

# **PREFAISABILITE TECHNIQUE**

**Edition 2022**

## **BOREAL**

L'utilisation de biofloculants  
dans les ouvrages de gestion  
des eaux de ruissellement des mines



# Rapport Scientifique

# 2022

Programme CNRT – Environnement eau  
Projet BOREAL – Préfaisabilité technique



Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par  
le CNRT « Nickel & son environnement »



2022





# « UTILISATION DE BIOFLOCULANTS DANS LES OUVRAGES DE GESTION DES EAUX DE RUISSELLEMENT DES MINES »

## Rapport de pré faisabilité technique

Octobre 2022

Ouvrage collectif coordonné par Solène Touzé (BRGM)

Pour le consortium BRGM - INSA Toulouse - UNC

Auteurs :

Yolaine Bessiere (INSA)

Etienne Paul (INSA)

Pascal Guiraud (INSA)

Mickael Meyer (UNC)

## RÉVISION DU DOCUMENT

Réf.	CSF n° 8PS17-CNRT.BRGM/BOREAL			
Version	Date	Rédacteur(s)	Qualité rédacteur(s)	du Révision pour CNRT
VX	JJ/MM/20XX	Prénom (Organisme) Nom	Coordinateur du programme ou autre qualité	

## CITATION DU DOCUMENT

**Mots clés** : floculant, floculant biosourcé, floculation, eaux de ruissellement, mines, gestion des eaux

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

Touzé S., Bessiere Y., Paul E., Guiraud P., Meyer Mickaël. (2021) Utilisation de biofloculants dans les ouvrages de gestion des eaux de ruissellement des mines. Programme « Environnement Eau ». CNRT « Nickel & son environnement ». 37 pages.

## SOMMAIRE

<b>1. SYNTHÈSE</b> .....	<b>7</b>
<b>2. INTRODUCTION</b> .....	<b>8</b>
<b>3. SITES D'ÉTUDE</b> .....	<b>9</b>
3.1. SUIVI DES EAUX.....	10
3.1.1. Zone Nord (station SJ-ON1) .....	10
3.1.2. Zone Ouest (station SJ-ADS) .....	11
3.1.3. Zone Sud (SJ-BA301).....	12
3.2. POINTS DE PRÉLÈVEMENTS.....	13
<b>4. CARACTÉRISATION DES ÉCHANTILLONS</b> .....	<b>15</b>
4.1. MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	15
4.2. TAMISAGE ET GRANULOMÉTRIE LASER .....	15
4.3. DIFFRACTION DE RAYON X .....	17
<b>5. ESSAIS DE FLOCCULATION</b> .....	<b>18</b>
5.1. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	18
5.1.1. Floculants testés.....	18
5.1.2. Essais de floculation en Jar-Tests .....	18
5.1.3. Méthodes de caractérisation des vitesses de decantation.....	20
5.2. RÉSULTATS.....	23
5.2.1. Kaolinite.....	23
5.2.2. Site de Tiebaghi .....	24
5.3. CONCLUSION.....	25
<b>6. PRÉ-DIMENSIONNEMENT</b> .....	<b>27</b>
6.1. PRINCIPE .....	27
6.2. DONNÉES DE TERRAIN .....	27
6.3. CALCULS.....	28
<b>7. FEUILLE DE ROUTE SUR LA MISE EN ŒUVRE DES BIOFLOCCULANTS</b> .....	<b>32</b>
7.1. DIMENSIONNEMENT D'UN PILOTE .....	32
7.1.1. Principe.....	32
7.1.2. Design du pilote.....	32
7.1.3. Fonctionnement.....	33
7.1.4. Autres options.....	34
7.2. POINTS D'ATTENTION ET LIMITATION .....	34
7.3. PRODUCTION DU FLOCCULANT SUR PLACE.....	34
<b>8. CONCLUSION</b> .....	<b>36</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : positionnement des zones d'étude.....	9
Figure 2 : équipements présents sur certaines stations de suivi des eaux.....	10
Figure 3 : hauteur d'eau dans le seuil, station SJ-ON1.....	11
Figure 4 : hauteur d'eau dans le seuil, station SJ-ADS.....	12
Figure 5 : Prélèvements Zone Ouest et Nord.....	14
Figure 6 : prélèvements zone Sud .....	14
Figure 7 : prélèvements hors zone d'exploitation.....	14
Figure 8 : refus en % massique pour les échantillons 2, 4, 7 et 8 de Tiebaghi (maille en $\mu\text{m}$ ).....	16
Figure 9 : distribution en taille des échantillons 2,4, 7 et 8 de Tiebaghi .....	16
Figure 10 : diffractogramme des échantillons 2, 4 et 7 traité par affinement Rietveld.....	17
Figure 11 : photographie de l'appareillage « jar-test » utilisé pour effectuer les tests de floculation....	19
Figure 13 : évolution théorique, pour un diamètre de particules constant, du signal de transmission (a) et de rétrodiffusion (b) en fonction de la fraction volumique. ....	21
Figure 14 : exemple de signaux de transmission et de rétrodiffusion ( $H=0$ , en pied de cellule). ....	21
Figure 15 : courbe d'étalonnage du signal de transmittance en fonction de la concentration (a) ; évolution temporelle de la concentration moyenne du surnageant au cours du temps (b). ....	22
Figure 16 : distribution des vitesses de chute des particules. Site Tiebaghi.....	22
Figure 17 : abattement en turbidité de suspension de kaolinite après 1 et 5 minutes (soit 1.34 m/h et 0,26 m/h respectivement). ....	23
Figure 18 : efficacité de biopolymères en présence de chlorure ferrique (20mg/L) par rapport au PAM (0,2 mg/L). ....	24
Figure 19 : observation après décantation de l'échantillon 8 pour a) le PAM ; b) IP_INSA2.....	24
Figure 20 : cinétique de décantation échantillon 8 (a) ; courbe d'étalonnage turbidité – MES (b). ....	25
Figure 21 : exemple de concentration et flux de matière correspondants - sans bassin (a) ; avec décantation physique (b) ; avec décantation physico-chimique (c) – basé sur les résultats obtenus avec l'échantillon 8 et pour une vitesse de décantation de 1,34 m/h.....	26

