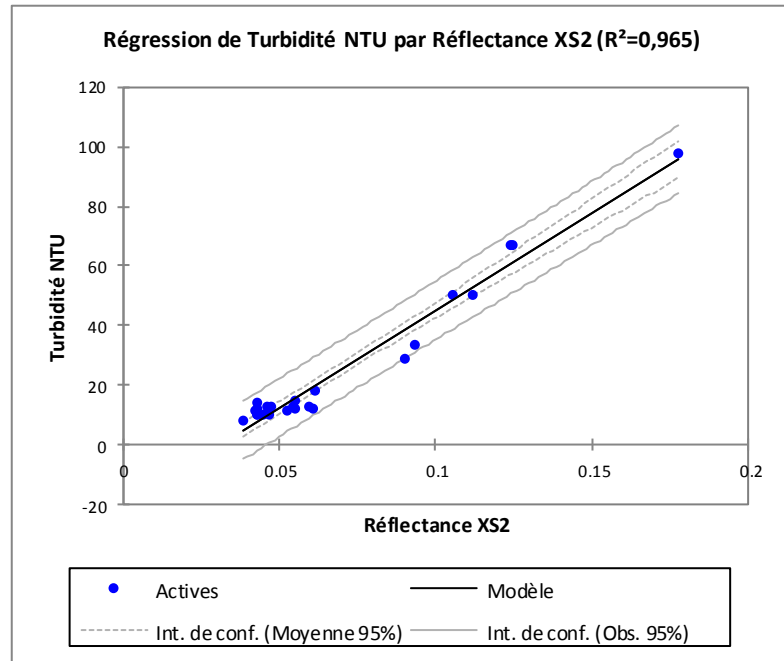


Illustration 35 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance XS2})$.

L'équation du modèle est :

$$Turbidité_{NTU} = 651,353 \cdot \text{Réflectance}_{XS2} - 19,986$$

Les paramètres du modèle sont (t : tolérance et Pr : prédiction du modèle) :

Source	Valeur	Écart-type	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-19,986	2,056	-9,722	< 0,0001	-24,249	-15,723
Réflectance XS2	651,353	26,481	24,597	< 0,0001	596,435	706,272

Illustration 36 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance XS2})$

Bande XS3

Ci-après les résultats obtenus pour la réflectance de la bande XS3 (Proche Infra-Rouge) suivant un modèle de régression linéaire.

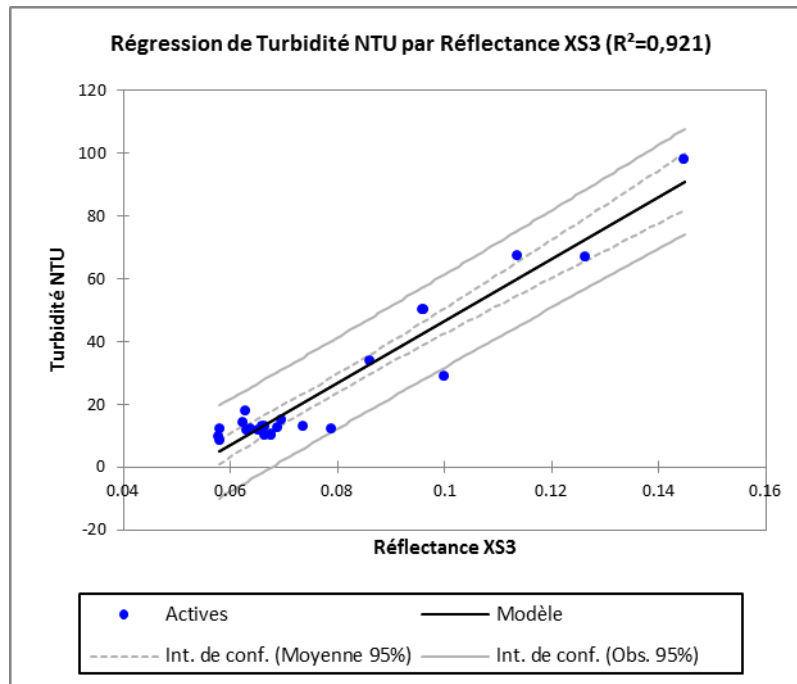


Illustration 37 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance XS3})$.

L'équation du modèle est :

$$Turbidité_{NTU} = 988,357 * \text{Réflectance}_{XS3} - 52,314$$

Les paramètres du modèle sont (t : tolérance et Pr : prédiction du modèle) :

Source	Valeur	Écart-type	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-52,314	5,038	-10,383	< 0,0001	-62,763	-41,865
Réflectance XS3	988,357	61,811	15,990	< 0,0001	860,169	1116,544

Illustration 38 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance XS3})$

Bande SWIR

Ci-après les résultats obtenus pour la réflectance de la bande SWIR (Moyen Infra-Rouge) suivant un modèle de régression linéaire.

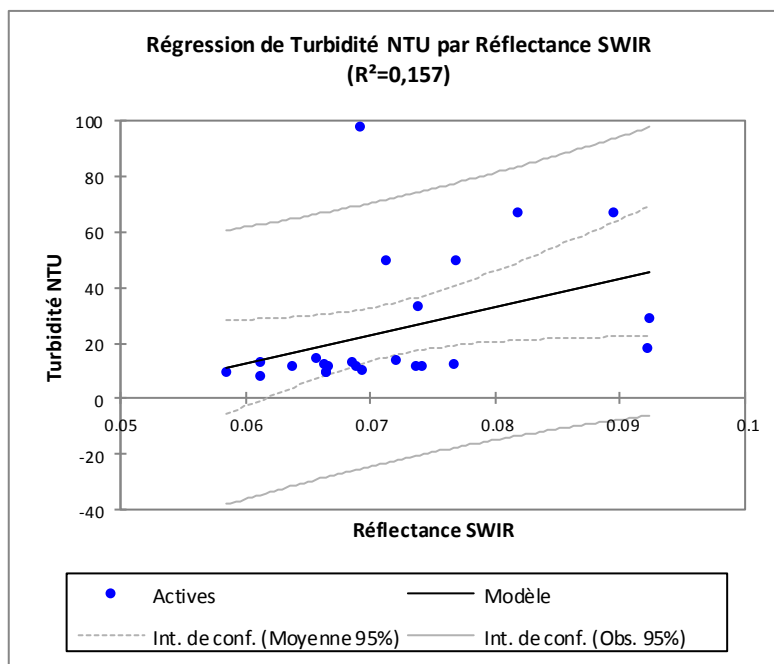


Illustration 39 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance SWIR})$

L'équation du modèle est :

$$Turbidité_{NTU} = 1022,01 \cdot \text{Réflectance}_{SWIR} - 48,430$$

Les paramètres du modèle sont (t : tolérance et Pr : prédiction du modèle) :

Source	Valeur	Écart-type	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-48,430	36,607	-1,323	0,199	-124,347	27,488
Réflectance SWIR	1022,015	505,051	2,024	0,055	-25,397	2069,427

Illustration 40 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance SWIR})$

Discussion

Les meilleures corrélations sont obtenues avec les bandes XS1 et XS2, dans une moindre mesure avec la bande XS3. La bande SWIR est à écarter (voir Illustration 39). Ce résultat est conforme à ce qu'on pouvait attendre compte tenu de la réflectance de l'eau sur la gamme de longueurs d'onde correspondantes.

C'est à partir des valeurs de turbidité ≥ 20 NTU que l'on observe une bonne linéarité des courbes de réflectance des bandes spectrales XS1 et XS2. Lorsque les valeurs de turbidité sont trop faibles les lois de régression sont plus confuses.

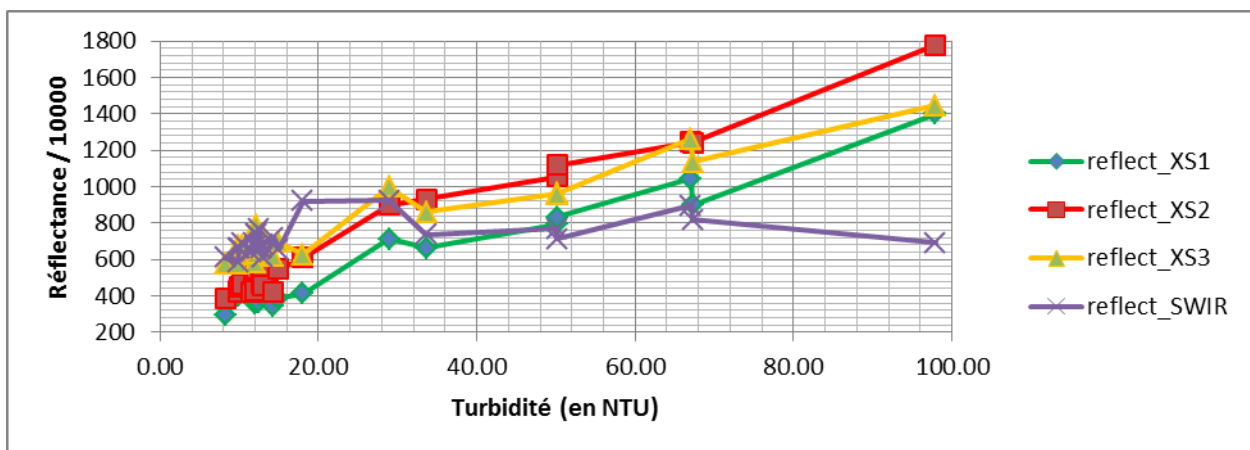


Illustration 41 : Valeurs de turbidité en fonction des valeurs de réflectance des bandes spectrales de SPOT.

Nous avons cherché une loi de régression combinant les valeurs de réflectance de XS1 et de XS2. La solution choisie, la plus simple, est de prendre la moyenne.

Moyenne entre les valeurs de réflectance de XS1 et XS2

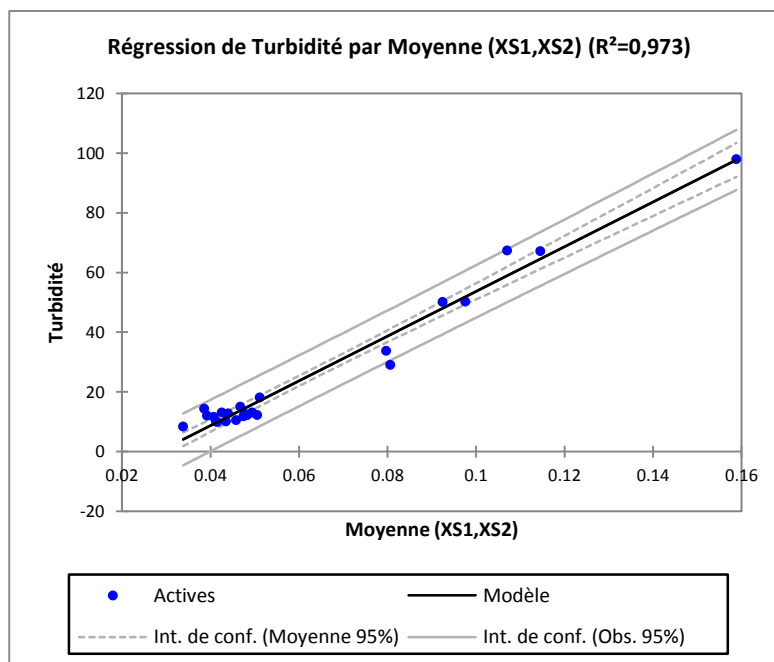


Illustration 42 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance moyenne XS1 et XS2})$.

L'équation du modèle est :

$$Turbidité_{NTU} = 749,123 \cdot \text{Moyenne (XS1,XS2)} - 21,255$$

Les paramètres du modèle sont (t : tolérance et Pr : prédiction du modèle) :

Source	Valeur	Écart-type	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-21,255	1,847	-11,505	< 0,0001	-25,086	-17,423
Moyenne (XS1,XS2)	749,123	26,749	28,005	< 0,0001	693,648	804,597

Illustration 43 : Tableau des paramètres du modèle $Turbidité_{NTU} = f(\text{réflectance moyenne XS1 et XS2})$

L'illustration suivante montre la variation la turbidité sur l'aval de la rivière Kourou le 14 novembre 2012.

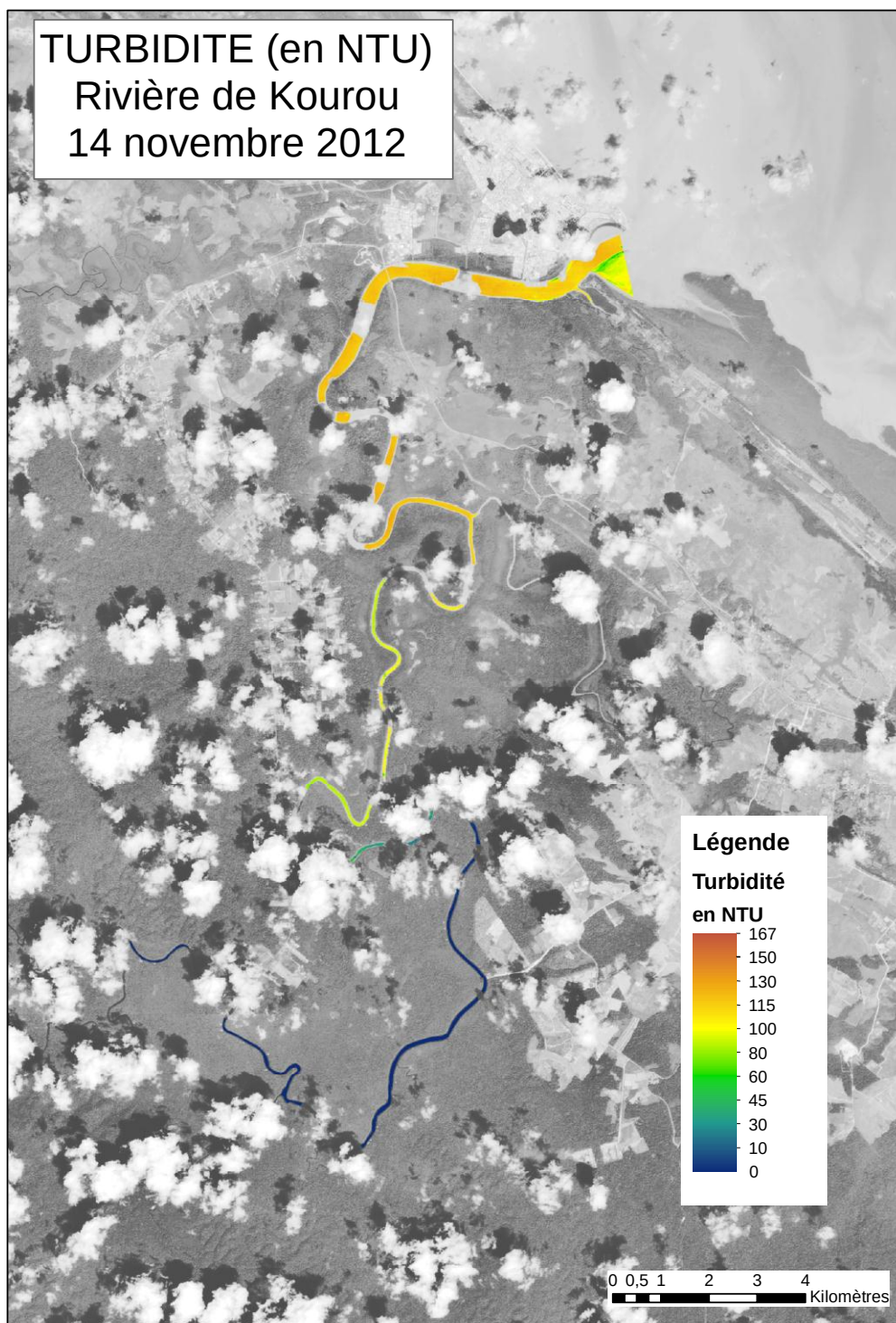


Illustration 44 : Carte de la turbidité sur le Kourou.

8. Approche statistique sur les valeurs de turbidité d'archives

8.1. BASE DE DONNÉES DES VALEURS DE TURBIDITÉ

L'expérimentation précédente a permis de mettre au point la procédure de traitement d'image à utiliser, et d'identifier les bandes spectrales de SPOT pour lesquelles il existe une bonne corrélation entre les valeurs de réflectance calculées et des mesures effectuées en rivière.

Cependant, à la suite du travail de collecte de données mené en 2011-2012 et présenté dans le chapitre 3, nous disposons en Guyane d'une base de données importante de points géolocalisés de turbidité (1474 mesures). Quelquefois, des mesures de matière en suspension (MES) ont également été relevées.

C'est pourquoi dans le cadre de ce projet, la recherche de corrélations turbidité – réflectance SPOT a été recherchée dans les images d'archive et en utilisant cette base de données de turbidité. L'idée était de pouvoir ainsi tester la corrélation établie sur le Kourou.

8.2. COLLECTE DE DONNÉES D'ARCHIVE DE SPOT IMAGE

Les scènes SPOT 4 ou SPOT 5 montrant les points où ont été faites les mesures enregistrées dans la base ont été recherchées dans la base d'archives des images SPOT de la station SEAS-Guyane.

Ce travail de recherche a été réalisé à partir du catalogue Sirius SPOT du SEAS-Guyane (<http://catalog.spotimage.com/PageSearch.aspx>).

Les critères de sélection retenus des scènes SPOT sont les suivants :

1. Pour être acquises gratuitement dans le cadre du projet, les scènes doivent être archivées physiquement sur les serveurs du SEAS-Guyane à Cayenne. Dans ces conditions, il n'a pas été possible d'avoir des scènes dont la date d'acquisition est antérieure à la mi-2005. Seules des scènes de SPOT 4 et SPOT 5 répondent à cette exigence.
2. Les scènes doivent être acquises en mode multispectral (mode couleur) suivant une résolution de 10 mètres au maximum compte tenu de la largeur moyenne des rivières guyanaises.
3. Les scènes sont sélectionnées avec une couverture nuageuse ne dépassant pas 50% de la zone couverte. Ce taux peut paraître élevé mais, comme l'essentiel des nuages observables en Guyane sont des cumulus, il paraît

possible, dans certains cas, d'apercevoir le sol entre les nuages et donc les rivières (voir exemple ci-après).

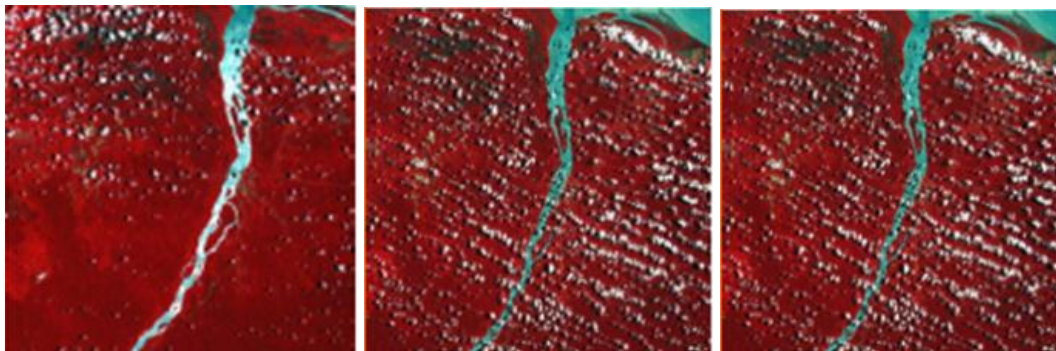


Illustration 45 : Exemple d'une scène sur le Maroni avec a) très peu de couverture nuageuse – 7% b) avec 22% de couverture nuageuse c) avec 50% de couverture nuageuse.

Au total, 184 scènes ont ainsi été collectées. Cela ne signifie pas que toutes ces scènes ont été utilisées car :

- La visualisation des points précis de mesures de turbidité n'est pas toujours possible compte tenu de la dégradation des images utilisées pour le catalogue Sirius (on voit peu les rivières de faible largeur). ;
- La même scène peut servir pour plusieurs sites de mesure.

Après traitement, **86 points de mesure représentant 68 scènes SPOT 4 et SPOT 5 ont pu être utilisés** (voir annexe 7) avec seulement 6 mesures faites le même jour que le passage du satellite.

Il est important de souligner qu'un certain nombre de points fournis étaient visiblement mal localisés, souvent dans les terres et donc loin de la rivière.

8.3. APPROCHE STATISTIQUE

La formule $Turbidité_{NTU} = 749,123 * Moyenne_{(XS1, XS2)} - 21,255$ a été employée sur les mesures collectées précédemment.

Le résultat obtenu montre **qu'il n'existe pas de corrélation** d'autant plus que pour certaines stations, on obtient des valeurs négatives de turbidité calculée.

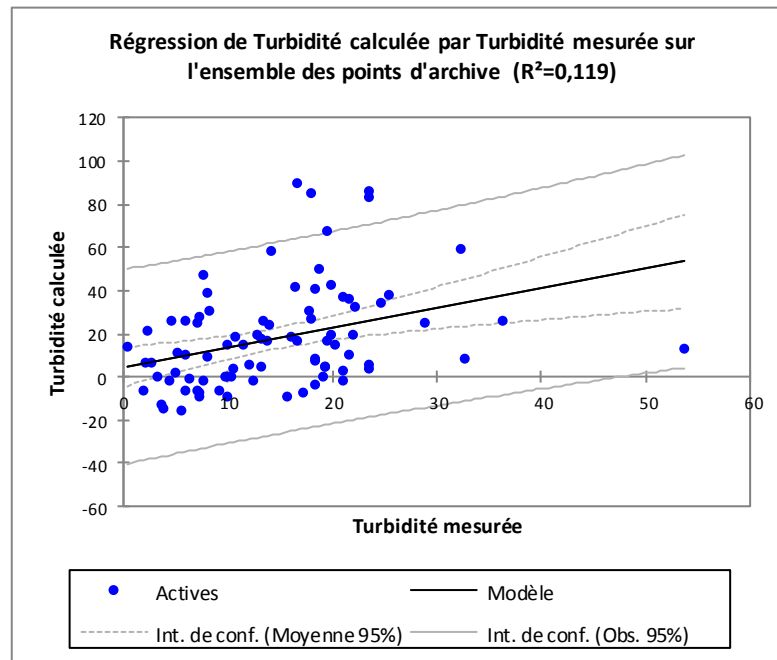


Illustration 46 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue pour Turbidité mesurée (archive) = Turbidité calculée.