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : teneur en MES, station SJ-ON1 .....	11
Tableau 2 : teneur en MES, station SJ-ADS.....	12
Tableau 3 : teneur en MES, station SJ-BA301.....	13
Tableau 4 : liste des prélèvements.....	13
Tableau 5 : $d_{10}$ , $d_{50}$ et $d_{90}$ pour les échantillons 2, 4 7 et 8 de Tiebaghi .....	16
Tableau 6 : % massique des phases minérales déterminées pas diffraction de rayon X.....	17
Tableau 7 : éléments de dimensionnement de l'unité pilote .....	33

## LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

CNRT	Centre National de Recherche Technologique
ERU	Eaux RésiduaireS UrbaineS
MES	Matière En Suspension
NMC	Nickel Mining Company
PAM	PolyAcrylaMide
SLN	Société Le Nickel

# 1. SYNTHÈSE

La Nouvelle Calédonie possède de nombreux gisements de nickel exploités aujourd'hui par plusieurs groupes miniers. Le phénomène d'érosion météorique est à l'origine du transport de matières en suspension (MES) dans les eaux de ruissellement et les eaux des rivières vers l'aval des bassins versants, et par conséquent vers le littoral.

Le projet BOREAL a pour objectif d'étudier et d'optimiser les mécanismes de décantation des particules solides transportées dans les eaux de ruissellement de ces mines. Il se focalise sur l'applicabilité de floculants biosourcés pour améliorer la séparation solide/liquide et clarifier l'eau d'exhaure. Pour se rapprocher des problématiques du terrain, il a été décidé d'appliquer cette étude à des exemples réels. La concertation avec les acteurs miniers et le CNRT a abouti au choix du site minier test de Tiebaghi.