Plusieurs explications possibles :

- Les méthodes de mesure de la turbidité ne sont pas les mêmes d'un producteur de donnée à l'autre. Le protocole de prise d'échantillons diffère certainement d'une équipe à l'autre et ont pu évoluer au cours du temps (mesures directement sur place, ou différées en laboratoire).
- Les moyens de mesurer la turbidité ne sont pas les mêmes. Les turbidimètres sont de marques et de technologies différentes, et les protocoles d'étalonnage peuvent avoir varié.
- Les points de mesure ne sont pas pris exactement au même endroit que l'indiquent les coordonnées des points de prélèvements. En effet, les prises d'échantillons peuvent être faites en bordure de rivière, parfois sous couvert végétal, où la turbidité peut être modifiée du fait des variations du courant. Par SPOT, il n'est pas possible de prendre en compte directement ces sites car les pixels mesurés sont dits impurs en mélangeant la réflectance de la rive avec celle de l'eau. La solution retenue est de décaler le point de mesure de réflectance vers l'axe central de la rivière.

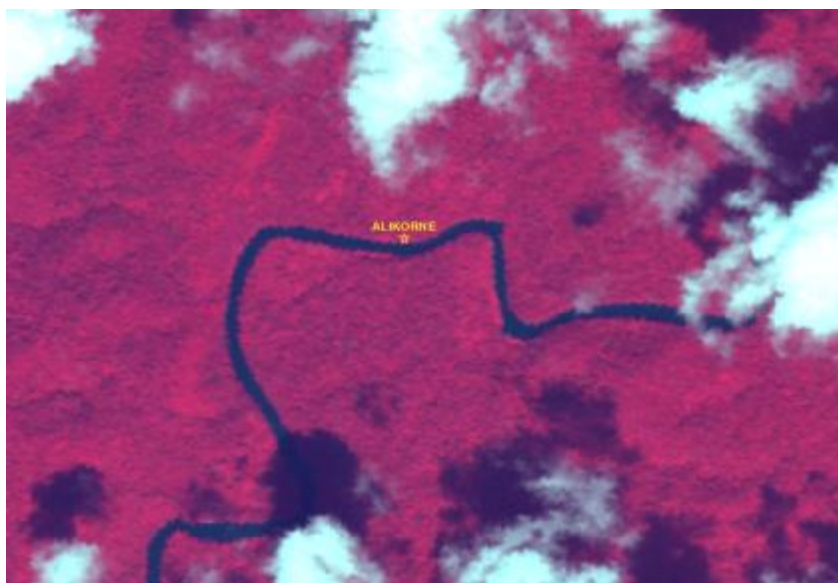


Illustration 47 : Site de mesure pris certainement en bordure de rivière.

- La profondeur de prise d'échantillon peut jouer un rôle important, notamment compte tenu de la forte teneur en colloïdes des eaux de rivières de Guyane (voir ci-après des exemples trouvés dans la littérature de variation de turbidités avec la profondeur).

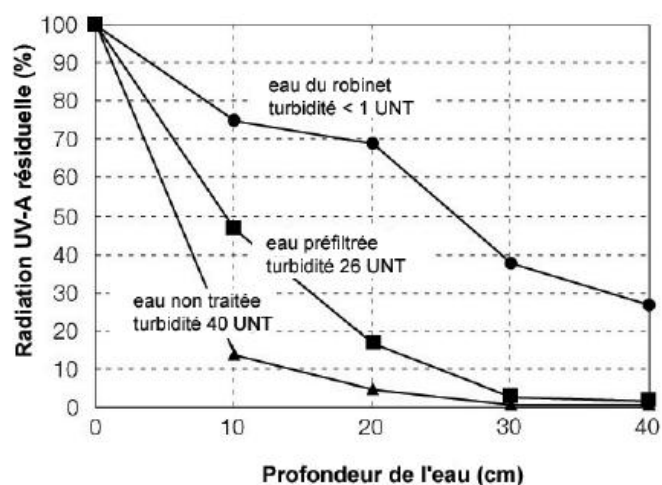


Illustration 48 : Effet de la profondeur de l'eau sur le pourcentage d'UVA (Fiche technique # 7 SODIS).

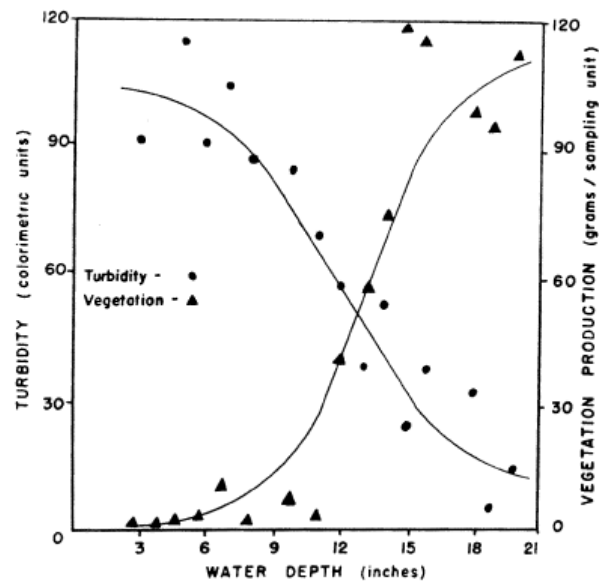


Illustration 49 : Relation entre la profondeur de l'eau, la turbidité et la production végétale aquatique (Robert J. , 1961)

- Les différences de dates entre les mesures de turbidité en rivière et le passage du satellite sont trop importantes, et les conditions locales ont pu évoluer suite par exemple à un épisode pluvieux, une remontée de marée ou une zone d'orpaillage illégal sur un affluent.
- Les caractéristiques de chaque rivière (comme par exemple leur débit, leur largeur, leur profondeur qui conditionnent leur réflectance de surface) indiquent qu'il serait préférable de les traiter individuellement les unes des autres.



La Comté

Saut Fracas

Le Maroni à Apatou

Illustration 50 : Exemple d'images de réflectance sur 3 sites guyanais.

- Les méthodes de prise en compte des effets atmosphériques ne peuvent pas être généralisées d'une date à l'autre.
- La localisation GPS des points de mesure n'est pas suffisamment précise (voir le Maroni à Apatou (Illustration 50)).

8.4. CAS DE LA RIVIÈRE DE LA COMTÉ

En choisissant le site de la Comté pour lequel on dispose de 9 mesures de turbidité acquises, soit synchrones avec une acquisition SPOT, soit décalées au maximum de 10 jours, on obtient le résultat suivant qui n'est encore une fois pas acceptable.

Station	Différence en jours	Caractéristiques scène	R-XS1 (NTU)	R-XS2 (NTU)	R-XS3 (NTU)	Turbidité calculée	Turbidité mesurée
LA COMTE	0	SCENE 5 691-340 06/09/05 13:54:37	0,0759	0,089	0,055	40,510191	18,4
LA COMTE	1	SCENE 5 691-341 06/11/12 13:47:00	0,0603	0,0785	0,062	30,734136	17,7
LA COMTE	5	SCENE 5 691-341 07/02/18 14:01:42	0,0889	0,1015	0,1109	50,06151	18,8
LA COMTE	6	SCENE 5 691-341 07/04/17 13:45:39	0,1253	0,1553	0,124	83,846957	23,4
LA COMTE	3	SCENE 5 691-341 07/06/17 14:11:30	0,024	0,0463	0,027	5,0766735	19,2
LA COMTE	0	SCENE 5 691-341 07/10/05 13:54:23	0,0753	0,0797	0,055	36,802033	21
LA COMTE	10	SCENE 5 691-341 08/07/06 14:03:08	0,0407	0,0676	0,03	19,31001	19,9
LA COMTE	8	SCENE 5 691-341 09/11/08 13:45:13	0,044	0,0565	0,043	16,388431	16,7
LA COMTE	8	SCENE 5 691-341 10/04/07 14:02:25	0,1455	0,1512	0,178	89,877397	16,6

Illustration 51 : Tableau des réflectances mesurées sur le site de la Comté.

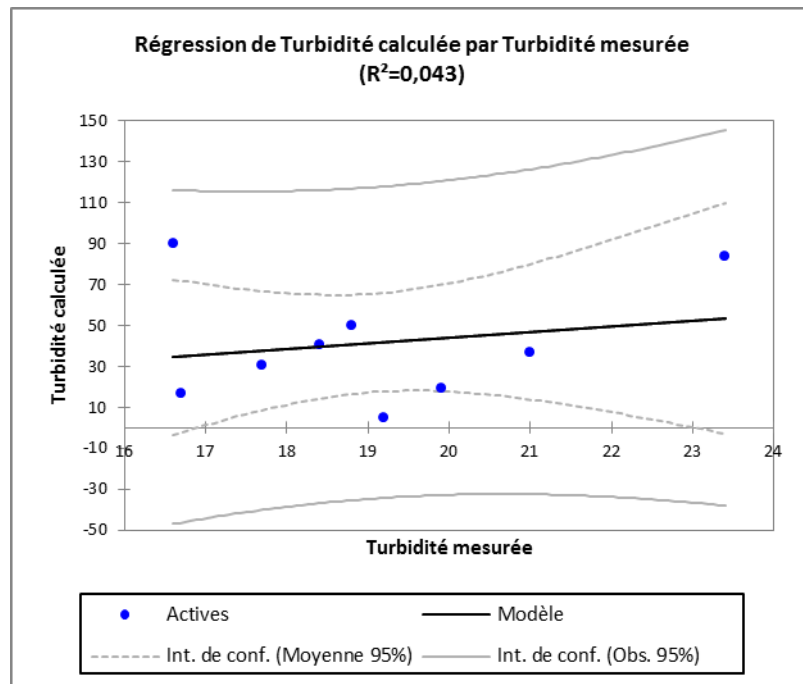


Illustration 52 : Représentation graphique de la loi de régression obtenue sur le site de la Comté

L'équation du modèle est :

$$\text{Turbidité calculée} = 2,796 \times \text{Turbidité mesurée} - 11,938$$

La recherche d'une autre fonction de régression sur la Comté n'a pas permis de trouver une loi suffisamment fiable en prenant les valeurs de réflectance de façon indépendante, ou en les combinant entre-elles.

9. Conclusions et perspectives

Le programme de travail mené de 2012 à 2014 par le BRGM, avec l'appui de Kaliteô, le soutien de la DEAL et la participation active de nombreux acteurs en Guyane (DEAL, Kaliteo, IRD, ONF, PAG, FAG, HYDRECO,) a permis de nombreuses avancées dans le domaine du suivi de la turbidité des cours d'eau de Guyane.

Pour la première fois, **toutes les données acquises jusqu'à 2012 ont été rassemblées et mises à disposition de tous les producteurs. Cette base, constituée de près de 1500 valeurs**, a permis de dresser le premier état des lieux complet du suivi de la turbidité en Guyane, et d'identifier les forces et les faiblesses du dispositif actuel. Il en ressort que les données sont déjà très complètes mais que, d'une part, la fréquence annuelle doit être renforcée sur beaucoup de stations (notamment en saison des pluies, période où la turbidité augmente), d'autre part, certaines zones restent, malgré l'importance des enjeux, trop peu surveillées (Lawa, Maroni, Mana notamment).

Cet exercice a par ailleurs mis en évidence l'importance de la qualité de la donnée et les incertitudes de mesures qui existent d'un producteur à l'autre. La nécessité d'harmoniser les méthodes et les pratiques est devenue évidente, et a abouti à la publication du **premier guide technique de la turbidité en Guyane**. Ce guide, véritable document de référence pour les agents de terrain, est un pas important pour l'acquisition de données comparables entre elles et vers un futur réseau régional. Ce document a été accueilli très favorablement par les producteurs de données, témoignant ainsi de la dynamique qui existe autour de cette question. Sa vocation est aujourd'hui d'être utilisé mais également d'être enrichi et amélioré au gré des missions de terrain et du retour d'expérience des producteurs.

Il apparaît d'ailleurs nécessaire de **poursuivre le travail d'animation du réseau** en instaurant a minima une réunion annuelle des acteurs pour organiser la collecte des données et le réseau régional et pour échanger sur les études menées par chacun. L'organisation régulière d'une journée technique à l'image de celle organisée le 16 avril 2013 semble également souhaitable.

Aujourd'hui, les bases d'un futur « méta-réseau » régional sont jetées, et des pistes sont données pour organiser et optimiser la circulation des données. L'utilisation d'un portail web pour accompagner la collecte, diffuser et valoriser les données semble incontournable.

Si les mesures de terrain doivent être renforcées, les tests menés à partir des images SPOT 5 ont été concluants. Ils ont montré que les **valeurs de réflectance enregistrées par les satellites SPOT pouvaient être calibrées sur les valeurs de turbidité des rivières de Guyane**.

En accord avec la DEAL, des tests ont été réalisés sur plusieurs fleuves : Approuague, Mana, Tampock et Kourou. Sur ce dernier, les tests ont été concluants.

En effet, sur le Kourou, où des mesures de turbidité ont été réalisées en synchrone avec une acquisition du satellite SPOT 5 le 14 novembre 2012, l'étude montre une excellente corrélation des bandes XS1 (vert) et XS2 (rouge) avec un coefficient R^2 de 0,973.

Appliquée aux valeurs d'archive de turbidité du département et malgré l'accès à la totalité des données images d'archives du SEAS-Guyane, les résultats obtenus sont décevants.

Pour aller plus loin sur le suivi de la turbidité par télédétection, il faudrait :

- Continuer à acquérir et à archiver des mesures de turbidité en même temps que l'on effectue des programmations d'images SPOT ;
- Refaire la même expérience sur le Kourou à une période différente (programmation du satellite) ;
- Faire la même étude que celle du Kourou sur d'autres rivières, d'abord de grande largeur (le Maroni, l'Approuague, la Cayenne...), puis de largeur plus faible. Deux campagnes de mesures à deux périodes différentes seraient souhaitables. Avec l'appui, et sur suggestion du PAG, une expérimentation sur la Camopi semblerait pertinente compte tenu des enjeux liés à l'orpaillage illégal et de l'existence de nombreuses données.
- Réaliser un suivi multi-temporel (2 données par mois) sur une rivière afin d'évaluer l'évolution de la turbidité au cours du temps, toujours en fonction de l'acquisition d'images satellites ;

Alors qu'en février 2014, la gestion de la station SEAS-Guyane a été transférée de l'IRD au Conseil Régional, et que la diffusion des images SPOT par EADS-Astrium est payante, il est également temps de s'intéresser à d'autres satellites et sources de données. La faisabilité d'utiliser les données du satellite Landsat, dont les images sont diffusées gratuitement par l'USGS⁵, pourrait être étudiée. Concernant les images SPOT 6, aujourd'hui payantes, mais pour lesquelles le Conseil Régional semble prêt à assurer le financement des images les plus utiles, il serait intéressant de continuer à tester les corrélations ici établies.

⁵ United States Geological Survey

10. Bibliographie

Agences de l'eau (1999), Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau. Rapport de présentation SEQ-Eau (Version 1).

Agence de l'Eau Loire-Bretagne (2001), Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau. Rapport de présentation SEQ-Eau (Version 2), 97p.

Blum A., Joseph B., Galigné D. 2013. Contrôle de surveillance de l'état chimique des masses d'eau de surface de Guyane. Bilan 2012 et propositions d'évolution du réseau. Rapport final. Rapport BRGM/RP-62391-FR.

Comité de Bassin Guyane (2010), Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. SDAGE de la Guyane 2010-2015, 216p. + annexes.

Comité de Bassin Guyane (2014), Etat des lieux du district hydrographique, version validée en bureau du Comité de Bassin, janvier 2014, 139p.

EL HAJJ M., BÉGUÉ A., LAFRANCE B., HAGOLLE O., DEDIEU G., RUMEAU M. (2008), Relative Radiometric Normalization and Atmospheric Correction of a SPOT 5 Time Series, *Sensors 2008*, Vol. 8, pp. 2774-2791

Farah AS. (1994), Bilans de l'érosion chimique et mécanique dans un bassin versant forestier en milieu tropical humide (Prospect aurifère de Yaou, Guyane Française). Rapport BRGM/RR-37993-FR, 155p.

Laperche V., Harris-Hellal J., Moisan M., Joseph B., Bossy C., Dutruch L., Reynouard C., Lanceleur L., Schäfer J., Vigouroux R., Blum A. (2013), Bilan des flux de mercure sur un bassin versant guyanais : de la rivière Boulanger au fleuve Oyak. Rapport final BRGM/RP-62732-FR, 69p.

Lefrançois J. (2007), Dynamiques et origines des matières en suspension sur de petits bassins versants agricoles sur schiste. Thèse de 3^{ème} cycle de l'Université de Rennes 1. 223 p., 106 fig., 15 tab., 1 ann.

Marechal A. (2000), Relation entre caractéristique de la pollution particulaire et paramètres optiques dans les eaux résiduaires urbaines. Thèse de 3^{ème} cycle de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. 229 p., 103 fig., 7 ann.

MATTHEW, M. W., S. M. ADLER-GOLDEN, A. BERK, S. C. RICHTSMEIER, R. Y. LEVINE, L. S. BERNSTEIN, P. K. ACHARYA, G. P. ANDERSON, G. W. FELDE, M. P. HOKE, A. RATKOWSKI, H.-H. BURKE, R. D. KAISER & D. P. MILLER (2000) - Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-based Algorithm. *SPIE Proceedings, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI*. 4049, pp. 199-207.

Office de l'Eau de Guyane. 2010.a. Programme de surveillance physico-chimique des eaux de surface de Guyane. Rapport de campagne 2009 HYDRECO-ASCONIT-CARSO, mars 2010, 49 p.

Office de l'Eau de Guyane. 2010.b. Programme de surveillance physico-chimique des eaux de surface de Guyane. Rapport de campagne 2010 HYDRECO-ASCONIT-CARSO, Septembre 2010, 43 p.

Office de l'Eau de Guyane. 2013. Surveillance et état des milieux aquatiques de Guyane 2012, 39p.

ROBERT J. (1961), Water Depth and Turbidity in Relation to Growth of Sago Pondweed. *The Journal of Wildlife Management*, Vol. 25, No. 4, pp. 436-438

Rouzeau O. (2011), Mesure et suivi de la turbidité des eaux de Guyane par télédétection : Analyse bibliographique. Rapport BRGM/RP-60354-FR.

Ruban G., Joannis C., Gromaire MC., Bertrand-Krajewski JL., Chebbo G. (2008), Mesurage de la turbidité sur échantillons : application aux eaux résiduaires urbaines. *Techniques Sciences et Méthodes (TSM) n°4*, 2008, pp 61-74.

Saplaïroles M. (2010), Contrôle de surveillance de la qualité physico-chimique des eaux continentales de surface de Guyane – Campagne 2010. Rapport BRGM/RP-59830-FR, 89p.

Saplaïroles J., Joseph B. (2011), Contrôle de surveillance de la qualité physico-chimique des eaux continentales de surface de Guyane, Campagne 2011, Rapport BRGM/RP-60904-FR, 88p.

STROPPIANAA D., PINNOCKB S., PEREIRA J.M.C, GRÉGOIRE J-M. (2002), Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia, *Remote Sensing of Environment*, Volume 82, Issue 1, pp. 21–37

Vauchel P., Browne O. (1992), Alimentation en eau des populations urbaines et rurales de la Guyane Française. Rapport semestriel n°2. Juillet – Décembre 1989.88p.

Vaucher P. (1996), Alimentation en eau des populations urbaines et rurales de la Guyane Française. Rapport de synthèse. Rapport ORSTOM. Avril 1996. 61p.

Annexe 1

Guide technique pour le suivi de la turbidité en Guyane

GUIDE TECHNIQUE POUR SUIVI DE LA TURBIDITE EN GUYANE

VERSION FEVRIER 2014



Guide technique pour le suivi de la turbidité en Guyane

1	<u>INTRODUCTION.....</u>	5
1.1	PERIMETRE DU GUIDE	5
A)	POURQUOI LA TURBIDITE ?	5
B)	UN GUIDE PRATIQUE : POURQUOI ET POUR QUI ?	6
C)	SITUATION ACTUELLE DE LA SURVEILLANCE	8
1.2	DEFINITIONS – PARAMETRES MESURES	9
A)	QU’EST-CE QUE LA TURBIDITE ET MES ?	9
B)	QUELLE EST L’ORIGINE DE LA TURBIDITE?.....	10
C)	COMMENT MESURE T ON LA TURBIDITE ?	11
D)	EXISTE-T-IL DES NORMES ET DES SEUILS A NE PAS DEPASSER ?.....	13
E)	QUELLE EST L’UNITE DE MESURE?.....	14
2	<u>LE TURBIDIMETRE.....</u>	15
2.1	LES DIFFERENTS TYPES DE TURBIDIMETRE	15
A)	GENERALITES.....	15
B)	QUELS TYPES DE TURBIDIMETRE UTILISE-T-ON EN GUYANE ?	16
2.2	ETALONNAGE DE L’APPAREIL.....	17
A)	POURQUOI ETALONNER?	17
B)	COMMENT PROCEDER ?	18
C)	LES ETALONS : ATTENTION !.....	19
2.3	ENTRETIEN GENERAL DU MATERIEL	19
A)	COMMENT NETTOYER LES CUVETTES ?	19
B)	OU ACHETER DES NOUVEAU ETALONS ?	20
C)	DYSFONCTIONNEMENT DU MATERIEL.....	21
3	<u>PREPARATION DE LA MISSION</u>	22
A)	CHECK LIST	22
B)	FICHE DE TERRAIN	22
4	<u>MESURE DE LA TURBIDITE IN SITU.....</u>	24

4.1	PROCEDURE.....	24
A)	OU MESURER ?.....	24
B)	COMBIEN DE MESURES PAR POINT?	25
C)	QUAND MESURER ?.....	26
D)	COMMENT PRELEVER?	26
4.2	LES RESULTATS	29
A)	MEMO DES VALEURS TYPES EN GUYANE.....	29
B)	ENREGISTREMENT ET DIFFUSION DES DONNEES	29
5	<u>REFERENCES – CONTACTS</u>	<u>30</u>
5.1	BIBLIOGRAPHIE	30
5.2	ABREVIATIONS	30
5.3	LEXIQUE	31
5.4	CONTACTS.....	32
6	<u>ANNEXES.....</u>	<u>33</u>
6.1	COMMENT CALIBRER LE TURBIDIMETRE TN-100/ T-100 ?	33
6.2	COMMENT CALIBRER LE TURBIDIMETRE ODEON ?.....	35
6.3	COMMENT CALIBRER LE TURBIDIMETRE 430 IR ?	37
6.4	COMMENT CALIBRER LE TURBIDIMETRE HANNA HI 98713 ?.....	39

Liste des figures

Figure 1 :	Localisation des stations de mesures	8
Figure 2 :	Relation entre les mesures de turbidité (NTU) et les teneurs en MES (mg/L d'eau filtrée) dans un bassin versant guyanais.....	10
Figure 3 :	Fonctionnement du disque de Secchi	12
Figure 4 :	Fonctionnement du néphélomètre	12
Figure 5 :	seuils d'aptitude à la biologie pour les parametres MES et turbidité. D'apres le SEQ-EAU version 2, 2001. valeurs non reglementaires.....	13
Figure 6 :	TABLEAU DE SYNTHESE DES TURBIDIMETRE UTILISE EN GUYANE (situation debut 2013).....	16
Figure 7 :	Différentes concentrations de formazine.....	17
Figure 8 :	Principe général de l'étalonnage	18
Figure 9 :	Etalons du turbidimètre HI 98712 (0/15/100/750 NFU)	18

Figure 10 : Nettoyage des cuvettes	20
Figure 11 : Précaution température	21
Figure 12 : Station de pompage de mariapoula	24

Auteurs : A. Guiraud (Kaliteo), A. Blum (BRGM) avec la participation de la DEAL (Myriam Debris, Stéphanie Rey) et des partenaires du projet (FAG, ONF, OEG, PAG, IRD, ARS, Gendarmerie, HYDRECO).

1 INTRODUCTION

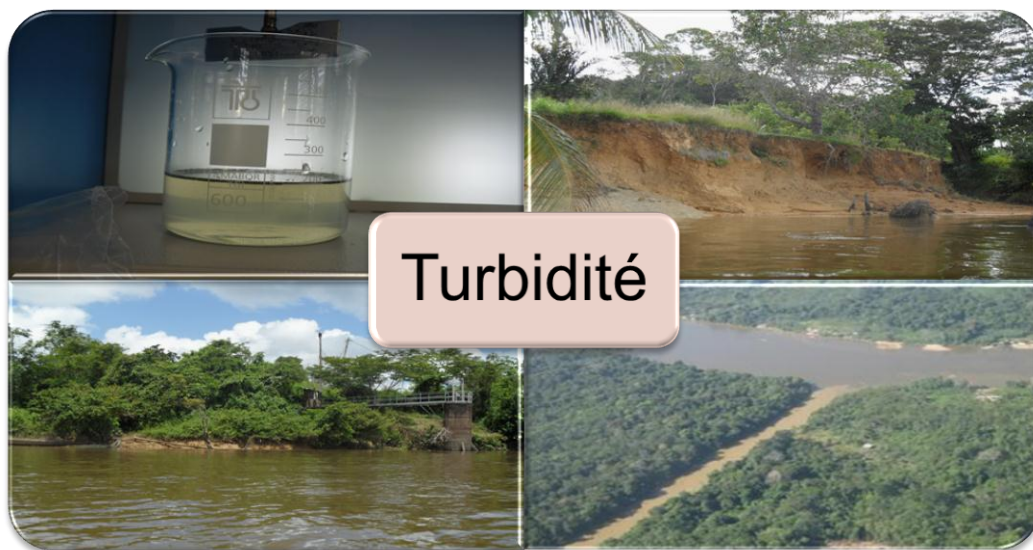
1.1 Périmètre du guide

a) *Pourquoi la turbidité ?*

La transparence de l'eau – et, son contraire, la turbidité – constitue un paramètre essentiel de sa qualité. L'apport plus ou moins important de matières solides en suspension dans l'eau vient en effet détériorer son état, pouvant perturber très significativement le milieu aquatique (allant jusqu'à le rendre inapte aux conditions de vie pour la faune et la flore) et son aptitude à la potabilisation pour la consommation humaine.

En Guyane, la grande majorité de la population est alimentée en eau potable par les eaux de surface prélevées dans les différents fleuves que compte le département. Par rapport à la turbidité, cette eau peut être rendue impropre i) du fait du marnage au niveau des zones d'influence de la marée dans les fleuves, ce qui provoque une remise en mouvement importante des sédiments fluviaux et/ou marins, et ii) du fait de l'activité minière, essentiellement alluvionnaire, qui peut induire dans le réseau hydrographique en aval des sites d'orpaillage, le transfert d'énormes quantités de boues.

En 2011-2012, la DEAL, avec le soutien du BRGM et de Kaliteo, a rassemblé l'ensemble de mesures turbidité disponibles et a dressé un premier état des lieux de la donnée turbidité en Guyane.¹



¹ Blum A., Guiraud A., Rouzeau O. (2014), Suivi de la turbidité des eaux de Guyane. Etat des lieux et recommandations. Approche par télédétection. Rapport BRGM/RP-61632-FR.

b) Un guide pratique : pourquoi et pour qui ?

De nombreux acteurs (OEG, DEAL, IRD, ONF, Police de l'eau, PAG, HYDRECO, BRGM, FAG, ARS...) mesurent depuis quelques années la turbidité des cours d'eau dans des secteurs spécifiques, au niveau de stations de surveillance, etc., avec un pas de temps plus ou moins régulier. Malgré la variété des objectifs poursuivis par chacun (police de l'eau, lutte contre l'orpaillage illégal, suivi réglementaire en application de la directive cadre sur l'eau, protection des captages d'eau potable, etc....), la mutualisation des données et le partage d'expériences entre organismes a suscité l'intérêt de tous.

Cet exercice de mutualisation des données a par ailleurs montré que le matériel utilisé pour le suivi de la turbidité, sa gestion ainsi que les pratiques sur le terrain étaient relativement disparates et pouvait impacter la représentativité des données collectées. Par ailleurs, les agents en charge de la réalisation des mesures ne sont pas toujours des spécialistes du suivi des eaux.

Devant ces constats, il est apparu nécessaire d'harmoniser les protocoles de mesure, de les exposer dans un guide pratique et d'accompagner cet effort d'une formation des agents directement impliqués dans les suivis. C'est dans ce contexte que le présent guide a été rédigé.

Ce document a pour vocation d'être un guide pratique à usage de tous. Il n'est ni une norme ni une méthode unique de suivi de la turbidité. Son propos est d'être adapté aux besoins et au contexte spécifique de la Guyane.

Cette première version -Avril 2013- rassemble un premier ensemble de conseils et de recommandations. Le retour d'expériences des organismes partenaires et en particulier des agents de terrain permettra de l'enrichir et de l'affiner dans une deuxième version.

Principaux organismes		Synthèse des données disponibles
	DEAL	-Réseau DCE ; -Evaluation de l'impact de l'orpaillage alluvionnaire sur l'environnement ; -Mesures ponctuelles version papier avant 2000.
	PAG	-Evaluation de la perturbation aurifère sur certaines criques et fleuves.
	BRGM	-Réseau DCE de suivi de l'état physico-chimique des cours d'eau (partenariat ONEMA, suivi DEAL/OEG)
	ARS	-Contrôle sanitaire pour le captage des eaux superficielles;
	OEG	-Réseau DCE de suivi de l'état écologique des cours d'eau; -Réservoirs biologiques de Guyane Française.
	ONF	-Etude de la qualité des eaux de surface sur des anciens sites miniers. -Suivi de la qualité des petites masses d'eau.
	IRD	-Elaboration de l'indice biotique de qualité des milieux continentaux.

c) *Situation actuelle de la surveillance*

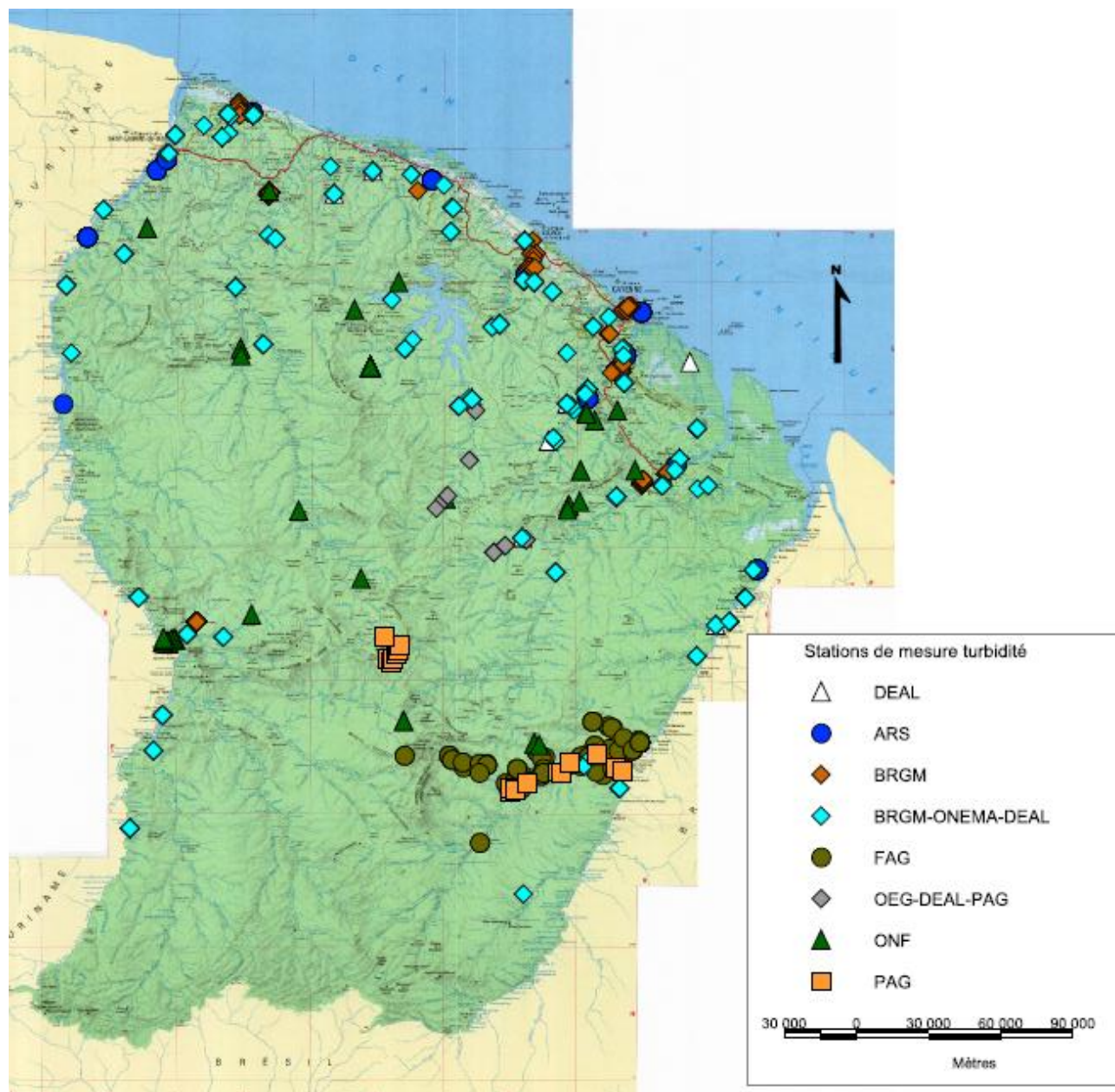


FIGURE 1 : LOCALISATION DES STATIONS DE MESURES

1.2 Définitions – paramètres mesurés

a) *Qu'est-ce que la turbidité et MES ?*

➤ **Matières En Suspension:**

Les matières en suspension (MES) correspondent à des **particules de faible taille et/ou densité qui limitent leur chute par gravité dans l'eau**. Les MES représentent les matières non dissoutes maintenues en suspension dans le liquide par effet d'agitation.

La mesure des MES est intéressante pour apprécier, voire quantifier si la mesure du débit est disponible, la charge de sédiments qui transite dans le cours d'eau, soit naturellement du fait du ruissellement et de l'érosion des sols, soit du fait des activités humaines (déforestation, rejet de STEP ou industriel, activités minières, activités agricoles, urbanisation....). La chimie de l'eau est par ailleurs intimement liée aux teneurs en MES. C'est donc une information complémentaire de la turbidité présentée ci-après.

La concentration en MES s'exprime en mg/L. L'analyse est généralement faite en laboratoire après prélèvement d'un volume d'eau non filtré.

➤ **Turbidité :**

La turbidité désigne la **réduction de la transparence d'un liquide** par la présence de matières non dissoutes. La turbidité correspond à la **propriété optique de l'eau** qui fait que la lumière incidente est diffusée ou absorbée. Il s'agit d'un paramètre dont la signification dépend de la technique de mesure utilisée. Plusieurs mesures optiques rendent compte de la turbidité comme la néphélométrie, l'opacimétrie et la turbidimétrie.

➤ **Relation entre turbidité et MES**

La turbidité exprime donc la concentration en MES. Tout en notant que des particules, en concentrations très différentes, peuvent avoir les mêmes valeurs de turbidité si elles sont de types très différents. La mesure néphélométrique de turbidité est, en effet, fonction de la concentration, de la taille, de la forme et des coefficients de réfraction des particules présentes.

C'est donc la nature des particules qui guide la relation entre turbidité et MES. La corrélation entre le coefficient de diffusion b , calculé en mesure NTU, et la masse totale des MES dépend donc de :

- la répartition en taille des particules
- la relation entre le volume total et la masse totale. Le coefficient de diffusion b dépend du volume de l'ensemble des particules rencontré. Pour obtenir la conversion en termes de masse, il faut connaître la valeur moyenne de la masse volumique du volume d'eau échantillonné.

La figure suivante illustre la relation turbidité-MES dans un bassin versant de Guyane et met en évidence la variabilité de cette relation d'une saison à l'autre.

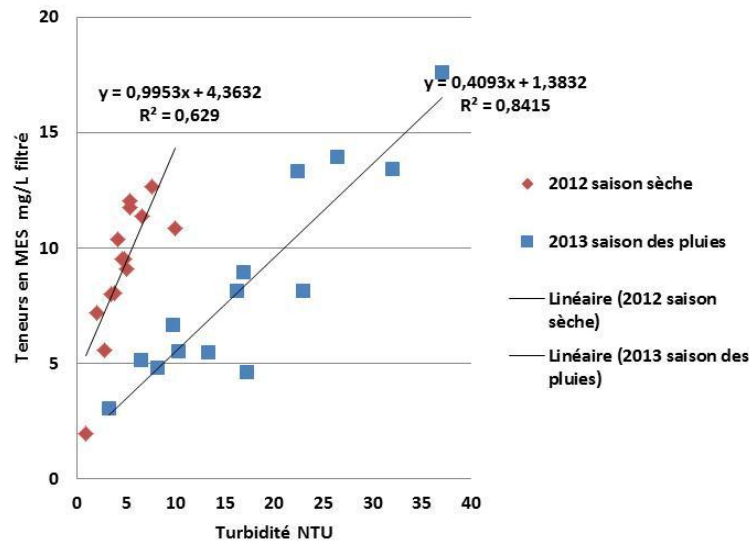


FIGURE 2 : RELATION ENTRE LES MESURES DE TURBIDITE (NTU) ET LES TENEURS EN MES (MG/L D'EAU FILTREE) DANS UN BASSIN VERSANT GUYANAIS.

En définitive, pour obtenir **une relation cohérente entre la turbidité et les matières en suspension**, les **mesures doivent se faire dans un même milieu avec un même appareil, calibré avec les mêmes étalons**.

b) *Quelle est l'origine de la turbidité?*

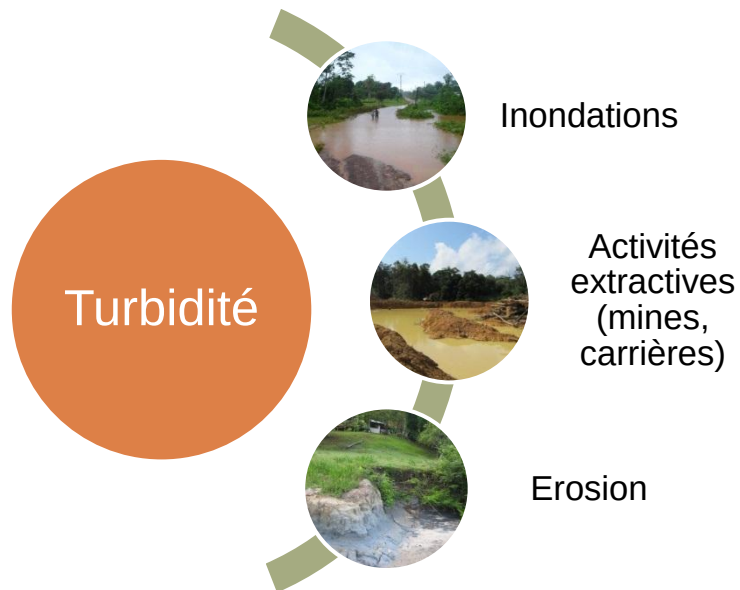
La turbidité peut être causée des phénomènes naturels mais également anthropiques.

En Guyane, par exemple, la turbidité peut augmenter naturellement à cause des phénomènes :

- d'inondations et de ruissellement,
- de marnage,
- glissement de terrain,
- alluvions de l'Amazone, etc.

Cependant la turbidité est souvent un marqueur d'une pression anthropique telle que :

- la déforestation,
- la présence de bateaux du type dragage, le trafic fluvial,
- l'activité humaine perturbant la terre (par exemple la construction),
- les activités extractives (carrières, mines)
- etc.



c) *Comment mesure t on la turbidité ?*

Plusieurs mesures optiques rendent compte de la turbidité, on trouve par exemple:

- **Des méthodes visuelles comme le disque de Secchi** qui permet d'apprécier la transparence de l'eau vue par un œil humain.

Le disque (d'une vingtaine de centimètre) est fixé au bout d'une corde et on le laisse descendre jusqu'à sa disparition, puis on note la longueur de la corde. On remonte ensuite la corde jusqu'à réapparition puis on note à nouveau la longueur. La profondeur du disque de Secchi est le point médian entre ces deux mesures. Cet exercice est répété plusieurs fois de suite. **On retient la moyenne des mesures.**



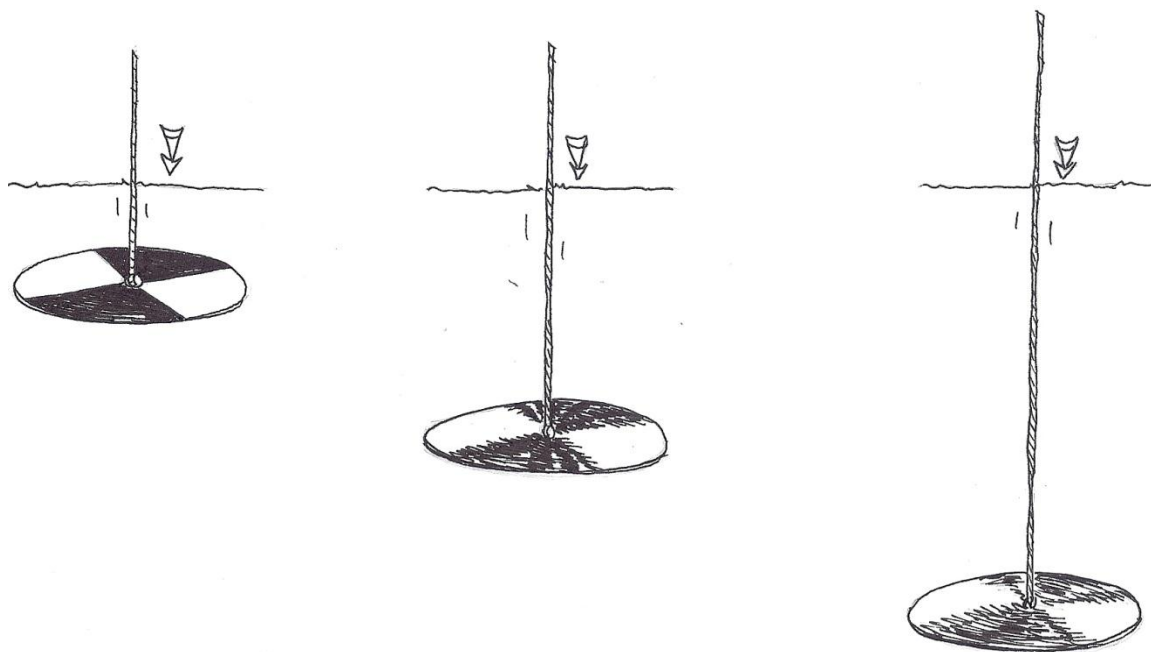


FIGURE 3 : FONCTIONNEMENT DU DISQUE DE SECCHI

- Des méthodes plus précises comme le **néphélomètre** qui mesure l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 90 degrés par rapport au trajet de la lumière incidente.

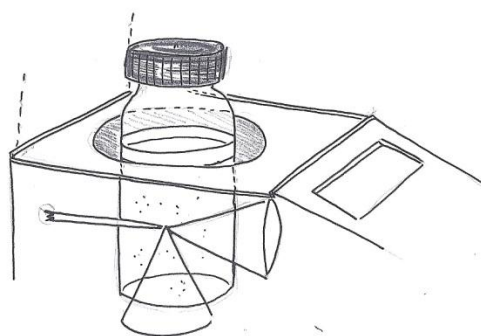


FIGURE 4 : FONCTIONNEMENT DU NEPHELOMETRE

d) *Existe-t-il des normes et des seuils à ne pas dépasser ?*

Les normes et seuils s'appliquent distinctement aux milieux (cours d'eau, eaux littorales, eaux souterraines) et aux rejets (rejets de stations d'épuration, rejets miniers....).

- **Normes et valeurs guides pour les cours d'eau**

A chaque usage de l'eau (eau potable, suivi environnemental...) correspond des normes et des objectifs. Concernant le suivi général de l'état chimique et écologique des cours d'eau exigé par la Directive cadre sur l'eau 2000/60/CE qui organise la gestion de l'eau dans les Etats membres, il n'existe aucune norme ou valeur seuil imposée. Ce texte ne prend cependant pas en compte les spécificités des régions d'outre-mer et dans le cas de la Guyane, le contexte amazonien et équatorial impose un suivi régulier de la turbidité et des MES. L'impact de certaines activités et notamment l'orpaillage illégal le confirme.