La mine de Tiebaghi appartient à la SLN, elle se situe dans la province Nord à 10 km du village de Koumac. C'est un site qui s'étale sur 9 700 ha. La SLN a équipé le site d'une quinzaine de stations de suivi des eaux. Les données des stations limnométriques ont été reprises et 3 stations « tests » ont été choisies dans 3 zones différentes: zone nord (Fantoche et Cascade) sur laquelle il n'y a plus d'activité de découverte, zone ouest qui se situe sous la verse principale et zone sud (Fridoline et Alpha) sur laquelle des activités de découverte sont en cours. Sur les 3 stations, les bassins débordent vers l'exutoire, uniquement lors des forts éléments pluvieux ; le reste du temps le débit est nul. Le taux de MES lors des débordements est très variable : 1 à 1200 mg/kg. Une visite du site a permis de prélever des échantillons sur ces 3 stations et quelques échantillons en dehors de la zone d'exploitation.

Les échantillons de Tiebaghi ont été utilisés pour effectuer les essais de floculation en laboratoire. L'objectif était d'évaluer la clarification des effluents miniers à l'aide de floculants biosourcés et de fournir des informations quantitatives pour réaliser une extrapolation. Pour la majorité des échantillons, la vitesse de sédimentation des MES (sans floculant) est faible < 1 m/h, voire très faible 0.01 m/h. Ce constat montre qu'il est nécessaire de floculer pour avoir une chance d'abattre les MES. Sur l'échantillon de la station nord, le biofloculant testé (brevet FR3093732) a permis de d'abattre près de 80% de MES (base 0.66 m/h), ce qui représente une amélioration de l'ordre de 56% par rapport à un essai sans floculant.

Les données du site de Tiebaghi n'étaient pas suffisamment exhaustives pour faire un pré-dimensionnement spécifique au site. Pour pouvoir fournir des ordres de grandeur, il a été nécessaire de faire quelques hypothèses. Le site de la zone nord a servi de base pour poser ces hypothèses. L'installation « simulée » comprend 3 bassins en cascade (7000 m<sup>2</sup>), des débits allant de 100 m<sup>3</sup>/h à 900 m<sup>3</sup>/h et un taux de MES maximal à 300 mg/L. La simulation montre que dans un système sans floculant le taux de capture est de 30% à 900 m<sup>3</sup>/h et 60% à 300 m<sup>3</sup>/h alors que le système avec biofloculant atteint un taux de capture de 80% pour les 2 débits.

A partir des informations recueillies sur site et au laboratoire, nous proposons une « feuille de route » détaillant un pilote de captation des MES par floculation. Le pilote a pour objectif de valider les données de laboratoire et d'observer la sensibilité du procédé à la réalité du terrain, notamment concernant la dynamique et l'intensité des épisodes pluvieux. Le pilote se décompose en deux bassins en parallèle, un sans floculant et un avec. Le but est de comparer les MES retenues dans les deux décanteurs après un événement de forte pluie. Les événements météorologiques étant soudains et intenses, il est primordial que la mise en route du pilote soit immédiate, pour cela, elle doit être asservie au niveau d'eau dans les seuils.

## 2. INTRODUCTION

L'exploitation à ciel ouvert des couches latéritiques des minerais nickélifères de Nouvelle Calédonie nécessite l'excavation du couvert végétal et des horizons peu riches en nickel, menant à la découverte des sols et à la production de stériles miniers, dont l'altération météoritique, particulièrement intense lors d'épisodes tropicaux, est à l'origine de transports de sédiments et d'éléments métalliques traces (ETM) vers les hydro-systèmes (CNRT 2019). Le surpâturage et les brûlis de défrichement pratiqués par les populations locales pour étendre leurs zones de culture, de pâturage et de chasse, contribuent également à l'érosion des sols et au transport de sédiments (Sellier, 2020). Ces activités mènent à un sur-engravement et une hypersédimentation des réseaux hydrographiques en aval des bassins versants, aggravant les problèmes d'inondation déjà existants dans ces régions tropicales, et à la formation de zones de surconcentration en métaux lourds (Ni, Co, Cr, Fe) susceptibles d'être ingérés par la faune et la flore locale, et *in fine* par les populations locales.

Si depuis la loi du 15 juillet 1975, renforcée par la mise en place d'un Code minier en 2009, les stériles doivent être placés dans des verses adaptées, des décharges minières plus anciennes subsistent et contribuent à ces phénomènes : CNRT (2018) estime qu'environ 200 Mt de stériles ont été produits avant 1975 par l'exploitation du nickel. Ce stock de stériles miniers continue de se vidanger progressivement dans les rivières, principalement au cours des épisodes cycloniques. Par ailleurs les mines actives et certaines mines abandonnées et non réhabilitées constituent des terrains propices à une érosion accélérée des sols par les eaux de ruissellement. Pour les opérateurs miniers, une bonne gestion de ces eaux est critique, non seulement pour respecter les normes de rejet prescrites par la législation, et adossées à un principe de "pollueur-payeur" instauré par l'article 110-7 du Code minier de 2009, mais aussi pour conserver l'acceptabilité sociale de leurs opérations par les diverses parties prenantes locales.

La définition de plans de gestion des eaux de ruissellement et des guides opérationnels préconisent, outre une gestion proactive par modification de l'environnement de la mine, la mise en place de bassins de rétention temporaire des eaux de ruissellement, positionnés en aval de l'exploitation et en amont des bassins versants, afin de capter et d'immobiliser les matières en suspension sous forme de sédiments. Selon les caractéristiques pédologiques et les conditions d'exploitation du minerai, ainsi que les conditions pluviométriques locales, l'adjonction d'une station de floculation/coagulation des fines avant introduction dans le bassin peut également être nécessaire.

C'est dans ce contexte que le projet BOREAL s'insère, son objectif principal consiste à évaluer la préfaisabilité d'utilisation de produits floculants biosourcés dans les systèmes de gestion des eaux de ruissellement des mines de Nouvelle Calédonie.

Dans un premier temps, ce rapport détaille les sites d'études choisis ainsi que les prélèvements faits sur site. Il expose ensuite les caractéristiques physico-chimiques des échantillons et les essais de floculation réalisés dessus. Sur la base des résultats techniques obtenus dans ce projet, une feuille de route pour la réalisation d'un pilote est proposée et le potentiel d'intégration du procédé au contexte de la Nouvelle Calédonie est ensuite discuté.

### 3. SITES D'ÉTUDE

Les sites d'étude ont été identifiés en concertation avec les acteurs miniers et le CNRT. L'objectif était d'identifier des sites miniers qui soient représentatifs des problématiques de gestion des MES entraînées par les eaux de ruissellement sur des zones de découverte. Le site identifié est celui de Tiebaghi. Des caractérisations complémentaires ont été réalisées sur les sites de Nakety et de Houailou, elles ne sont pas présentées dans ce rapport.

Une liste de données techniques nécessaires à l'étude a été demandée, principalement : les chroniques des débits (dont les pics) et les taux de MES et la taille des bassins. Seul le site de Tiebaghi a pu fournir des informations chiffrées. Néanmoins, ces informations restent partielles et ne permettent pas de détailler le fonctionnement hydrique des installations ; ces informations sont présentées ci-dessous.

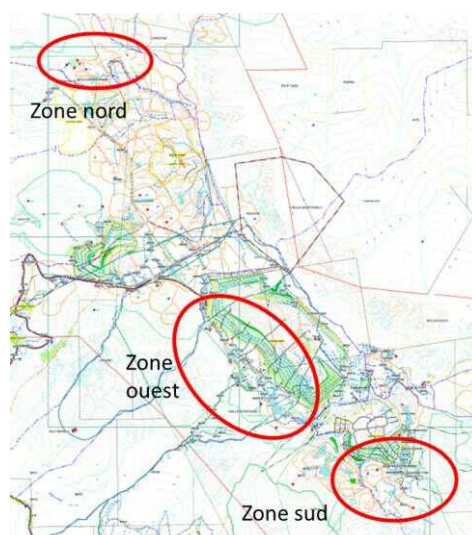
La mine de Tiebaghi a été ouverte en 1997, elle appartient à la SLN. Elle est située dans la province Nord à 10 km du village de Koumac, le massif de Tiebaghi fait 9 700 ha. 250 personnes travaillent sur le site.