Lorsqu'il s'agit de prélever de l'eau pour la production d'eau potable, des normes de qualité de l'eau brute prélevée existent. Elles sont inscrites dans l'arrêté du 11 janvier 2007. Ce texte exige ainsi que **la concentration en MES des eaux superficielles prélevées pour la consommation humaine ne dépasse pas 25 mg/L. Pour la turbidité aucune limite sur eau brute n'est fixée.**

Les MES et la couleur de l'eau font partie des paramètres qui contribuent à l'altération de la qualité de l'eau et pénalise ainsi potentiellement les fonctions biologiques. Sans que des valeurs seuils ou normes n'aient pu être déterminées, le SEQ-Eau (Système d'Evaluation de la Qualité des eaux) développé à la fin des années 90 et début des années 2000 par les agences de l'eau et le ministère de l'environnement prévoyait un classement des eaux pour les paramètres MES et turbidité selon les valeurs suivantes. **Ces valeurs peuvent être utilisées comme des valeurs guides. Elles ne sont nullement réglementaires.** Elles ont par ailleurs été définies pour des cours d'eau métropolitain et ne prennent pas en compte les spécificités de nos cours d'eau.

Biologie	Classe d'aptitude →	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
	Indice d'aptitude →	80	60	40	20	
	PARTICULES EN SUSPENSION					
	MES (mg/l)	25	50	100	150	
	Turbidité (NTU)	15	35	70	100	
	Transparence (m)	2	1	0,5	0,25	

FIGURE 5 : SEUILS D'APTITUDE A LA BIOLOGIE POUR LES PARAMETRES MES ET TURBIDITE. D'APRES LE SEQ-EAU VERSION 2, 2001. VALEURS NON REGLEMENTAIRES

- **Normes pour les rejets d'eaux usées**

L'arrêté du 22 juin 2007 exige que les concentrations en **MES** dans les eaux rejetées par les stations d'épuration ne dépassent pas **35 mg/L**. Cette norme s'applique également aux rejets miniers.

e) *Quelle est l'unité de mesure?*

Il existe plusieurs unités qui dépendent du matériel utilisé :

- ➔ La mesure utilisant la *formazine* comme étalon. Elle possède deux unités de mesure de la turbidité normalisées en (NF EN ISO 7027) :
 - **FNU** (Formazine Nephelometric Unit), ou NFU.
 - **FAU** (Formazine Attenuation Unit) mesure la lumière transmise à 180 °.
- ➔ L'unité de mesure la plus couramment utilisée est le **NTU** (*Nephelometric Turbidity Unit*).
- ➔ Les mesures plus anciennes sont :
 - la chandelle de Jackson **JTU** (Jacksons turbidity Units)
 - Le disque de Secchi (**mg/L SiO₂**)

Vérifier votre matériel et identifier l'unité de votre appareil

Des correspondances ont été établies entre ces différentes unités :

- 1 NFU = 1 FAU.
- 1 JTU = 19 NFU
- 1 mg/L SiO₂ = 7,5 NFU



- Pour des turbidités inférieures à 10 - 20 NFU la relation entre unité de mesure est **1 NFU = 1 NTU**.
- Pour des turbidités supérieures à 20 NFU, la correspondance entre les deux types d'unité devient **1 NFU = 0,6 NTU**.

2 LE TURBIDIMETRE

2.1 Les différents types de turbidimètre

a) Généralités

La turbidité est causée par la présence de matières non dissoutes, mais finement dispersées. La turbidité peut être déterminée par la mesure de l'atténuation d'un faisceau lumineux lors de son passage à travers le liquide ou par la mesure de l'intensité du rayonnement diffusé.

Le rayonnement diffusé, qui est une propriété des liquides, est utilisé pour obtenir les mesures de turbidité.

Les Etats-Unis et l'Europe ne s'entendent toutefois pas sur l'utilisation d'une méthode normalisée :

- L'USEPA et les «Standard Methods» recommandent l'utilisation d'une source de lumière visible selon une longueur d'onde de 400 à 600 nm pour la turbidité,
- tandis que l'Union européenne adhère à la méthode à infrarouge (norme ISO 7027). Cette dernière méthode a l'avantage de présenter une faible sensibilité à la couleur.



Cuvette



Turbidimètre



Étalons



Sonde

b) Quels types de turbidimètre utilise-t-on en Guyane ?

En Guyane, il n'existe pas une grande diversité de turbidimètres utilisés. Cependant, ils n'utilisent pas la même unité car le modèle HI 98713 conforme ISO 7027 utilise un infra rouge et le résultat est donné en NFU contrairement au modèle EUTCH Instrument qui propose un résultat en NTU. Pour une meilleure exploitation de données, les unités doivent être figurées **IMPERATIVEMENT**.

En plus de ces turbidimètres légers de terrain, des systèmes de mesure en continu peuvent être installés. Avec l'avantage d'avoir plusieurs mesures dans le temps qui peuvent être corrélées aux facteurs climatiques ou aux marées. L'inconvénient principal est le risque de vandalisme d'un tel dispositif.

Matériels utilisés	Organismes (2013)
	Hanna instrument HI 98713 conforme à la norme ISO 7027. La gamme de mesure est de 0.00 à 1 000 FN U (Formazine Nephelometric unit) – ONF – Kaliteoenvironnement – NBC
	ODEON Mesure directe dans le milieu, sans prélèvement. De 0 à 4 500 NTU. – PAG
	EUTECH instrument TN-100/ T-100. La gamme de mesure est de 0 à 1 000 NTU (Nephelometric Turbidity Unit.) – PAG – Hydreco – BRGM
	WTW Turb 430 IR. La gamme de mesure est de 0 à 1 100 NTU – DEAL (police de l'eau)

FIGURE 6 : TABLEAU DE SYNTHESE DES TURBIDIMETRE UTILISE EN GUYANE (SITUATION DEBUT 2013)

2.2 Etalonnage de l'appareil

a) *Pourquoi étalonner?*

Lorsque les composants vieillissent et que les équipements sont soumis à des variations de température ou à des contraintes mécaniques, leurs performances peuvent être altérées. Après un temps d'exploitation, les indications d'un appareil de mesure sont erronées, il faut apporter aux mesures des corrections. De plus, il est nécessaire que les mesures de turbidité puissent être comparables, elles nécessitent de faire référence à un étalon ou matériau de référence international, c'est le cas de la **formazine**.

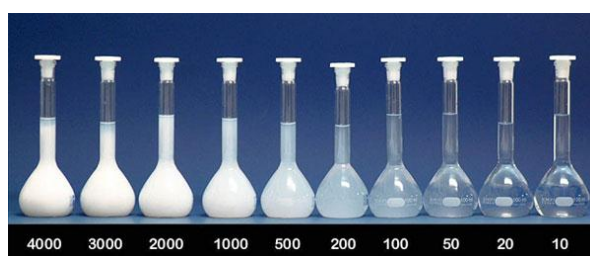
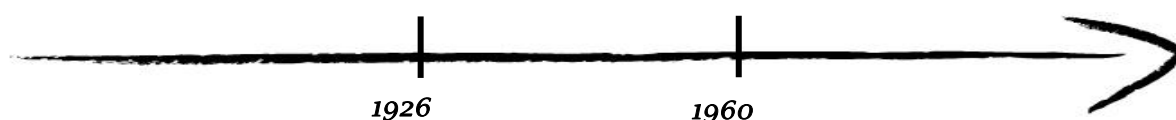


FIGURE 7 : DIFFERENTES CONCENTRATIONS DE FORMAZINE

Elle a été proposée comme étalon en 1926, mais elle ne fut reconnue qu'en 1960. Elle présente l'avantage de pouvoir être reproduite à partir de produits chimiques purs servant de matériau de référence et permettant d'obtenir une incertitude certifiée.



Avant l'adoption de la formazine, d'autres « étalons » ont existé comme la silice, la terre de foulon, le kaolin, la terre de diatomées ainsi que des sédiments purifiés à l'acide. Les résultats n'étaient pas très satisfaisants mais cela permettait « d'étalonner » les turbidimètres en fonction des applications. De plus, ces étalons n'étaient pas internationaux.

L'étalonnage d'un appareil de mesure est l'opération qui consiste à contrôler les indications par comparaison avec une solution dit « étalon ».

b) *Comment procéder ?*

Chaque appareil de mesure propose sa méthodologie pour étalonner l'appareil mais le principe reste le même. Plusieurs étalons avec différentes concentrations connues sont introduits dans l'appareil afin d'apporter les corrections nécessaires.

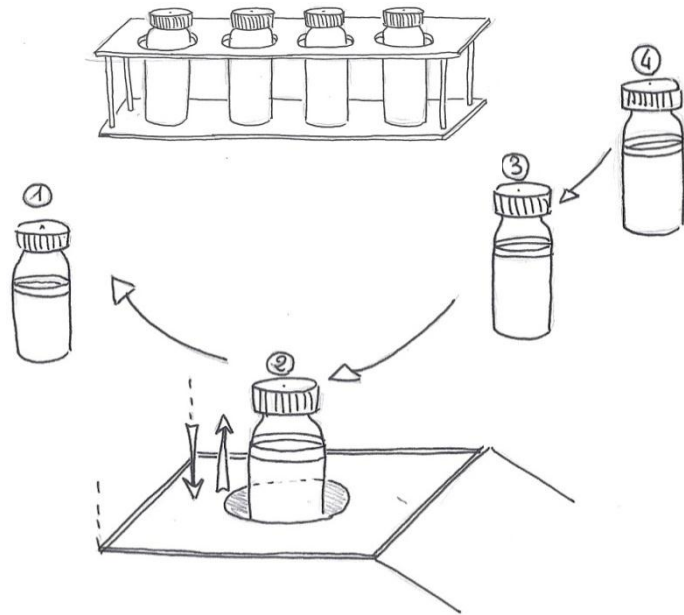


FIGURE 8 : PRINCIPE GENERAL DE L'ETALONNAGE

Les fabricants conseillent un étalonnage minimum tous les 3 mois. **Il semble plus pertinent d'étalonner avant chaque campagne de mesure afin de permettre une plus grande fiabilité des mesures.**

Concernant le turbidimètre avec immersion de la sonde (par exemple ODEON), le capteur NTU ne nécessite que peu d'étalonnage. Celui-ci doit être réalisé à partir d'une solution de formazine qui a une durée de vie limitée.

Les différents modes opératoires sont proposées pour les turbidimètres mentionnés ci-dessus.



FIGURE 9 : ETALONS DU TURBIDIMETRE HI 98712 (0/15/100/750 NFU)

c) Les étalons : **Attention !**

Les étalons ont un rôle essentiel dans la qualité et la fiabilité des données, il faut donc respecter quelques règles essentielles:

- Ne stocker et n'utiliser les étalons standards de turbidité que dans les cuvettes originales.
- Stocker les cuvettes autant que possible debout.
- Stocker les étalons standards à une température comprise entre 5 et 25 °C.
- Eviter impérativement les températures supérieures à 35 °C.
- Ne pas exposer les étalons standards de turbidité à un rayonnement solaire direct.
- Les étalons standards de turbidité doivent s'être adaptés à la température ambiante du turbidimètre avant leur utilisation (ne pas dépasser 35 °C).
- **La durée de conservation des étalons standards de turbidité est de 12 mois** dans le cas d'un stockage correct



Afin d'anticiper les changements d'étalons prévoir une période dans l'année où vous aller systématiquement commander de nouveaux étalons même si vous les avez peu utilisés. En effet, compte tenu des délais nécessaires pour acheminer le matériel en Guyane, il faudrait anticiper la commande 1 mois avant la mission de terrain.

2.3 Entretien général du matériel

a) Comment nettoyer les cuvettes ?

La cuvette est une partie très importante du système optique. Le faisceau lumineux atteint l'échantillon en passant à travers la cuvette en verre. Ainsi le faisceau lumineux peut être perturbé par des imperfections diverses. Les cuvettes doivent donc être propres et exemptes de dépôt, de tache, de buée ou de marque susceptibles d'affecter le faisceau lumineux. Attention : proscrire l'utilisation de liquide vaisselle pour le nettoyage des cuvettes. Prévenir l'apparition de rayures qui peuvent fausser la mesure. Remplacer les cuvettes qui seraient rayées.

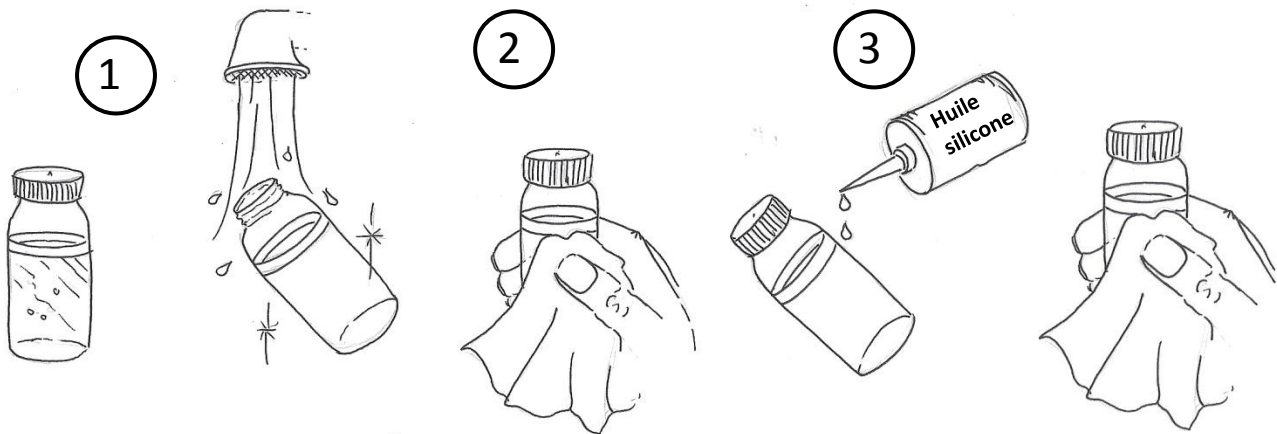


FIGURE 10 : NETTOYAGE DES CUVETTES

- 1 Après usage, les cuvettes sont rincées à plusieurs reprises avec de l'eau chaude et déminéralisée. Certains fabricants conseillent de laver les cuvettes avec un peu d'acide permettant d'enlever le biofilm (bactéries, champignons, algues) pouvant être présent à l'intérieur des cuvettes.
- 2 Elles peuvent ensuite être placées dans un support de façon à permettre à l'eau de s'écouler et au tube de sécher ou simplement avec un tissu propre.
- 3 Pour gommer les imperfections mineures, la cuvette doit être huilée à l'extérieur avec de l'huile silicone spécialement pour des mesures de turbidité inférieures à 1 NFU.

Les étalons sont contenus dans des cuvettes scellées. Ils ne nécessitent aucun entretien particulier sauf le remplacement des étalons chaque année.

Concernant la sonde, le capteur NTU doit être maintenu propre surtout au niveau de la tête contenant les fibres optiques. Toute trace de biofilm ou d'encrassement pourrait induire des erreurs de mesure.

Après chaque utilisation, procéder au rinçage du capteur avant de le stocker.

Si la tête du capteur présente un encrassement, nettoyer la avec un peu d'eau tiède et de l'eau savonneuse. Une éponge pourra être utilisée mais ne pas employer d'éponge abrasive type éponge verte. Ensuite rincer le capteur avant de le stocker.

b) Où acheter des nouveau étalons ?

Plusieurs fournisseurs possibles :

- HANNA instruments
- FISCHER Scientific
- AVANTEC

Contact pour la Guyane : Autour et Compagnie, Rémire-Montjoly.

c) *Dysfonctionnement du matériel*

Sur chaque appareil lorsque vous observez un dysfonctionnement celui-ci délivre un message d'erreur.



Sur le terrain, il est impératif de toujours se munir du mode d'emploi afin de connaître la nature des messages d'erreurs. Afin de résoudre rapidement les problèmes rencontrés.

Généralement les messages affichés concernent la batterie ou indique que le niveau de pile est faible. Parfois si vous n'avez pas renouvelé vos étalons, votre matériel vous indique un message d'erreur pouvant empêcher l'étalonnage.

Cependant, spécifiquement en Guyane, les conditions climatiques entraînent parfois des températures très élevées ce qui empêche le bon fonctionnement de l'appareil et entraîne subitement des valeurs erronées.



3 PREPARATION DE LA MISSION

a) Check list

Il s'agit ici d'une liste indicative que chacun est libre d'adapter.

Matériel de base	⇒ GPS ⇒ piles de rechange ⇒ carte imprimée du secteur ⇒ appareil photo ⇒ fiche terrain ⇒ crayons ⇒ eau distillée (pour le rinçage) ⇒ essuie-tout (pour essuyer après le rinçage !) ⇒ becher ou sceau pour prélever l'eau et opérer les triplicats ⇒ parapluie ou bâche de protection pour protéger le turbidimètre de la pluie pendant la mesure et pendant le transport ⇒ touque ou mallette étanche pour protéger le matériel ⇒ carnet de terrain	
Matériel optionnel	⇒ canne de prélèvement ou corde (selon conditions d'accès) ⇒ gants de protection (selon la nature de l'eau mesurée ou prélevée, en particulier si il s'agit d'un rejet d'eau usée) ⇒ débitmètre ⇒ télémètre (pour mesurer la largeur de la rivière) ⇒	
Ne pas oublier !	⇒ Entrer les point GPS dans son appareil ⇒ S'informer des conditions météorologiques (pluie, soleil, vent, etc.) ⇒ Les horaires des marées	

b) Fiche de terrain

Préalablement à la campagne de mesures, il est nécessaire de réaliser une fiche de terrain qui sera adaptée en fonction des objectifs. A titre d'exemple et de support, la fiche suivante est proposée.

Fiche terrain type pour le suivi de la turbidité en Guyane

informations pouvant être pré-remplie

Date(s) mission de terrain :

⇒ Secteur (cours d'eau, commune...)

⇒ Nom du préleveur :

⇒ Organisme :

⇒ Référence du turbidimètre :

⇒ Etalonnage avant campagne : *oui* ☐ *non* ☐

⇒ Moyens d'accès au site

⇒ Activités humaines dans le secteur

⇒ Marnage *sous influence* ☐ *sans objet* ☐

informations de contexte et méthodes à renseigner sur le terrain

⇒Référentiel pour coordonnées GPS

⇒ Lieu des mesures : *in situ* ☐ *Labo* ☐

⇒ unité mesure de la turbidité:

⇒ autres mesures physico-chimiques

température	Eh
-------------	----

conductivité pH

⇒ **Commentaire particulier :**

exemple : problème avec le turbidimètre, ...

[illegible]

* (orpaillage illégal, légal, agriculture, extraction bois, route, ville, village...)

champs grisés : champs à renseigner obligatoireent

version 2 (suite journée préleveurs)

4 MESURE DE LA TURBIDITE IN SITU

4.1 Procédure

a) Où mesurer ?

Faut-il réaliser les mesures le long des berges ? Au milieu du cours d'eau ? Selon un transept longitudinal ? Transversal ? Depuis un pont ? Une embarcation ?

La réponse à toutes ces questions dépend de l'objectif visé. Très schématiquement, on peut identifier 3 grands types d'objectifs en Guyane (comme dans les autres régions) :

- Le suivi de la turbidité au titre de la **DCE et à des fins de connaissance générale** de l'état des cours d'eau ; Dans ce cas, c'est la turbidité « moyenne » de l'eau dans un bassin versant qui intéresse l'organisme en charge du suivi. Sur un cours d'eau, la mesure sera faite de préférence au milieu et en plusieurs points en fonction de points particuliers, notamment des confluences. Mesures à faire en aval de confluence + 2 en amont sur chaque bras.
- le **contrôle sanitaire des captages d'eau potable** :
il s'agit de mesures faites par l'ARS et la SGDE qui visent à suivre la conformité des eaux prélevées pour l'alimentation en eau potable ;
Dans ce cas une mesure (ou plutôt un triplicat) au droit du point de pompage suffit et est approprié à l'objectif visé.
- le suivi **des impacts de l'activité humaine** :
agriculture, activités extractives légales ou illégales, déforestation, activités portuaires, ... Dans ce cas, c'est l'effet des rejets dans le milieu qui est à surveiller. La mesure de la turbidité se fera donc au plus près de l'exhaure. Des points supplémentaires à pas réguliers en aval permettront de compléter le bilan et d'apprécier l'éventuelle dilution des rejets dans le cours d'eau étudié.



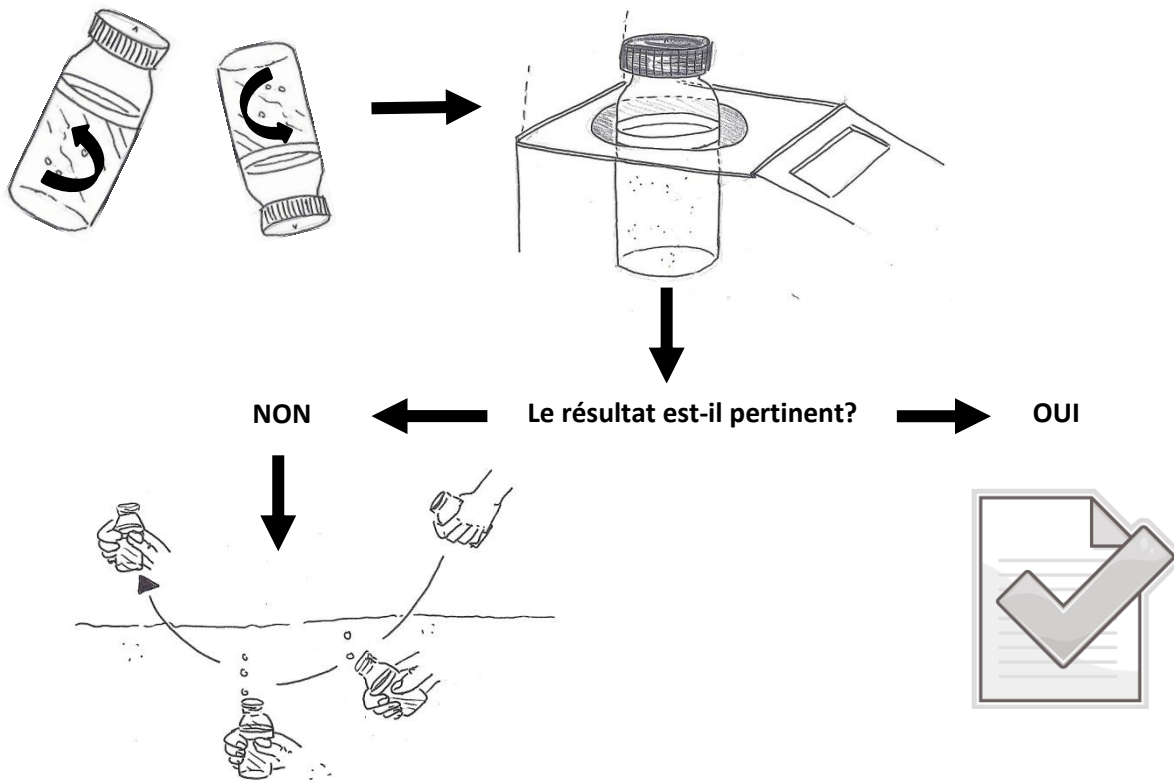
Lorsque la mesure s'effectue sur un site suivi régulièrement, veiller à bien respecter les coordonnées X et Y de la campagne précédente et la localisation exacte de la mesure. Il est important pour interpréter les

données et suivre l'évolution saisonnière ou interannuelle de la turbidité que le point de mesure soit exactement le même. D'une manière générale il est important de pérenniser des points.

b) Combien de mesures par point?