Les eaux de ruissellement sont canalisées et récupérées dans des bassins positionnés en série. Les eaux sont ensuite évacuées en dehors du site au niveau des exutoires. Certains bassins sont en eau car leur niveau est plus bas que celui de la nappe tandis que d'autres ne se remplissent que lors d'évènements pluvieux. Ces derniers sont siphonnés vers l'exutoire lorsque l'eau a décanté et qu'elle est claire.

Sur les parcelles en activité, les aménagements évoluent en fonction de l'avancée des travaux. Les activités d'exploitation induisent de forte concentration de MES dans les eaux de ruissèlement. Pour limiter ces concentrations en entrée de bassin, une zone de capture constituée d'enrochements est positionnée en amont des bassins, elle joue le rôle de filtre.

Le projet s'est focalisé sur le versant Ouest de la mine, celui-ci borde le lagon. Sur ce versant 3 zones ayant des historiques différents ont été identifiées :

- Zone nord (Fantoche et Cascade) sur laquelle il n'y a plus d'activité de découverte
- Zone ouest qui se situe sous la verse principale
- Zone sud (Fridoline et Alpha) sur laquelle des activités de découverte sont en cours



**Figure 1 : positionnement des zones d'étude**

### 3.1. SUIVI DES EAUX

La SLN nous a transmis les relevés des stations présentes sur le site, les informations ont été fournies brutes sans avoir été retraitées. Le traitement a donc été fait par le BRGM avec les données disponibles. Les stations sont équipées de différents type d'installations :

- Seuil avec déversoir de type « H-FLUME » avec échelle limnométrique pour mesure visuelle
- 2 types de sondes de pression sont utilisées pour mesurer la hauteur d'eau dans les seuils
  - RT100 (Rugged Troll) sonde placée au fond du seuil ou dans un tube adjacent au seuil
  - LT500 (Level Troll) dans le bassin ou le déversoir.
- Préleveur automatique ISCO (24 flacons, asservissement du préleveur à la hauteur d'eau, prélèvement des échantillons au niveau du seuil)



**Figure 2 : équipements présents sur certaines stations de suivi des eaux**

Une station a été choisie pour chacune des trois zones (nord, ouest et sud), le choix s'est porté sur les stations le mieux renseignées. Dans le jeu de données transmis, des courbes d'étalonnage de débit étaient rattachées à certains seuils. Après discussions avec les techniciens sur place, il s'est avéré que ces mesures n'étaient pas correctes et qu'il ne fallait pas les prendre en compte.

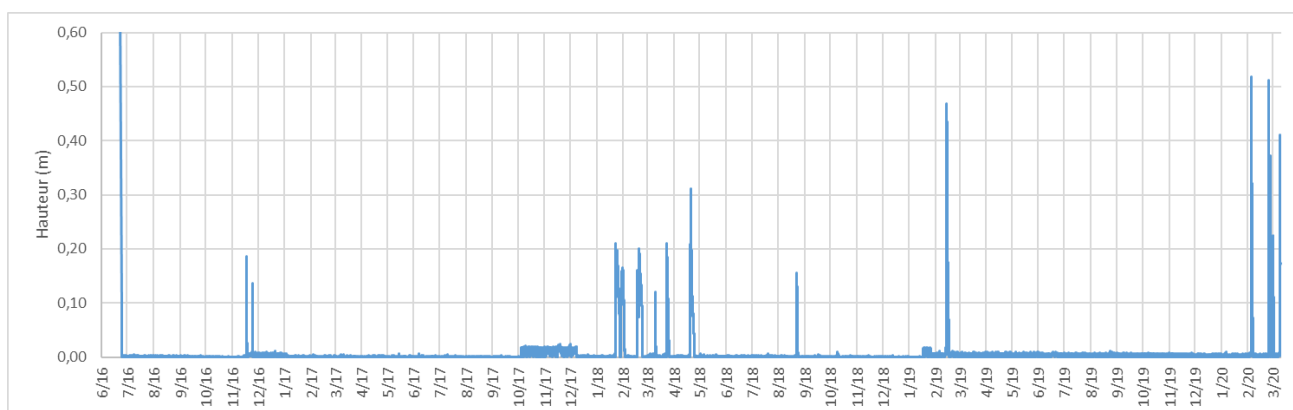
La superficie des bassins a été évaluée à partir des photos aériennes (Google earth®).