Sur le terrain, il est indispensable de réaliser les mesures en **triplicata** car il arrive souvent que des éléments grossiers, une matière en suspension plus importante, faussent le résultat. Par conséquent si sur vos 3 analyses, vous en avez une qui est sensiblement différente des autres :

Agiter doucement la cuvette et réaliser une nouvelle mesure :



Réaliser une nouvelle mesure

c) Quand mesurer ?

La turbidité peut être mesurée à n'importe quel moment cela dépend parfois de l'objectif visé. La saison (saison des pluies / saison sèche) et dans certains cas l'heure de la journée (notamment sous influence de la marée) sont des paramètres à considérer potentiellement.

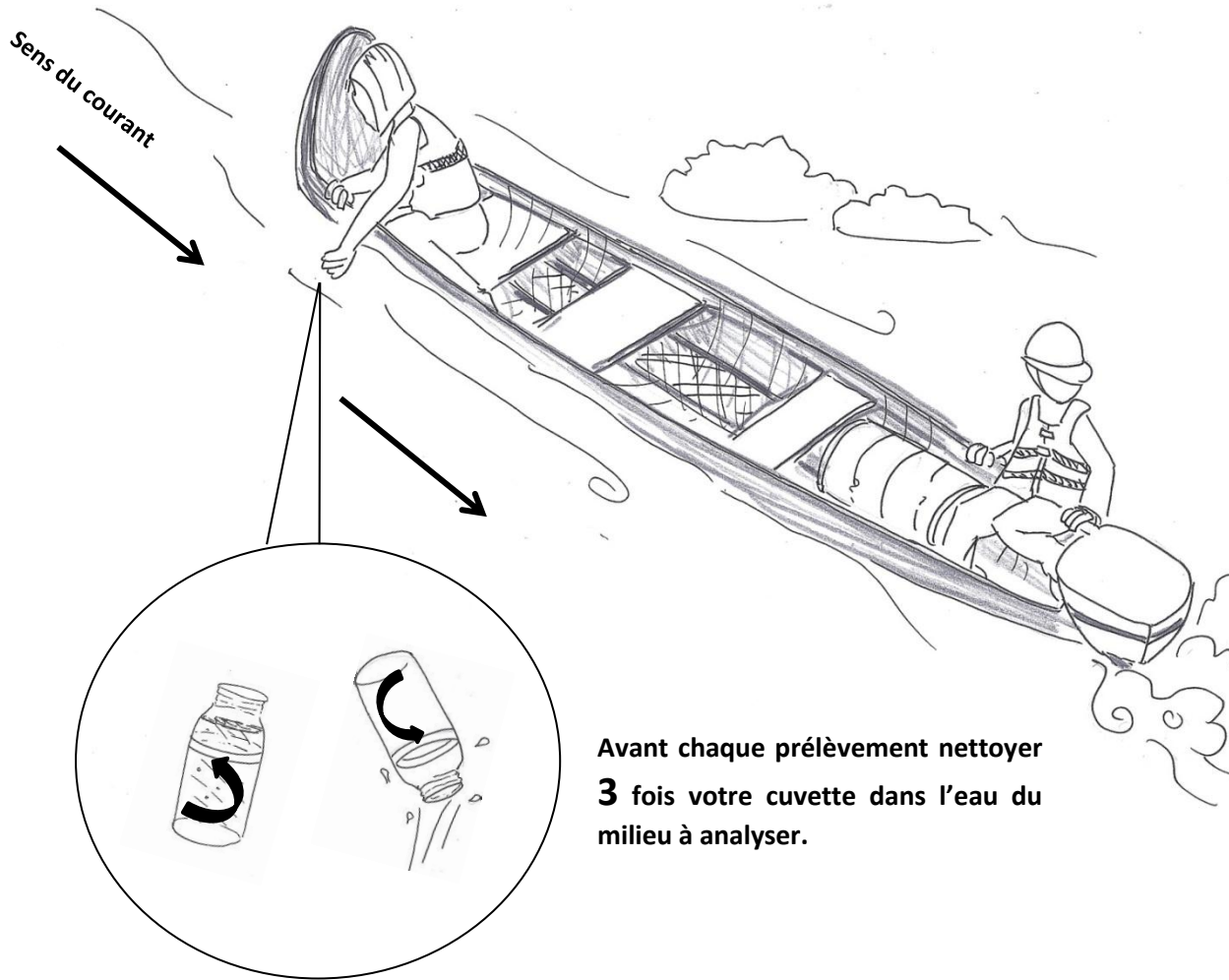
Par exemple :

- si l'on souhaite évaluer la qualité des eaux brutes destinées à l'alimentation en eau potable, il est préférable de réaliser les mesures pendant la marée haute : la période la plus critique.
- Que ce soit pour le suivi des activités humaines ou pour le réseau DCE, des mesures doivent si possible être réalisées en saison sèche et en saison des pluies afin d'apprécier la variabilité saisonnière de la turbidité. Cette dernière n'est pas constante. Il est intéressant d'avoir sur un point donné les valeurs extrêmes caractéristiques (après une longue période sèche par exemple et après des pluies abondantes). De fortes pluies accentuent bien évidemment le ruissellement des pentes mises à nue par la déforestation pour l'agriculture ou les activités extractives. Suivre les pics de turbidité après ces événements peut être intéressant.

d) Comment prélever ?

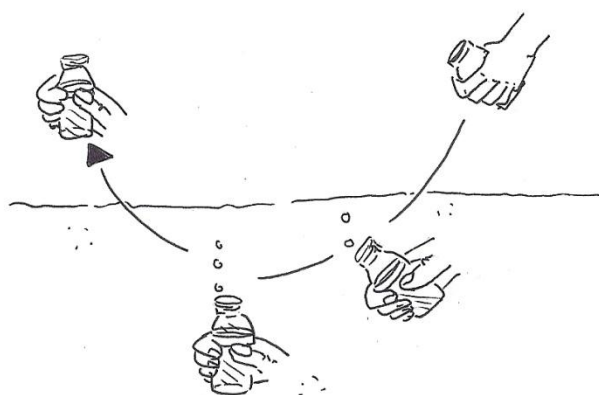
Les lieux de prélèvement d'eau peuvent être divers, ils dépendent là aussi des informations que l'on cherche à obtenir. En fonction des lieux préalablement identifiés et de l'accessibilité de ces sites, les méthodes de prélèvement doivent être adaptées:

- Si l'agent préleveur avance dans l'eau, il doit faire attention à éviter la remise en suspension des dépôts, attendre la fin des perturbations et prélever en amont de lui, toujours face au courant.
- Si l'on prélève dans le cours d'eau à partir d'un bateau, on prélève toujours face au courant afin d'éviter de prélever dans le remous produit par le moteur. Le préleveur se positionne à l'avant du bateau et prélève ces échantillons.



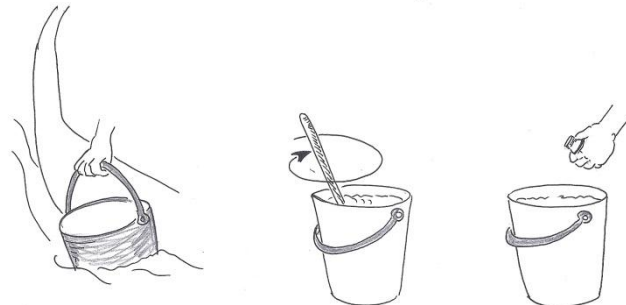
Avant chaque prélèvement nettoyer
3 fois votre cuvette dans l'eau du
milieu à analyser.

Choix 1 : Prélèvement des échantillons directement dans le milieu



Le prélèvement de l'échantillon doit être effectué à une profondeur d'environ 30 cm sous la surface et à environ 50 cm au-dessus du fond, sinon à mi-profondeur.

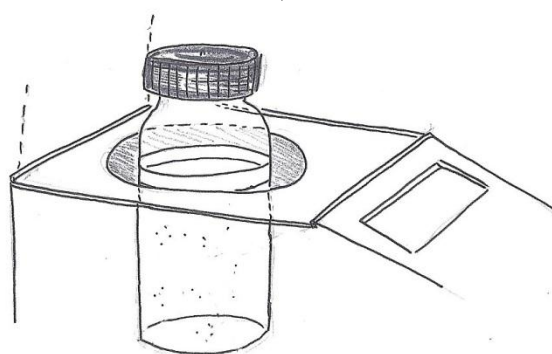
Choix 2 : Prélèvement des échantillons à l'aide d'un seau



Le prélèvement effectué à l'aide d'un seau doit être homogénéisé et éviter une décantation trop rapide des matières en suspension.



Remplir l'échantillon jusqu'au trait indiqué sur la cuvette.



Procéder à l'analyse.

4.2 Les résultats

a) *Mémo des valeurs types en Guyane*

L'objet de ce guide n'est pas d'aider à l'interprétation mais d'avoir un œil critique sur le terrain afin de déceler d'éventuelles dérives de l'appareil.

A titre d'exemple :

- ➡ Estuaires – zone de marnage : 10-100 NFU
- ➡ Cours d'eau non impacté : 5-15 NFU
- ➡ Cours d'eau impacté par orpaillage illégal : 50-150 NTU



b) *Enregistrement et diffusion des données*

Dans le cadre du réseau des acteurs mesurant la turbidité, un fichier Excel a été établi afin de réunir sous un même format l'ensemble des mesures turbidité. Ce tableau peut être fourni aux différentes structures afin de travailler sur une base commune.

Les données ainsi compilées pourront être envoyées à la DEAL.

5 REFERENCES – CONTACTS

5.1 Bibliographie

Agence de l'eau Loire-Bretagne, Novembre 2006. *Guide du prélèvement d'échantillon en rivière.* P 130.

Aqualytic, Révision 1 Février 2007. *Turbidimètre Turbidirect.* Allemagne. P 47.

Blum A., Guiraud A., Rouzeau O. (2014), Suivi de la turbidité des eaux de Guyane. Etat des lieux et recommandations. Approche par télédétection. Rapport BRGM/RP-61632-FR.

Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Révision 4 du 23 Septembre 2009. *Méthode d'analyse, Détermination de la turbidité dans l'eau : méthode néphélométrique.* P 10.

Manitoba, Mars 2011. *La turbidité dans les sources d'approvisionnement en eau au Manitoba.* Canada. P 3.

Fisher Bioblock Scientific, version 0-1 Mai 2003. *Manuel d'instruction TN = 100/ T-100 Turbidimètre de terrain.* P 37.

Ponsel Mesure, version 3.2 Octobre 2010. *GAMME ODEON Equipement portable de terrain pour la mesure et l'enregistrement des paramètres pour le suivi de la qualité des eaux- Guide de l'utilisateur.* P 61.

Ponsel Mesure, Juillet 2011. *ODEON Physicochimie numérique portable- Fiabilité et simplicité extrêmes des mesures de terrain.* P 4.

Fisher Bioblock Scientific, version 0-1 Mai 2003. *Instruction Manual TN = 100/ T-100 Portable Turbidimeter.* P 32.

WTW, Juin 2009. *Manuel mode d'emploi Turb 430 IR/T – Turbidimètre de poche.* P 70.

AFNOR, 2000. *Qualité de l'eau – Détermination de la turbidité.* P 11.

5.2 Abréviations

AFNOR : Association Française de Normalisation

ARS : Agence Régionale de Santé

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

DEAL : Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

FAG : Forces armées de Guyane

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

MES : Matières en Suspension

OEG : Office de l'Eau de la Guyane

ONF : Office Nationale des Forêts

PAG : Parc Amazonien de Guyane

5.3 Lexique

Eau de surface : Désigne l'eau qui s'écoule ou qui stagne à la surface de l'écorce terrestre. Désigne également les sources, puits et autres collecteurs directement influencés par l'eau de surface. Également définies d'après la directive 2000/60/CE du 23/10/2000 comme les eaux douces superficielles, les estuaires et les eaux côtières.

Marnage : Est le dénivelé entre les niveaux d'une marée haute et d'une marée basse successive. Ce terme est aussi employé pour désigner d'autres variations de niveau d'eau dans les cours et plans d'eau.

Alluvion : Dépôts constitués par des matériaux solides transportés et déposés par les eaux courantes (cailloux, graviers, sables, limons).

Réseau hydrographique : Ensemble des cours d'eau (fleuves, rivières et canaux) d'une région déterminée qui assurent le drainage superficiel, permanent ou, temporaire d'un bassin versant ou d'une région donnée.

Néphélomètre : Appareil qui, par utilisation de la diffusion de la lumière par les suspensions, permet d'évaluer la concentration de substances en suspension dans un liquide.

Biofilm : Communauté de microbes qui forme généralement une mince couche visqueuse sur une surface naturelle ou artificielle.

Estuaire : Portion de l'embouchure d'un fleuve où l'effet de la mer ou de l'océan dans lequel il se jette est perceptible. C'est une zone de mélange entre eaux douces et eaux marines. Par convention, on ne parle pas d'estuaires pour les fleuves qui se jettent dans des mers fermées qui n'ont pas de marée.

Sédiments : C'est une matière particulaire solide, minérale et organique, qui se dépose au fond de l'eau, par sédimentation, quand les conditions hydrologiques ne la maintiennent plus en suspension dans la couche d'eau.

5.4 Contacts

Renseignements technique :

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) - Direction régionale Guyane

Domaine de Suzini, Route de Montabo,
B.P. 552, 97333 Cayenne Cedex 2
Tél. : 05 94 30 06 24 - Fax : 05 94 31 49 07

Renseignements résultats turbidité :

Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL)

Rue du Vieux port, BP 6003
97300 CAYENNE
Tel : 05 94 39 80 00
Fax : 05 94 31 74 20

DEAL Service Milieux Naturel, Biodiversité, Sites et Paysages

Impasse Buzaré- BP 6003
97306 CAYENNE CEDEX
Tel : 05 94 29 66 54

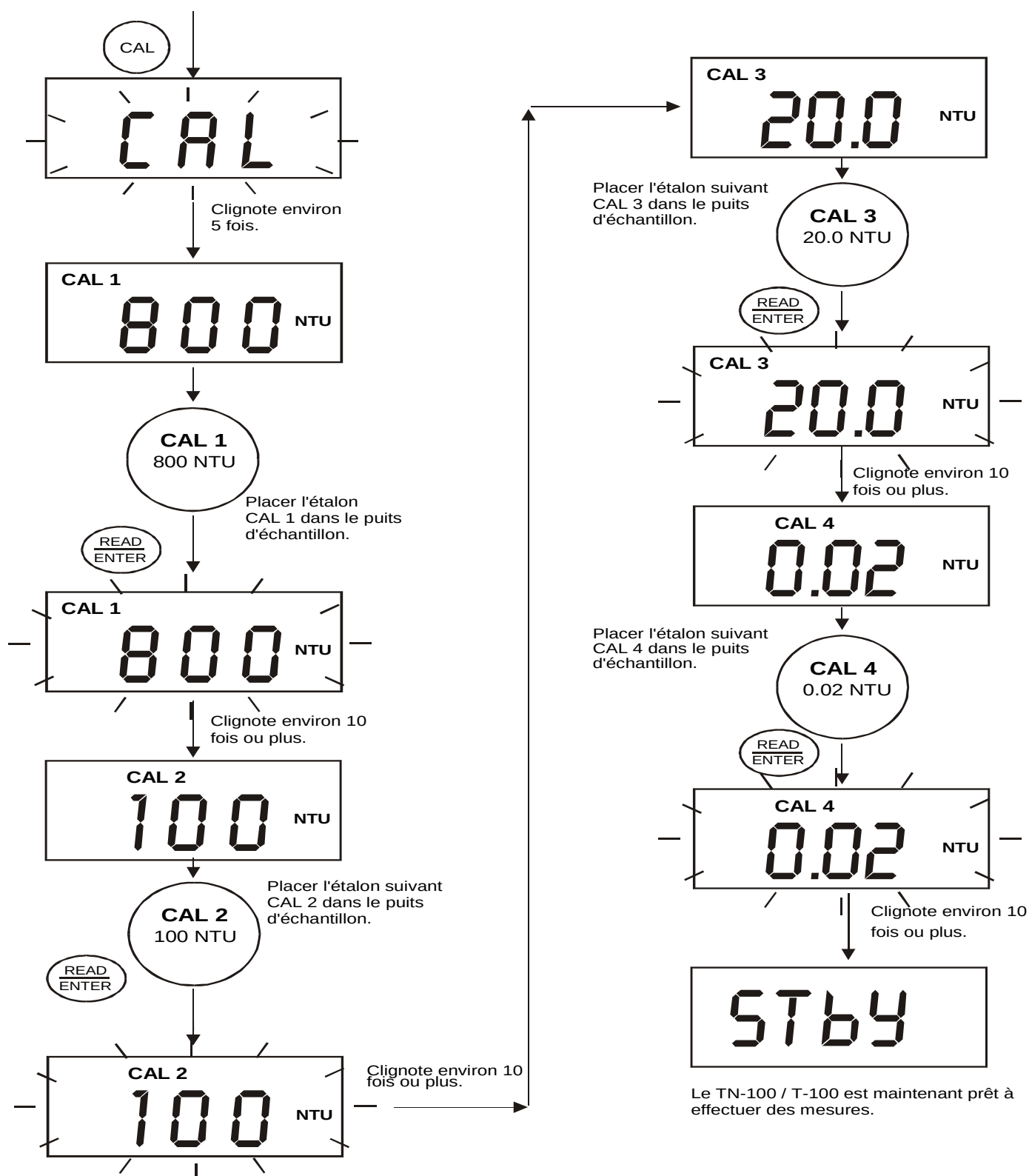
6 ANNEXES

6.1 Comment calibrer le turbidimètre TN-100/ T-100 ?

1. Placer le turbidimètre TN-100 / T-100 sur une surface plane et horizontale.
2. Sélectionner la fonction d'étalonnage de l'appareil en appuyant une fois sur la touche CAL (étalonnage).
L'indicateur [CAL] clignote brièvement et l'appareil demande le premier étalon [CAL 1] (800 NTU).
3. Insérer l'étalon CAL 1 (800 NTU) dans le puits d'échantillon standard (CAL 1), en alignant la marque sur la cuvette avec le repère sur l'appareil.
4. Abaisser la cuvette jusqu'à ce qu'elle s'enclenche dans l'appareil.
5. Appuyer sur la touche READ/ENTER (mesure/entrée).
6. L'indicateur [CAL 1 800 NTU] clignote pendant environ 12 secondes. Lorsque l'appareil a terminé l'étalonnage pour ce point, il demande à l'utilisateur d'insérer l'étalon suivant dans le puits d'échantillon [CAL 2 (100 NTU)].
7. Répéter la séquence d'étalonnage pour chaque étalon.
8. Après avoir réussi l'étalonnage de l'étalon CAL 4 (0,02 NTU), l'affichage indique [STbY] (veille).
9. L'appareil est à présent prêt à effectuer la mesure suivante.

REMARQUES :

1. *S'il le désire, l'utilisateur peut quitter le mode d'étalonnage à la fin de chaque étape en appuyant sur la touche CAL. L'appareil accepte uniquement les valeurs ayant été étalonnées avant d'avoir quitté le mode.*
2. *L'utilisateur peut passer un point d'étalonnage en appuyant sur les touches ▲ ou ▼ et passer ainsi au point d'étalonnage suivant.*
3. *Après avoir réussi l'étalonnage d'un point, l'appareil sélectionne automatiquement le point d'étalonnage suivant. Il quitte automatiquement le mode d'étalonnage après le quatrième point.*
4. *En cas d'erreur pendant l'étalonnage, l'écran affiche un message d'erreur. L'appareil annule l'étalonnage et repasse en mode de mesure sans enregistrer la dernière valeur d'étalonnage.*



6.2 Comment calibrer le turbidimètre ODEON ?

L'étalonnage peut être effectué sur 1 capteur UNIQUE ou sur plusieurs capteurs (MULTIPLE) en même temps.

L'étalonnage de ces capteurs est réalisé en 2 étapes : offset et pente. Ces paramètres pouvant être étalonné selon la gamme de travail, une étape intermédiaire proposera le choix de la gamme.

Valider le départ du processus d'étalonnage en validant avec OK.

CHOIX DE LA GAMME DE TRAVAIL

Cas de la Turbidité

Avant de rentrer dans les menus d'étalonnage, l'opérateur doit choisir la gamme dans laquelle il veut étalonner son capteur.

Positionner le curseur si la gamme choisie, à l'aide des flèches haut/bas, et valider avec OK

ETALONNAGE TURBIDITE : ETAPE 1

La première partie de l'étalonnage consiste à régler l'offset en utilisant une solution d'eau claire.

La valeur de ce premier étalon est fixé à 0 NTU.

La seconde ligne présente la mesure effectuée par le capteur [Mesure].

Lorsque la mesure se stabilise, le message «Patientez, mes. non stable» devient «mesure stable Valider avec OK».

Valider cette première étape avec la touche OK.

Le message «succes ecriture etalon» apparaît alors.

ETALONNAGE CONDUCTIVITE : ETAPE 1

Placer le capteur à l'air afin d'effectuer la première étape de l'étalonnage.

La valeur de ce premier étalon est fixé à 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La seconde ligne présente la mesure effectuée par le capteur [Mesure].

Lorsque la mesure se stabilise, le message «Patientez, mes. non stable» devient «mesure stable Valider avec OK».

Valider cette première étape avec la touche OK.

Le message «succes ecriture etalon» apparaît alors.

Si la première étape s'est déroulée normalement, l'ODEON passe à la seconde étape d'étalonnage.

Si l'étalonnage n'a pas réussi, un message annonçant que l'étalonnage a échoué apparaît.

Si l'opérateur souhaite abandonner l'étalonnage, placer le curseur sur NON, à l'aide des touches droite/gauche, et valider votre choix par OK.

L'ODEON revient à l'écran du TYPE D'ETALONNAGE.

Si l'opérateur souhaite continuer le processus d'étalonnage, placer le curseur sur OUI et valider avec OK.

ETALONNAGE TURBIDITE : ETAPE 2

La seconde partie de l'étalonnage consiste à régler la pente du capteur avec une solution de Formazine préparée à partir d'une solution mère à 4000 NTU.

Le second étalon [Val etalon] est défini par défaut à une valeur égale à la moitié de la gamme de travail choisie. Cette valeur peut être modifiée à l'aide des flèches droite/gauche pour se déplacer sur les chiffres et des touches haut/bas pour incrémenter la valeur.

La seconde ligne présente la mesure effectuée par le capteur [Mesure].

Lorsque la mesure se stabilise, le message «Patientez, mes. non stable» devient «mesure stable Valider avec OK».

Valider cette seconde étape avec la touche OK.

Le message «succes ecriture etalon» apparaît alors.

ETALONNAGE TURBIDITE
ETALON 2 : Solution Formazine

Val etalon : **100.0** NTU

Mesure : **102.0** NTU

Patientez, mes. non stable

OK

Gamme	Valeur étalon 2
0.00-50.00 NTU	25.00 NTU
0.0-200.0 NTU	100.0 NTU
0 - 1000 NTU	500 NTU
0 - 4000 NTU	2000 NTU

Etalonnage Turbidité

Le capteur NTU est un capteur optique qui ne nécessite que peu d'étalonnage. Sur un capteur propre, vérifier de temps en temps la valeur 0 NTU en plongeant le capteur dans de l'eau distillée dépourvue de bulles. Si le point 0 est décalé, procéder à l'étalonnage complet du capteur (sur 1 ou 4 gammes). Pour cette procédure une solution de formazine, de concentration égale à la moitié de la gamme de mesure, sera nécessaire. Cette solution sera préparée à partir d'une solution mère à 4000 NTU.

Pour la préparation des solutions, prendre une fiole jaugée de 200 mL. Introduire le volume de Formazine nécessaire (cf. tableau ci-dessous) et compléter à 200 mL avec de l'eau distillée.

Les solutions de formazine de concentrations inférieures à 1000 NTU se dégradent assez rapidement, ne pas garder de solution pendant plusieurs jours.

La solution à 2000 NTU peut être conservée 2 à 3 semaines dans un flacon ne laissant pas passer la lumière placé au réfrigérateur.

Pour une meilleure précision, effectuer les opérations d'étalonnage en flacon opaque.

Gammes de mesure NTU	Concentration solution étalon de formazine NTU	Volume de formazine (mL)
0,00-50,00	25,00	1,25
0,0-200,0	100,0	5
0-1000	500,0	25
0-4000	2000	100

6.3 Comment calibrer le turbidimètre 430 IR ?

Exécution de la calibration

- 1 Appuyer sur la touche **<CAL/ZERO>**.
La calibration guidée par menu commence.
Suivre les indications affichées au visuel.

Turbid. calibration

- i Insérer étalon
1000 FNU/NTU
- i Tenir **<MARCHE>** enf.
- i Aligner échantillon

- 2 Insérer dans le porte-tube le tube contenant l'étalon de calibration indiqué (dans notre exemple: 1000 FNU/NTU) (voir paragraphe 4.2).

3 Orienter le tube:

- Tube marqué:
 - Faire coïncider le repère du couvercle du tube avec le repère du porte-tube.
 - Appuyer sur la touche **<START/ENTER>** et la maintenir enfoncée jusqu'à ce que la valeur de mesure s'affiche.
- tube non marqué (voir page 33)
 - Appuyer sur la touche **<START/ENTER>** et la maintenir enfoncée.
 - Faire faire lentement un tour complet au tube (360 °), par petits pas.
 - Après chaque pas, attendre un peu jusqu'à ce que la valeur de mesure affichée soit stable.
 - Ramener le tube dans la position correspondant à la valeur de mesure la plus basse.

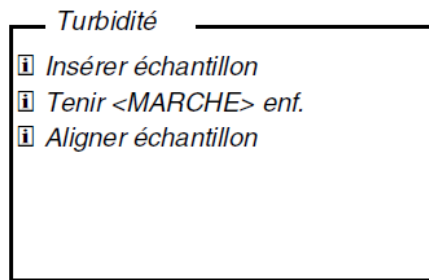
Turbid. calibration

- i Turb. = 1000 FNU/NTU
- i Lancer calibration en relâchant **<MARCHE>**

- 4 Relâcher la touche **<START/ENTER>**.
La mesure de l'étalon de calibration commence.

5	Répéter les pas 4 - 6 avec les étalons de calibration 10,0 FNU/NTU et 0,02 NTU/FNU. Après la mesure de l'étalon de calibration 0,02 FNU/NTU, le résultat de la procédure de calibration est affiché. La calibration est achevée.
6	Avec <START/ENTER>, valider le résultat de la procédure de calibration. Le protocole de calibration s'affiche.

7	Avec <START/ENTER>, valider le protocole de calibration. Le visuel affiche des instructions pour la première mesure.
---	---



Remarque

Si  *Erreur calibration!* s'est affiché comme résultat de la procédure de calibration, le visuel affiche un message prescrivant une nouvelle procédure de calibration avant d'effectuer la mesure.

S'il n'est pas possible d'effectuer une calibration valable, l'appareil propose également de poursuivre les mesures avec les dernières données de calibration valables.

6.4 Comment calibrer le turbidimètre HANNA HI 98713 ?

PROCEDURE D'ETALONNAGE

HI 98713 possède une procédure d'étalonnage qui compense le vieillissement de la LED. L'étalonnage peut être réalisé à l'aide des solutions étalons fournies avec l'appareil ou avec d'autres solutions standards préparées par l'utilisateur.

HI 98713 est livré avec 4 solutions étalons standard AMCO : <0.1 FNU, 15 FNU, 100 FNU et 750 FNU. Les solutions standards HANNA sont spécialement étudiées pour cet instrument. Elles possèdent une durée de vie limitée et ne doivent pas être utilisées au delà de la date de péremption. Alternativement, des solutions formazine peuvent être utilisées. Il est recommandé de préparer les solutions formazine avec des valeurs aussi voisines que possible des valeurs par défaut reconnues par l'instrument. Le 1er point d'étalonnage peut être proche de 0 FNU. Le second point peut être choisi entre 10 et 20 FNU, le 3ème point entre 50 et 150 FNU et le 4ème point entre 600 et 900 FNU.

ETALONNAGE

Pour des résultats corrects, les techniques de mesure doivent également être appliquées pour la procédure d'étalonnage. Si des solutions standards formazine sont utilisées, mélangez délicatement la solution pendant environ 1 mn puis laissez décanter 1 mn supplémentaire avant de procéder à l'étalonnage qui pourra être réalisé en 1, 2 ou 3 points. Il est possible d'interrompre une procédure d'étalonnage à tout moment en appuyant sur CAL ou ON/OFF.

PREPARATION DE FORMAZINE :

Pour préparer une solution mère de formazine 4000 FNU, suivez la procédure ci-dessous :

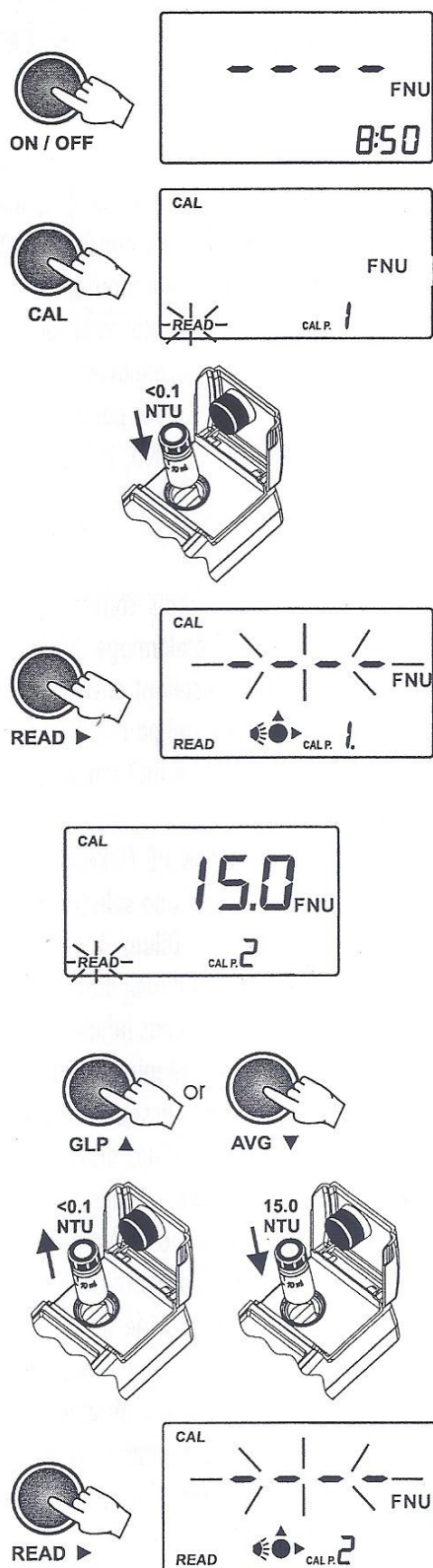
Solution 1 : Diluez 1 gr de sulfate d'hydrazine ($\text{NH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$) dans de l'eau déminéralisée et désionisée et diluez dans 100 ml dans un récipient gradué. Manipulez le sulfate d'hydrazine avec précaution. Ne pas inhaler, ingurgiter ou mettre en contact avec la peau. La solution d'hydrazine peut également contenir quelques traces d'hydrazine.

Solution II Dissoudre 10 gr d'hexaméthylènetétramine ($(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$) dans de l'eau distillée et désionisée et diluez dans 100 ml dans un récipient gradué.

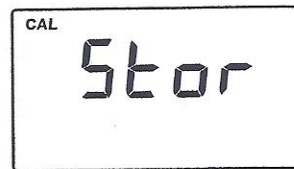
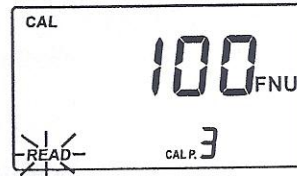
Solution mère : Mélangez 10 ml de la solution 1 et 10 ml de la solution 2 dans un récipient. Laissez la solution mère pendant 48 heures à une température de 25°C ($\pm 3^\circ\text{C}$). De cela résultera une solution de formazine en suspension à 4000 FNU. Il est très important pour la formation du polymère formazine de maintenir la même température. La solution mère (4000 FNU) peut être stockée jusqu'à 1 an dans des conditions saines. Stockez la solution de formazine dans une boîte anti-UV. Pour obtenir une bonne qualité de formazine, utilisez toujours des réactifs purs et une eau très pure. Pour préparer la solution standard, diluez la solution mère avec la même eau très pure que vous avez utilisé lors de la confection de la solution mère. La solution de formazine diluée n'est pas stable. Elle doit être utilisée immédiatement après sa préparation et détruite immédiatement après.

ÉTALONNAGE EN DEUX POINTS

- Allumez l'instrument par la touche ON/OFF. Lorsque l'afficheur indique des tirets, il est prêt pour l'étalonnage.
- Entrez en mode étalonnage par appui sur CAL. L'instrument affiche un message "CAL P.1" sans valeur. Le 1er point d'étalonnage est utilisé pour vérifier le système optique.
- Placez la cuvette contenant la solution inférieure à <0.1 FNU dans le logement en respectant l'ergot d'alignement.
- Fermez le capot de protection et appuyez sur READ ►. L'instrument indique des tirets clignotants ainsi que les icônes cuvette, détecteur et lampe. Pour ne pas effectuer cet étalonnage, appuyez sur LOG/CFM.
- Le 2ème point d'étalonnage (15.0 FNU) est affiché sur la partie principale, tandis que le message, "CAL P.2" est affiché dans la partie secondaire.
- Si une solution de formazine est utilisée, affichez la valeur de la solution tampon à l'aide des touches UP et DOWN
- Placez la 2ème solution 15.0 FNU (ou la solution préparée) dans le logement en respectant l'ergot d'alignement.
- Fermez le capot de protection et appuyez sur READ ►. L'instrument indique des tirets clignotants ainsi que les icônes, cuvette, détecteur et lampe.



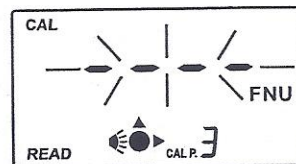
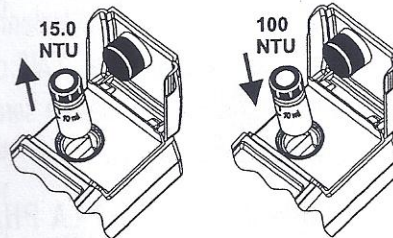
- A la fin de la procédure de mesure, le 3ème point d'étalonnage (100 FNU) est affiché dans la partie primaire et l'information "CAL P.3" dans la partie secondaire "READ".
- A ce moment, il est possible de quitter le mode étalonnage en appuyant sur CAL. L'instrument met en mémoire les deux points d'étalonnage réalisés et retournera en mode mesure normal.



ETALONNAGE EN 3 POINTS :

Pour réaliser un étalonnage en 3 points, procédez comme suit :

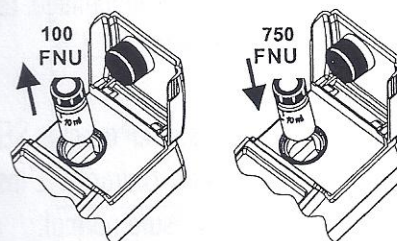
- Ôtez la cuvette correspondant à la 2ème solution étalon
- Placez dans l'instrument une cuvette contenant la solution 100 FNU ou la solution de formazine préparée. Veillez à respecter l'ergot d'alignement.
- Fermez le capot de protection et appuyez sur READ ►. L'instrument indique des tirets clignotants ainsi que les icônes cuvette, détecteur et lampe.
- A la fin de la procédure de mesure, le 4ème point d'étalonnage (750 FNU) est affiché en même temps que l'information CAL P.4".
- A ce moment, il est possible de quitter le mode étalonnage en appuyant sur CAL. L'instrument mettra en mémoire les 3 points d'étalonnage et retournera en mode normal de mesure.



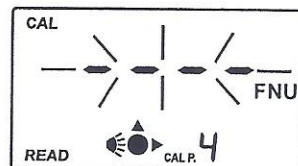
ETALONNAGE EN 4 POINTS

Pour réaliser un étalonnage en 4 points, continuez de la manière suivante :

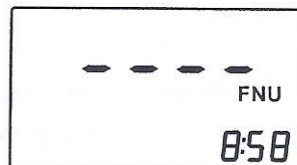
- Ôtez le standard correspond au 3ème point.
- Placez dans le logement la cuvette contenant la solution 750 FNU (ou la solution préparée) en respectant l'ergot d'alignement.



- Fermez le capot de protection et appuyez sur READ
►. L'instrument indiquera des tirets clignotants ainsi que les icônes cuvette, détecteur et lampe.

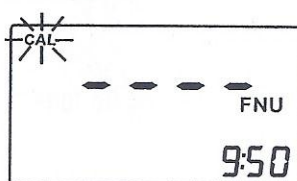


- A la fin de la procédure de mesure, le 4ème point d'étalonnage est réalisé et l'instrument retourne automatiquement en mode de mesure.



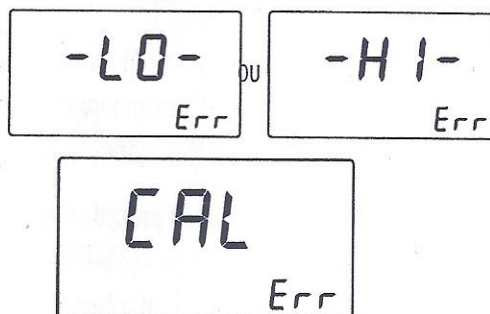
FONCTIONNEMENT HORS GAMME ETALONNAGE

L'instrument possède une fonction qui permet d'indiquer à l'utilisateur que des mesures en dehors de la gamme d'étalonnage sont réalisées. La gamme pour laquelle l'instrument indiquera des mesures correctes jusqu'à 40 FNU pour un étalonnage en deux points et jusqu'à 150 % du 3ème point d'étalonnage pour un étalonnage en 3 points. Une icône "CAL" clignotante sera affichée chaque fois qu'une mesure sera réalisée au delà de la gamme d'étalonnage.



ERREURS PENDANT LA PHASE D'ETALONNAGE

- Si pendant la phase d'étalonnage, la valeur mesurée est trop éloignée de la valeur attendue, l'instrument indiquera un message "-LO-" ou "-HI-".
- Si le coefficient d'étalonnage calculé est en-dehors d'une certaine gamme, un message "CAL Err" sera affiché.

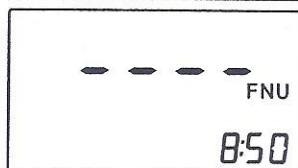


EFFACEMENT DES DONNEES D'ETALONNAGE

HI 98713 est étalonné en usine. Il est possible de rappeler à tout moment les données d'étalonnage usine en effaçant les données d'étalonnage réalisées par l'utilisateur.

Pour ceci :

- Appuyez sur la touche GLP. La date du dernier étalonnage sera affichée.
- Appuyez sur la touche READ pour lire les informations concernant cet étalonnage. Le dernier message affiché sera un message DEL ▲.
- Appuyez sur la touche SETUP/DEL pour effacer l'étalonnage courant. L'instrument retournera en mode de mesure normal.

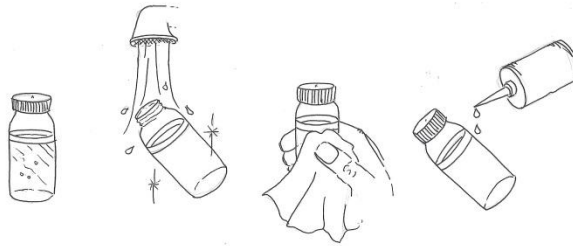


Annexe 2

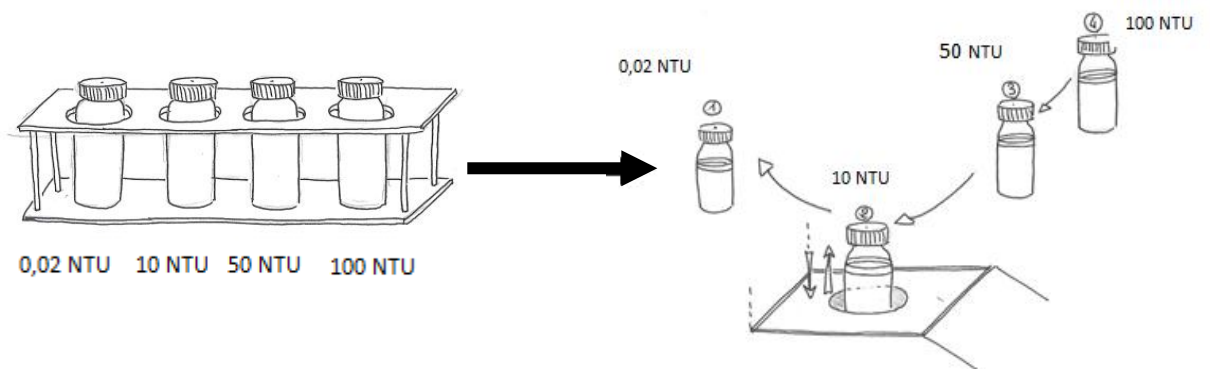
Fiche d'intercalibration utilisée pour la journée technique

Fiche inter-calibration

1. Etalonner son turbidimètre avec ses propres solutions d'étalonnage.
2. Nettoyer les cuvettes avant de manipuler.



3. Placer vos différentes solutions de concentration connues dans le turbidimètre afin de vérifier si les résultats sont identiques. Compléter le tableau.



Organisme	0,02 NTU			10 NTU			50 NTU			100 NTU		

Annexe 3

Les satellites SPOT

Les satellites SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre ou Satellite Pour l'Observation de la Terre) sont issus une famille de satellites de télédétection français civils d'observation de la Terre développé par l'agence spatiale française, le CNES (Centre national d'études spatiales). Cinq premiers exemplaires ont été lancés entre 1985 et 2002.



Les images SPOT sont commercialisées par la société Spot Image devenu filiale d'Astrium depuis son rachat par EADS Astrium en 2008.

Les satellites de la première série (SPOT 1 à SPOT 5) ont été réalisés par Matra (devenu EADS Astrium Satellites), avec Aerospatiale/Satellites (devenu depuis Thales Alenia Space). Un des grands atouts du système SPOT est sa capacité de dépointage de son instrument imageur principal de part et d'autre de la trace au sol du satellite, de

+31,06° à -31,06°. Ceci lui confère une très grande flexibilité d'acquisition, en ramenant notamment la répétitivité d'acquisition (fréquence temporelle ou fréquence de revisite) à 2-3 jours.

Les données utilisées sont issues des satellites SPOT 4 et 5 dont les caractéristiques sont décrites ci-après :

	Caractéristiques générales	
	SPOT 5	SPOT 4
Date de lancement	4 mai 2002	24 mars 1998
lanceur	Ariane 4	
Durée de vie nominale	5 ans	
Type d'orbite	Héliosynchrone	
Heure locale nœud descendant	10h30 à l'équateur	
Altitude à l'équateur	822 km	
Inclinaison à l'équateur	98,7°	
Période de révolution	101,4 minutes	
Vitesse du satellite	7,4 km/s	
Durée du cycle orbital	26 jours	
Capacité d'enregistrement	1 mémoire de masse de 90 Gbits (~ 210 images d'une taille moyenne de 144 Mo décompressés)	2 enregistreurs de 120 Gbits chacun plus 1 mémoire de masse 9 Gbits (~ 560 images pour chaque enregistreur +40 images, d'une taille moyenne de 36 Mo décompressées)
Traitement des images à bords	Jusqu'à 5 images acquises simultanément : 2 transmises au sol ET 3 stockées à bord avec un taux de compression de 2,6 (DCT)	2 images acquises simultanément, transmises au sol OU stockées à bord avec un taux de compression de 1,3 (DPCM)

	Instrument Haute Résolution	
	SPOT 5	SPOT 4
Instruments	2 HRG	2 HRVIR
Bandes spectrales et résolution	2 panchromatiques à 5 m, permettant de réaliser un produit à 2,5 m 3 multispectrales à 10 m 1 moyen infra-rouge à 20 m	1 monospectrale à 10 m 3 multispectrales à 20 m 1 moyen infra-rouge à 20 m
Spectre électromagnétique	P : 0,48 – 0,71 µm B1 (vert) : 0,50 – 0,59 µm B2 (rouge) : 0,61 – 0,68 µm	M : 0,61 – 0,68 µm B1 (vert) : 0,50 – 0,59 µm B2 (rouge) : 0,61 – 0,68 µm

	B3 (PIR) : 0,78 – 0,89 μm B4 (MIR) : 1,58 – 1,75 μm	B3 (PIR) : 0,78 – 0,89 μm B4 (MIR) : 1,58 – 1,75 μm
Champ de prise de vue	60 km x 60 km à 80 km	
Dynamique de l'image	8 bits	
Précision de localisation absolue (sans points d'appui, terrain plat)	30 m	350 m
Angle d'incidence	entre - 31,06° et + 31,06°	
Répétitivité moyenne sur un cycle de 26 j et selon latitude	2 à 3 jours	

Les images Spot sont disponibles dans différents niveaux de prétraitement géométrique, répartis en 2 gammes de produits :

- **Niveau 1A:** Correction radiométrique des distorsions dues aux écarts de sensibilité entre les détecteurs élémentaires de l'instrument de prise de vue. Destinés aux utilisateurs désireux d'effectuer eux-mêmes les traitements géométriques de l'image.
- **Niveau 1B:** Correction radiométrique identique à celle du niveau 1A. Correction géométrique des effets systématiques (effet panoramique, courbure et rotation de la Terre). Les distorsions internes de l'image sont corrigées, ce qui autorise les mesures de distances, d'angles et de surface. Produit privilégié pour la photo-interprétation et les études thématiques.
- **Niveau 2A:** Correction radiométrique identique à celle du niveau 1A. Correction géométrique effectuée dans la projection cartographique standard (UTM WGS84 par défaut) sans prise de points d'appui. Permet, en tenant compte du décalage éventuel en localisation, de combiner l'image à des informations géographiques de types différents (vecteurs, cartes raster et autres images satellite).

Annexe 4

Protocole de mesures de la turbidité des sections de cours d'eau choisis au passage du satellite SPOT5

L'objectif de l'expérimentation consiste à pouvoir comparer des mesures de turbidité dans l'eau avec l'image prise en même temps par SPOT5 ; il est donc nécessaire de bien coordonner le temps des mesures au sol avec le passage du satellite.

Le protocole de réalisation de l'ensemble des mesures de turbidité sur le plan d'eau comporte les étapes suivantes :

- Vérifier l'étalonnage du turbidimètre (vérifier aussi au préalable la cohérence des mesures entre les deux turbidimètres utilisés) ;
- Commencer les mesures 1 heure avant le passage programmé du satellite SPOT et les poursuivre une heure après le passage ;
- A une extrémité du plan d'eau, prendre les coordonnées GPS, l'heure et effectuer la première mesure ;
- En chaque point, il faut répéter la mesure trois fois ; prélever l'eau en surface à l'aide d'un seau. Remplir le récipient à partir de l'eau du seau en le rinçant 2 à 3 fois préalablement (agiter l'eau du seau afin d'avoir un échantillon « homogène ») ;
- Noter coordonnées GPS, heure et mesures en chaque point ;
- Avancer de 100 m le long d'une ligne située approximativement à égale distance des deux berges, prendre le point GPS et faire les mesures à ce second point ;
- Avancer de proche en proche au pas de 100m en effectuant les mesures pendant une heure ;
- Au bout d'une heure, la distance parcourue sera d'environ 1200 m (5 minutes par point de mesures), revenir vers le point de départ sur la même ligne en effectuant à nouveau une mesure en triplicat, en chaque point mesuré à l'aller ;
- Au bout de la seconde heure, on doit être revenu à son point de départ ;
- Vérifier que l'étalonnage n'a pas bougé pendant la période de mesures.

La gamme de mesures se situe normalement entre 10 et 30 NTU (valeurs de la campagne DCE des eaux de surface d'août – septembre 2011).

Annexe 5

Début du fichier METADATA.DIM de la scène SPOT du 14/11/2012

Les paramètres à prendre en compte ont été surlignés en jaune.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<?xml-stylesheet href="STYLE.XSL" type="text/xsl" ?>
<Dimap_Document xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:noNamespaceSchemaLocation='Spot_Scene.xsd' name='METADATA.DIM'>
  <Metadata_Id>
    <METADATA_FORMAT version='1.1'>DIMAP</METADATA_FORMAT>
    <METADATA_PROFILE>SPOTSCENE_2A</METADATA_PROFILE>
  </Metadata_Id>
  <Dataset_Id>
    <DATASET_NAME>SCENE 5 690-340 12/11/14 13:42:01 2 J</DATASET_NAME>
    <COPYRIGHT>COPYRIGHT CNES 14 11 2012 13 H 42 MN 01 S</COPYRIGHT>
    <DATASET_QL_PATH href='PREVIEW.JPG'></DATASET_QL_PATH>
    <DATASET_QL_FORMAT version='6b'>JPEG</DATASET_QL_FORMAT>
    <DATASET_TN_PATH href='ICON.JPG'></DATASET_TN_PATH>
    <DATASET_TN_FORMAT version='6b'>JPEG</DATASET_TN_FORMAT>
  </Dataset_Id>
  <Dataset_Frame>
    <Vertex>
      <FRAME_LON>-53.024140</FRAME_LON>
      <FRAME_LAT>5.338740</FRAME_LAT>
      <FRAME_ROW>1</FRAME_ROW>
      <FRAME_COL>1316</FRAME_COL>
      <FRAME_X>275688.327134</FRAME_X>
      <FRAME_Y>590477.124766</FRAME_Y>
    </Vertex>
    <Vertex>
      <FRAME_LON>-52.466771</FRAME_LON>
      <FRAME_LAT>5.213805</FRAME_LAT>
      <FRAME_ROW>1400</FRAME_ROW>
      <FRAME_COL>7491</FRAME_COL>
      <FRAME_X>337438.327134</FRAME_X>
      <FRAME_Y>576487.124764</FRAME_Y>
    </Vertex>
    <Vertex>
      <FRAME_LON>-52.584039</FRAME_LON>
      <FRAME_LAT>4.682684</FRAME_LAT>
      <FRAME_ROW>7270</FRAME_ROW>
      <FRAME_COL>6177</FRAME_COL>
      <FRAME_X>324298.327134</FRAME_X>
      <FRAME_Y>517787.124764</FRAME_Y>
    </Vertex>
    <Vertex>
      <FRAME_LON>-53.140998</FRAME_LON>
      <FRAME_LAT>4.807766</FRAME_LAT>
      <FRAME_ROW>5870</FRAME_ROW>
      <FRAME_COL>1</FRAME_COL>
      <FRAME_X>262538.327134</FRAME_X>
      <FRAME_Y>531787.124766</FRAME_Y>
    </Vertex>
    <Scene_Center>
      <FRAME_LON>-52.801212</FRAME_LON>
      <FRAME_LAT>5.010120</FRAME_LAT>
      <FRAME_ROW>3643</FRAME_ROW>
      <FRAME_COL>3777</FRAME_COL>
    </Scene_Center>
    <SCENE_ORIENTATION>12.614069</SCENE_ORIENTATION>
  </Dataset_Frame>
  <Coordinate_Reference_System>
    <GEO_TABLES version='5.2'>EPSG</GEO_TABLES>
    <Horizontal_CS>
      <HORIZONTAL_CS_CODE>epsg:32622</HORIZONTAL_CS_CODE>
      <HORIZONTAL_CS_TYPE>PROJECTED</HORIZONTAL_CS_TYPE>
      <HORIZONTAL_CS_NAME>WGS 84/UTM22N</HORIZONTAL_CS_NAME>
    </Horizontal_CS>
    </Coordinate_Reference_System>
    <Raster_CS>
      <RASTER_CS_TYPE>CELL</RASTER_CS_TYPE>
      <PIXEL_ORIGIN>1</PIXEL_ORIGIN>
    </Raster_CS>
    <Geoposition>
      <Geoposition_Insert>
        <ULXMAP>262538.327134</ULXMAP>
        <ULYMAP>590477.124762</ULYMAP>
        <XDIM>10.000000</XDIM>
        <YDIM>10.000000</YDIM>
      </Geoposition_Insert>
    </Geoposition>
    <Image_Display>
      <Band_Display_Order>
        <RED_CHANNEL>1</RED_CHANNEL>
        <GREEN_CHANNEL>2</GREEN_CHANNEL>
        <BLUE_CHANNEL>3</BLUE_CHANNEL>
      </Band_Display_Order>
      <Special_Value>
        <SPECIAL_VALUE_INDEX>255</SPECIAL_VALUE_INDEX>
        <SPECIAL_VALUE_TEXT>SATURATED</SPECIAL_VALUE_TEXT>
      </Special_Value_Color>
      <RED_LEVEL>1</RED_LEVEL>
      <GREEN_LEVEL>1</GREEN_LEVEL>
      <BLUE_LEVEL>1</BLUE_LEVEL>
      <ALPHA_LEVEL>1</ALPHA_LEVEL>
    </Special_Value_Color>
    </Special_Value>
      <SPECIAL_VALUE_INDEX>0</SPECIAL_VALUE_INDEX>
      <SPECIAL_VALUE_TEXT>NODATA</SPECIAL_VALUE_TEXT>
      <Special_Value_Color>
        <RED_LEVEL>0</RED_LEVEL>
        <GREEN_LEVEL>0</GREEN_LEVEL>
        <BLUE_LEVEL>0</BLUE_LEVEL>
        <ALPHA_LEVEL>0</ALPHA_LEVEL>
      </Special_Value_Color>
    </Special_Value>
    </Image_Display>
    <Production>
      <JOB_ID>GU_002832</JOB_ID>
      <PRODUCT_TYPE>NUSED</PRODUCT_TYPE>
      <PRODUCT_INFO>Spot SYSTEM SCENE level 2A</PRODUCT_INFO>
      <DATASET_PRODUCER_NAME>SPOT_IMAGE</DATASET_PRODUCER_NAME>
      <DATASET_PRODUCER_URL href='http://www.spotimage.fr'></DATASET_PRODUCER_URL>
```

```

<DATASET_PRODUCTION_DATE>2012-12-17T14:50:06.659000</DATASET_PRODUCTION_DATE>
<Production_Facility>
<SOFTWARE_NAME>TS5</SOFTWARE_NAME>
<SOFTWARE_VERSION>spot5_V7.7</SOFTWARE_VERSION>
<PROCESSING_CENTER>GU</PROCESSING_CENTER>
</Production_Facility>
</Production>
<Dataset_Sources>
<Source_Information>
<SOURCE_TYPE>SCENE</SOURCE_TYPE>
<SOURCE_ID>56903401211141342012J</SOURCE_ID>
<SOURCE_DESCRIPTION>SCENE HRG2 J</SOURCE_DESCRIPTION>
<Scene_Source>
<GRID_REFERENCE>690340</GRID_REFERENCE>
<SHIFT_VALUE>0</SHIFT_VALUE>
<IMAGING_DATE>2012-11-14</IMAGING_DATE>
<IMAGING_TIME>13:42:01</IMAGING_TIME>
<MISSION>SPOT</MISSION>
<MISSION_INDEX>5</MISSION_INDEX>
<INSTRUMENT>HRG</INSTRUMENT>
<INSTRUMENT_INDEX>2</INSTRUMENT_INDEX>
<SENSOR_CODE>J</SENSOR_CODE>
<SCENE_PROCESSING_LEVEL>0</SCENE_PROCESSING_LEVEL>
<INCIDENCE_ANGLE>-14.271799</INCIDENCE_ANGLE>
<VIEWING_ANGLE>-12.572479</VIEWING_ANGLE>
<SUN_AZIMUTH>135.705304</SUN_AZIMUTH>
<SUN_ELEVATION>57.214866</SUN_ELEVATION>
<Imaging_Parameters>
<REVOLUTION_NUMBER>158</REVOLUTION_NUMBER>
<COMPRESSION_MODE>DCT</COMPRESSION_MODE>
<DIRECT_PLAYBACK_INDICATOR>MX</DIRECT_PLAYBACK_INDICATOR>
<REFOCUSING_STEP_NUM>3976</REFOCUSING_STEP_NUM>
<SWATH_MODE>FULL</SWATH_MODE>
</Imaging_Parameters>
</Scene_Source>
</Source_Information>
<Source_Information>
<SOURCE_TYPE>DEM</SOURCE_TYPE>
<SOURCE_ID>GLOBE</SOURCE_ID>
<SOURCE_DESCRIPTION>Global Land One Kilometer Base Elevation Model</SOURCE_DESCRIPTION>
</Source_Information>
</Dataset_Sources>
<Raster_Dimensions>
<NCOLS>7492</NCOLS>
<NROWS>7272</NROWS>
<NBANDS>4</NBANDS>
</Raster_Dimensions>
<Raster_Encoding>
<NBITS>8</NBITS>
<BYTEORDER>I</BYTEORDER>
<COMPRESSION_NAME>NONE</COMPRESSION_NAME>
<DATA_TYPE>UNSIGNED</DATA_TYPE>
</Raster_Encoding>
<Data_Access>
<DATA_FILE_ORGANISATION>BAND_COMPOSITE</DATA_FILE_ORGANISATION>
<DATA_FILE_FORMAT version="1.0">GEOTIFF</DATA_FILE_FORMAT>
<DATA_FILE_FORMAT_DESC>NONE</DATA_FILE_FORMAT_DESC>
<Data_File>
<DATA_FILE_PATH href="IMAGERY.TIF"></DATA_FILE_PATH>
</Data_File>
</Data_Access>
<Data_Processing>
<PROCESSING_LEVEL>2A</PROCESSING_LEVEL>
<GEOMETRIC_PROCESSING>PRECISION 2A</GEOMETRIC_PROCESSING>
<RADIOMETRIC_PROCESSING>SYSTEM</RADIOMETRIC_PROCESSING>
<Processing_Options>
<MEAN_RECTIFICATION_ELEVATION>10.065483</MEAN_RECTIFICATION_ELEVATION>
<Dynamic_Stretch>
<Thresholds>
<BAND_INDEX>1</BAND_INDEX>
<LOW_THRESHOLD>1</LOW_THRESHOLD>
<HIGH_THRESHOLD>255</HIGH_THRESHOLD>
</Thresholds>
<Thresholds>
<BAND_INDEX>2</BAND_INDEX>
<LOW_THRESHOLD>1</LOW_THRESHOLD>
<HIGH_THRESHOLD>255</HIGH_THRESHOLD>
</Thresholds>
<Thresholds>
<BAND_INDEX>3</BAND_INDEX>
<LOW_THRESHOLD>1</LOW_THRESHOLD>
<HIGH_THRESHOLD>255</HIGH_THRESHOLD>
</Thresholds>
<Thresholds>
<BAND_INDEX>4</BAND_INDEX>
<LOW_THRESHOLD>1</LOW_THRESHOLD>
<HIGH_THRESHOLD>255</HIGH_THRESHOLD>
</Thresholds>
</Dynamic_Stretch>
<LINE_SHIFT>0</LINE_SHIFT>
<DECOMPRESSION_TYPE>QIA+C</DECOMPRESSION_TYPE>
<Deconvolution>
<KERNEL_ID>0</KERNEL_ID>
<KERNEL_DATE>1950-01-01T00:00:00.000000</KERNEL_DATE>
</Deconvolution>
<Sampling_Step>
<SAMPLING_STEP_X>10.000000</SAMPLING_STEP_X>
<SAMPLING_STEP_Y>10.000000</SAMPLING_STEP_Y>
</Sampling_Step>
<SWIR_BAND_REGISTRATION_FLAG>Y</SWIR_BAND_REGISTRATION_FLAG>
<X_BANDS_REGISTRATION_FLAG>Y</X_BANDS_REGISTRATION_FLAG>
<Correction_Algorithm>
<ALGORITHM_TYPE>DCT_COMPRESSION_CORRECTION</ALGORITHM_TYPE>
<ALGORITHM_NAME>DCT_COMPRESSION_CORRECTION</ALGORITHM_NAME>
<ALGORITHM_ACTIVATION>Y</ALGORITHM_ACTIVATION>
</Correction_Algorithm>
<Processing_Options>
<Data_Processing>
<Image_Interpretation>
<Spectral_Band_Info>
<BAND_DESCRIPTION>XS1</BAND_DESCRIPTION>
<PHYSICAL_UNIT>equivalent radiance (W.m-2.Sr-1.um-1)</PHYSICAL_UNIT>
<PHYSICAL_BIAS>0.000000</PHYSICAL_BIAS>
<PHYSICAL_GAIN>1.106236</PHYSICAL_GAIN>
<PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>2012-09-01T00:00:00.000000</PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>
<BAND_INDEX>1</BAND_INDEX>

```

```

</Spectral_Band_Info>
<Spectral_Band_Info>
<BAND_DESCRIPTION>XS2</BAND_DESCRIPTION>
<PHYSICAL_UNIT>equivalent radiance (W.m-2.Sr-1.um-1)</PHYSICAL_UNIT>
<PHYSICAL_BIAS>0.000000</PHYSICAL_BIAS>
<PHYSICAL_GAIN>1.567885</PHYSICAL_GAIN>
<PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>2012-09-01T00:00:00.000000</PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>
<BAND_INDEX>2</BAND_INDEX>
</Spectral_Band_Info>
<Spectral_Band_Info>
<BAND_DESCRIPTION>XS3</BAND_DESCRIPTION>
<PHYSICAL_UNIT>equivalent radiance (W.m-2.Sr-1.um-1)</PHYSICAL_UNIT>
<PHYSICAL_BIAS>0.000000</PHYSICAL_BIAS>
<PHYSICAL_GAIN>1.681130</PHYSICAL_GAIN>
<PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>2012-09-01T00:00:00.000000</PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>
<BAND_INDEX>3</BAND_INDEX>
</Spectral_Band_Info>
<Spectral_Band_Info>
<BAND_DESCRIPTION>SWIR</BAND_DESCRIPTION>
<PHYSICAL_UNIT>equivalent radiance (W.m-2.Sr-1.um-1)</PHYSICAL_UNIT>
<PHYSICAL_BIAS>0.000000</PHYSICAL_BIAS>
<PHYSICAL_GAIN>10.495446</PHYSICAL_GAIN>

<PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>2012-09-01T00:00:00.000000</PHYSICAL_CALIBRATION_DATE>
<BAND_INDEX>4</BAND_INDEX>
</Spectral_Band_Info>
</Image_Interpretation>
<Data_Strip>
<Data_Strip_Identification>
<DATA_STRIP_ID>S5G2J1211141341455</DATA_STRIP_ID>
</Data_Strip_Identification>

<Satellite_Time>
<UT_DATE>22963 49305.606874</UT_DATE>
<CLOCK_VALUE>3503432192</CLOCK_VALUE>
<CLOCK_PERIOD>3.9062416409e-03</CLOCK_PERIOD>
<BOARD_TIME>3503432192</BOARD_TIME>
<TAI_TUC>35</TAI_TUC>
</Satellite_Time>

<Ephemeris>
<SATELLITE_ALTITUDE>827523.476344</SATELLITE_ALTITUDE>
<NADIR_LAT>4.574044</NADIR_LAT>
<NADIR_LON>-51.187368</NADIR_LON>

```


Annexe 6

Le modèle FLAASH (extrait du User's Guide d'ENVI)

The ENVI FLAASH Model

This section is a brief overview of the atmospheric correction method used by FLAASH.

FLAASH starts from a standard equation for spectral radiance at a sensor pixel, L , that applies to the solar wavelength range (thermal emission is neglected) and flat, Lambertian materials or their equivalents. The equation is as follows:

$$L = \left(\frac{Ap}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (1)$$

where:

ρ is the pixel surface reflectance

ρ_e is an average surface reflectance for the pixel and a surrounding region

S is the spherical albedo of the atmosphere

L_a is the radiance back scattered by the atmosphere

A and B are coefficients that depend on atmospheric and geometric conditions but not on the surface.

Each of these variables depends on the spectral channel; the wavelength index has been omitted for simplicity. The first term in Equation (1) corresponds to radiance that is reflected from the surface and travels directly into the sensor, while the second term corresponds to radiance from the surface that is scattered by the atmosphere into the sensor. The distinction between ρ and ρ_e accounts for the adjacency effect (spatial mixing of radiance among nearby pixels) caused by atmospheric scattering. To ignore the adjacency effect correction, set $\rho_e = \rho$. However, this correction can result in significant reflectance errors at short wavelengths, especially under hazy conditions and when strong contrasts occur among the materials in the scene.

The values of A , B , S and L_a are determined from MODTRAN4 calculations that use the viewing and solar angles and the mean surface elevation of the measurement, and they assume a certain model atmosphere, aerosol type, and visible range. The values of A , B , S and L_a are strongly dependent on the water vapor column amount, which is generally not well known and may vary across the scene. To account for unknown and variable column water vapor, the MODTRAN4 calculations are looped over a series of different column amounts, then selected wavelength channels of the image are analyzed to retrieve an estimated amount for each pixel. Specifically, radiance averages are gathered for two sets of channels: an absorption set centered at a water band (typically 1130 nm) and a reference set of channels taken from just outside the band. A lookup table for retrieving the water vapor from these radiances is constructed.

Note

For images that do not contain bands in the appropriate wavelength positions to support water retrieval (for example, Landsat or SPOT), the column water vapor amount is determined by the user-selected atmospheric model (see [“Using Water Retrieval”](#) on page 23 for details).

After the water retrieval is performed, Equation (1) is solved for the pixel surface reflectances in all of the sensor channels. The solution method involves computing a spatially averaged radiance image L_e , from which the spatially averaged reflectance ρ_e is estimated using the approximate equation:

$$L_e \approx \left(\frac{(A + B)\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_a \quad (2)$$

Spatial averaging is performed using a point-spread function that describes the relative contributions to the pixel radiance from points on the ground at different distances from the direct line of sight. For accurate results, cloud-containing pixels must be removed prior to averaging. The cloudy pixels are found using a combination of brightness, band ratio, and water vapor tests, as described by Matthew et al. (2000).

The FLAASH model includes a method for retrieving an estimated aerosol/haze amount from selected dark land pixels in the scene. The method is based on observations by Kaufman et al. (1997) of a nearly fixed ratio between the reflectances for such pixels at 660 nm and 2100 nm. FLAASH retrieves the aerosol amount by iterating Equations (1) and (2) over a series of visible ranges, for example, 17 km to 200 km. For each visible range, it retrieves the scene-average 660 nm and 2100 nm reflectances for the dark pixels, and it interpolates the best estimate of the visible range by matching the ratio to the average ratio of ~0.45 that was observed by Kaufman et al. (1997). Using this visible range estimate, FLAASH performs a second and final MODTRAN4 calculation loop over water.

Reference

Kaufmann, Y. J., A. E. Wald, L. A. Remer, B.-C. Gao, R.-R. Li, and L. Flynn, 1997. *The MODIS 2.1- μ m Channel-Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 35, pp. 1286-1298.

Annexe 7

Liste des scènes SPOT associées aux mesures de turbidité en rivière

Suivi de la turbidité des eaux de Guyane. Etat des lieux et recommandations

Station	Différence en jour	Reference scène	Date Acquisition	Caractéristiques scène	Nombre utilisation scène	Visé e	Latitude centre scène	Longitude centre scène	Angle d'incidence	Orientatio n scène	R-XS1 (NTU)	R-XS2 (NTU)	R-XS3 (NTU)	Turbidité mesurée
LE MARONI À APATOU	13	56873400602131417161 J	13/02/2006	SCENE 5 687-340 06/02/13 14:17:16	1	L	5,010584	-	22,643883	12,659263	0,1344	0,1527	0,187	23,4
LA COMTE	0	56913400609051354371 J	05/09/2006	SCENE 5 691-340 06/09/05 13:54:37	1	R	4,849641	52,326138	10,226264	12,615674	0,0759	0,089	0,055	18,4
LE MARONI À APATOU	5	56873400610051417522 J	05/10/2006	SCENE 5 687-340 06/10/05 14:17:52	1	L	5,009392	54,200250	22,349909	12,681891	0,2623	0,2693	0,273	7,54
LA COMTE	1	56913410611121347001 J	12/11/2006	SCENE 5 691-341 06/11/12 13:47:00	1	R	4,508663	52,396944	25,152566	12,605076	0,0603	0,0785	0,062	17,7
SAVANE SARCELLE	7	56883390702071413061 J	07/02/2007	SCENE 5 688-339 07/02/07 14:13:06	1	L	5,511325	53,636718	18,209248	12,687645	0,0678	0,0853	0,105	21,6
LA COMTE	5	56913410702181401421 J	18/02/2007	SCENE 5 691-341 07/02/18 14:01:42	1	L	4,508855	52,475677	5,783065	12,585347	0,0889	0,1019	0,111	18,8
LA COMTE	6	56913410704171345392 J	17/04/2007	SCENE 5 691-341 07/04/17 13:45:39	1	R	4,508458	52,411684	25,267567	12,575445	0,1253	0,1553	0,124	23,4
LA COMTE	3	56913410706171411302 J	17/06/2007	SCENE 5 691-341 07/06/17 14:11:30	1	L	4,509475	52,404700	28,689578	12,658560	0,0244	0,0463	0,027	19,2
FLEUVE KOUROU	2	46903400707261352472 J	26/07/2007	SCENE 4 690-340 07/07/26 13:52:47	1	R	5,009977	52,755938	21,640738	6,013091	0,0304	0,0264	0,027	10,4
LA COMTE	0	56913410710051354232 J	05/10/2007	SCENE 5 691-341 07/10/05 13:54:23	1	R	4,508766	52,415867	2,202865	12,692467	0,0753	0,0797	0,055	21
LA COMTE	10	56913410807061403082 J	06/07/2008	SCENE 5 691-341 08/07/06 14:03:08	1	L	4,508755	52,430357	21,783734	12,607717	0,0407	0,0676	0,03	19,9
LEODATE	3	46903400807131359581 J	13/07/2008	SCENE 4 690-340 08/07/13 13:59:58	1	L	5,010091	52,801512	18,433135	8,748883	0,0111	0,0221	0,009	7,28
SAUT FRACAS	9	56883400808111410032 J	11/08/2008	SCENE 5 688-340 08/08/11 14:10:03	1	L	5,009698	53,795421	25,054056	12,676648	0,0271	0,0503	0,03	18,4
ACAROUANY JAVOUHEY	5	46883390808131403301 J	13/08/2008	SCENE 4 688-339 08/08/13 14:03:30	3	L	5,510949	53,617023	2,509968	8,763722	0,0185	0,0193	0,115	17,2
MANA AVAL (COUACHI)	12	46883390808131403301 J	13/08/2008	SCENE 4 688-339 08/08/13 14:03:30	3	L	5,510949	53,617023	2,509968	8,763722	0,0545	0,0686	0,018	28,8
ACAROUANY JAVOUHEY	14	46883390808131403301 J	13/08/2008	SCENE 4 688-339 08/08/13 14:03:30	3	L	5,510949	53,617023	2,509968	8,763722	0,0166	0,0236	0,078	7,01
PETIT ININI	14	56893430809281346312 J	28/09/2008	SCENE 5 689-343 08/09/28 13:46:31	1	R	3,507778	53,611366	18,085644	12,613475	0,0582	0,0712	0,117	18
REGINA (KIOSQUE MISE A L'EAU)	14	46923410809301339531 J	30/09/2008	SCENE 4 692-341 08/09/30 13:39:53	3	R	4,508964	51,953098	28,951698	8,436202	0,0651	0,0613	0,021	13,3
L'APPROUAGUE	7	46923410809301339531 J	30/09/2008	SCENE 4 692-341 08/09/30 13:39:53	3	R	4,508964	51,953098	28,951698	8,436202	0,0542	0,0487	0,017	13,2
MATARONI	14	46923420809301340021 J	30/09/2008	SCENE 4 692-342 08/09/30 13:40:02	3	R	4,008002	52,063084	28,951404	8,462191	0,0347	0,0227	0,219	3,3
RIVIERE ORAPU (MARGUERITE)	10	46913410810051343411 J	05/10/2008	SCENE 4 691-341 08/10/05 13:43:41	1	R	4,509001	52,428726	25,457382	8,470489	0,0424	0,0413	0,036	5,96
FOURMI	16	56923430810091334392 J	09/10/2008	SCENE 5 692-343 08/10/09 13:34:39	1	R	3,507053	52,027529	28,753114	12,655249	0,0409	0,0449	0,065	5,09
MAROUINI	5	46883440811041406482 J	04/11/2008	SCENE 4 688-344 08/11/04 14:06:48	1	L	3,006129	54,203673	10,348605	8,749706	0,0062	0,0112	0,006	3,8
ARATAI	4	56913420812051337072 J	05/12/2008	SCENE 5 691-342 08/12/05 13:37:07	1	R	4,008457	52,523544	25,462962	12,639839	0,0453	0,0513	0,11	10
TWENKÉ	3	46883430812061350472 J	06/12/2008	SCENE 4 688-343 08/12/06 13:50:47	1	R	3,507184	54,050641	21,639925	8,562511	0,0218	0,0178	0,009	1,9
VENUS	19	56903400901311342222 J	31/01/2009	SCENE 5 690-340 09/01/31 13:42:22	1	R	5,010646	52,785613	21,676983	12,60528	0,0105	0,0255	0,047	7,2
BAGOT	4	56913410905141404252 J	14/05/2009	SCENE 5 691-341 09/05/14 14:04:25	1	L	4,509128	52,411761	21,847666	12,690332	0,0025	0,0195	0,084	3,6
FLEUVE KOUROU	4	56903400906051341482 J	05/06/2009	SCENE 5 690-340 09/06/05 13:41:48	1	R	5,009913	52,850915	29,157304	12,649945	0,0192	0,0342	0,041	12,4
L'APPROUAGUE	16	56923410906261338332 J	26/06/2009	SCENE 5 692-341 09/06/26 13:38:33	1	R	4,508509	51,923975	28,725578	12,688425	0,0378	0,0498	0,049	20,3
LA COMTE	0	56913410908011347072 J	01/08/2009	SCENE 5 691-341 09/08/01 13:47:07	1	R	4,509178	52,409679	17,947517	12,689051	0,0452	0,0476	0,043	53,6
APSIK ICHOLI: LITANY AMONT	4	56883440909051415132 J	05/09/2009	SCENE 5 688-344 09/09/05 14:15:13	1	L	3,006312	54,231798	25,243660	12,622486	0,0351	0,0382	0,097	2,1
PETIT ININI	7	56893430909061355502 J	06/09/2009	SCENE 5 689-343 09/09/06 13:55:50	1	R	3,506513	53,608941	10,282949	12,693981	0,0519	0,0599	0,096	22
CRIQUE GABARET	17	56933420909121340192 J	12/09/2009	SCENE 5 693-342 09/09/12 13:40:19	1	R	4,008500	51,556782	25,527785	12,687860	0,0453	0,0493	0,142	0,38
ARATAI	5	56903420909171344222 J	17/09/2009	SCENE 5 690-342 09/09/17 13:44:22	1	R	4,007804	53,008310	28,811798	12,682287	0,0206	0,0195	0,08	5,9
PARAI ITOU	2	56923440910171408192 J	17/10/2009	SCENE 5 692-344 09/10/17 14:08:19	1	L	3,005931	52,270869	25,489399	12,655722	0,0274	0,0461	0,115	2,7
LA COMTE	8	56913410911081345132 J	08/11/2009	SCENE 5 691-341 09/11/08 13:45:13	1	R	4,509297	52,414486	25,312436	12,685648	0,0443	0,0565	0,043	16,7
ORAPU	2	56913411004071402252 J	07/04/2010	SCENE 5 691-341 10/04/07 14:02:25	2	L	4,509056	52,422810	6,013091	6,013091	0,0743	0,0867	0,119	8,1
LA COMTE	8	56913411004071402252 J	07/04/2010	SCENE 5 691-341 10/04/07 14:02:25	2	L	4,509056	52,422810	6,013091	6,013091	0,1455	0,1515	0,178	16,6
KAW AMONT	3	56923411004081343111 J	08/04/2010	SCENE 5 692-341 10/04/08 13:43:11	2	R	4,509333	51,931668	28,930230	12,649757	0,0528	0,0613	0,143	2,2
RÉGINA	18	56923411004081343111 J	08/04/2010	SCENE 5 692-341 10/04/08 13:43:11	2	R	4,509333	51,931668	28,930230	12,649757	0,0759	0,0839	0,099	25,4
LE MARONI À APATOU	7	56873401004281358492 J	28/04/2010	SCENE 5 687-340 10/04/28 13:58:49	1	R	5,009399	54,245000	17,886574	12,64606	0,0958	0,1193	0,109	32,2
PLAQUE ROCHE	4	46893391005011354521 J	01/05/2010	SCENE 4 689-339 10/05/01 13:54:52	1	L	5,510983	53,129613	6,581632	8,774628	0,0437	0,0412	0,12	21,5
ST LAURENT AVAL	9	56873391005021421472 J	02/05/2010	SCENE 5 687-339 10/05/02 14:21:47	1	L	5,511352	54,133927	28,932160	12,736049	0,0693	0,1019	0,084	19,95
REGINA	17	56923411005091347221 J	09/05/2010	SCENE 5 692-341 10/05/09 13:47:22	1	R	4,509275	51,929557	21,694992	12,643962	0,0529	0,0684	0,034	14
LEBLOND	0	46893401005221350312 J	22/05/2010	SCENE 4 689-340 10/05/22 13:50:31	2	R	5,009983	53,250054	1,865939	8,654794	0,0329	0,0243	0,118	19,03
VENUS	0	46893401005221350312 J	22/05/2010	SCENE 4 689-340 10/05/22 13:50:31	2	R	5,009983	53,250054	1,865939	8,654794	0,0146	0,0182	0,009	15,6
L'APPROUAGUE	8	56923411006031406431 J	03/06/2010	SCENE 5 692-341 10/06/03 14:06:42	2	L	4,508165	51,929211	18,105530	12,635954	0,0765	0,0929	0,087	16,5
MATARONI	8	56923421006031406511 J	03/06/2010	SCENE 5 692-342 10/06/03 14:06:51	2	L	4,007179	52,042993	18,105045	12,614280	0,0051	0,0101	0,028	5,6
PETIT ININI	10	46893431006121346242 J	12/06/2010	SCENE 4 689-343 10/06/12 13:46:24	1	R	3,507073	53,637556	10,691486	8,578186	0,0347	0,0361	0,076	13,2

COUACHI	11	56883391006141355021 J	14/06/201 0	SCENE 5 688-339 10/06/14 13:55:02	1	R	5,51122 5	- 53,650728	21,825356	12,604953	0,050 1	0,077 1	0,04	36,3
RÉGINA	6	46923411006181330281 I	18/06/201 0	SCENE 4 692-341 10/06/18 13:30:28	1	R	4,50908 2	- 51,915686	28,951915	8,403486	0,035 3	0,035 8	0,004	23,5
CACAO AVAL	5	56913411007051351282 J	05/07/201 0	SCENE 5 691-341 10/07/05 13:51:28	1	R	4,50950 6	- 52,418833	18,277479	12,652191	0,062 9	0,074 7	0,067	8,22
L'APPROUAGUE	9	46923411008091329032 I	09/08/201 0	SCENE 4 692-341 10/08/09 13:29:03	4	R	4,50912 3	- 51,985227	29,273358	8,384038	0,013 9	0,044 4	0,014	9,95
RÉGINA	13	46923411008091329032 I	09/08/201 0	SCENE 4 692-341 10/08/09 13:29:03	4	R	4,50912 3	- 51,985227	29,273358	8,384038	0,056 4	0,050 4	0,017	10,71
RÉGINA	10	46923411008091329032 I	09/08/201 0	SCENE 4 692-341 10/08/09 13:29:03	4	R	4,50912 3	- 51,985227	29,273358	8,384038	0,056 4	0,050 4	0,017	15,97
MATARONI	10	46923421008091329122 I	09/08/201 0	SCENE 4 692-342 10/08/09 13:29:12	4	R	4,00812 0	- 52,094925	29,273103	8,410434	0,032 7	0,028 5	0,101	5,03
LE MARONI À APATOU	10	56873401008141422322 J	14/08/201 0	SCENE 5 687-340 10/08/14 14:22:32	1	L	5,00926 4	- 54,242406	28,950647	12,712421	0,027 9	0,041 4	0,052	19,3
MAHURY	1	56913401008151403112 J	15/08/201 0	SCENE 5 691-340 10/08/15 14:03:11	2	L	4,79796 1	- 52,112702	8,299156	12,636113	0,111 2	0,126 2	0,104	19,43
ORAPU (PISTE MARGUERITE)	1	56913401008151403112 J	15/08/201 0	SCENE 5 691-340 10/08/15 14:03:11	2	L	4,79796 1	- 52,112702	8,299156	12,636113	0,018 9	0,028 8	0,031	18,28
RIVIÈRE ORAPU (MARGUERITE)	5	56913401008211347512 I	21/08/201 0	SCENE 5 691-340 10/08/21 13:47:51	1	R	4,79718 1	- 52,109245	23,515419	12,623265	0,037 2	0,043 4	0,042	18,28
PATAGAI: AVAL IRACOUBO	9	46893391008291343412 I	29/08/201 0	SCENE 4 689-339 10/08/29 13:43:41	1	R	5,51089 2	- 53,140789	10,010176	8,560129	0,056 7	0,051 2	0,08	12,82
ROCHE FENDE	5	46913411009031347372 I	03/09/201 0	SCENE 4 691-341 10/09/03 13:47:37	3	L	4,50911 7	- 52,409446	6,270168	8,722481	0,026 4	0,026 1	0,109	21
BAGOT	5	46913411009031347372 I	03/09/201 0	SCENE 4 691-341 10/09/03 13:47:37	3	L	4,50911 7	- 52,409446	6,270168	8,722481	0,029 5	0,025 5	0,086	6,26
CACAO (MISE À L'EAU)	5	46913411009031347372 I	03/09/201 0	SCENE 4 691-341 10/09/03 13:47:37	3	L	4,50911 7	- 52,409446	6,270168	8,722481	0,035 3	0,037 8	0,018	12,07
STATION 3	4	46913421009141335502 I	14/09/201 0	SCENE 4 691-342 10/09/14 13:35:50	1	R	4,00816 3	- 52,539782	18,199573	8,500454	0,034 8	0,031 3	0,065	10,54
ARATAI	3	56913421009161348132 I	16/09/201 0	SCENE 5 691-342 10/09/16 13:48:13	2	R	4,00838 8	- 52,525958	25,301791	12,647077	0,040 9	0,041 5	0,12	8
MACHICOU	5	56913421009161348132 I	16/09/201 0	SCENE 5 691-342 10/09/16 13:48:13	2	R	4,00838 8	- 52,525958	25,301791	12,647077	0,046 5	0,049 1	0,076	11,4
AM SPAROUINE	0	56873401010051422372 J	05/10/201 0	SCENE 5 687-340 10/10/05 14:22:37	1	L	5,00962 4	- 54,239550	28,872632	12,712181	0,133 9	0,150 4	0,144	17,9
PLAQUE ROCHE	4	56893391010171351382 J	17/10/201 0	SCENE 5 689-339 10/10/17 13:51:38	1	R	5,51101 0	- 53,164644	25,453371	12,584966	0,022 9	0,028 6	0,069	4,34
CACAO AVAL	3	46913411010251345512 I	25/10/201 0	SCENE 4 691-341 10/10/25 13:45:51	2	L	4,50898 0	- 52,398278	6,269739	8,715895	0,025 5	0,025 5	0,041	7,7
ORAPU (PISTE MARGUERITE)	3	46913411010251345512 I	25/10/201 0	SCENE 4 691-341 10/10/25 13:45:51	2	L	4,50898 0	- 52,398278	6,269739	8,715895	0,065 5	0,060 7	0,05	5,9
KAW	14	46923421010261326291 I	26/10/201 0	SCENE 4 692-341 10/10/26 13:26:29	2	R	4,50903 4	- 51,928811	2,895117	8,390854	0,112 9	0,099 8	0,181	14,06
MATARONI	2	46923421010261326381 I	26/10/201 0	SCENE 4 692-342 10/10/26 13:26:38	2	R	4,00817 5	- 52,038361	28,950869	8,416854	0,040 2	0,038 1	0,038	32,7
AV ST LAURENT	5	56873391010311422252 J	31/10/201 0	SCENE 5 687-339 10/10/31 14:22:25	1	L	5,51127 6	- 54,122226	28,748516	12,736922	0,067 7	0,076 7	0,067	22,1
MACHICOU	13	56913421011071348112 J	07/11/201 0	SCENE 5 691-342 10/11/07 13:48:11	1	R	4,00797 8	- 52,522529	25,417713	12,680428	0,024 1	0,032 1	0,06	9,7
BALATE	4	46873391011091356401 I	09/11/201 0	SCENE 4 687-339 10/11/09 13:56:40	2	L	5,51089 2	- 54,142863	14,072667	8,849830	0,045 5	0,056 8	0,023	13,8
BALATE	1	46873391011091356401 I	09/11/201 0	SCENE 4 687-339 10/11/09 13:56:40	2	L	5,51089 2	- 54,142863	14,072667	8,849830	0,045 5	0,056 8	0,023	19,5
RÉGINA	4	46923411011251348352 I	25/11/201 0	SCENE 4 692-341 10/11/25 13:48:35	1	L	4,50912 6	- 51,954047	17,845920	8,832308	0,057 5	0,068 5	0,03	4,52
CAMOPI	18	46923441101221331222 I	22/01/201 1	SCENE 4 692-344 11/01/22 13:31:22	1	R	3,00613 2	- 52,230598	14,097551	8,536895	0,067 5	0,064 7	0,043	7,22
PETIT ININI	0	46883431106101352111 I	10/06/201 1	SCENE 4 688-343 11/06/10 13:52:11	1	L	3,50706 3	- 54,063162	25,758255	8,844681	0,030 7	0,037 3	0,065	23,54
PAPAICHTON	4	46883421107061350441 I	06/07/201 1	SCENE 4 688-342 11/07/06 13:50:44	1	L	4,00816 6	- 53,935081	25,755388	8,875069	0,022 6	0,042 6	0,027	20,92
OYAPOCK	4	56923441107251346391 J	25/07/201 1	SCENE 5 692-344 11/07/25 13:46:39	1	R	3,00630 9	- 52,275825	21,864367	12,645055	0,055 8	0,068 4	0,099	7,09
BAGOT	1	56913411108241408542 J	24/08/201 1	SCENE 5 691-341 11/08/24 14:08:54	1	L	4,50941 6	- 52,414636	21,847766	12,637980	0,088 9	0,094 9	0,245	7,7
SIKINI	14	56923441112021344361 I	02/12/201 1	SCENE 5 692-344 11/12/02 13:44:36	1	R	3,00599 2	- 52,275027	21,911815	12,658226	0,016 7	0,016 6	0,04	9,98
ALIKORNE	2	56913441112021344382 J	02/12/201 1	SCENE 5 689-340 10/12/17 14:18:45	1	R	5,00944 4	- 53,271688	25,367373	12,670877	0,014 1	0,024 9	0,051	9,17
CHIEN	11	56913441209131336562 J	13/09/201 2	SCENE 5 691-344 12/09/13 13:36:56	1	R	3,00577 4	- 52,708628	25,264037	12,652352	0,070 3	0,077 4	0,097	24,7



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

BRGM Guyane
Domaine de Suzini
Route de Montabo
97300 - Cayenne - France
Tél. : 05 94 30 06 24