#### 3.1.1. ZONE NORD (STATION SJ-ON1)

La station SJ-ON1 correspond à l'exutoire de 3 bassins en cascade et un 4<sup>ème</sup> bassin amont qui apporte une partie des flux. La station de suivi est sur le troisième bassin. Le bassin minier concerné est de petite taille et n'a pas d'autre exutoire.

Les superficies des bassins sont : bassin BS532 2760 m<sup>2</sup> (environ longueur 86m, largeur 36m), bassin BS533 1700 m<sup>2</sup> (environ longueur 66m, largeur 28m) et bassin BS534 1200 m<sup>2</sup> (longueur 53m, largeur 34m).

La chronique des sondes (2016-2020) montre que la hauteur d'eau est quasi nulle la majorité du temps. Elle augmente brusquement lors de fortes précipitations, ces pics sont présents entre novembre et avril (Figure 3).



**Figure 3 : hauteur d'eau dans le seuil, station SJ-ON1**

Le préleveur automatique s'est mis en route uniquement lors de ces forts événements pluvieux. Les prélèvements ont été analysés et les teneurs en MES sont détaillées dans le Tableau 1.

Date	MES (mg/L)	
	min	max
23/11/2016	45	50
30/11/2016	16	65
26/04/2018	3	7
28/08/2018	11	16
19/02/2019	31	47
11/02/2020	50	300

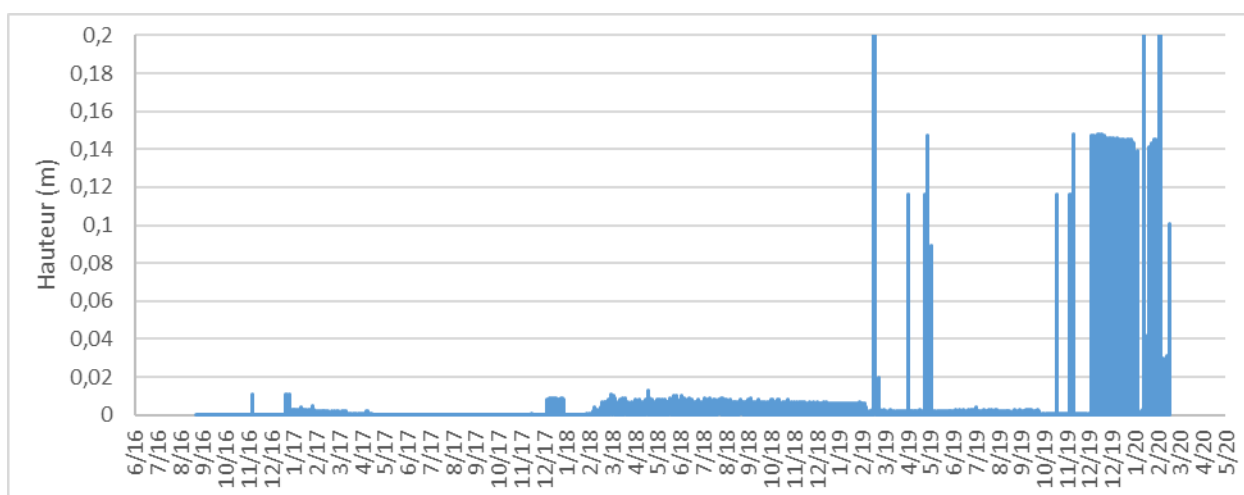
**Tableau 1 : teneur en MES, station SJ-ON1**

### 3.1.2. ZONE OUEST (STATION SJ-ADS)

La station SJ-ADS est sur un bassin qui est alimenté par une série de bassins, il est difficile d'identifier exactement les bassins concernés, ils font partie de la liste suivante : BS528, BS502, BS503, DC413 et DC416. La taille des deux bassins qui semblent être en amont est : bassin B502-Saphir 450m<sup>2</sup> (longueur 42m, largeur 10m) et bassin DC413 3700m<sup>2</sup> (longueur 150m, largeur 18m).

Le technicien sur place indique que cette station recueille une grande partie des eaux de lessivage des pistes.

La chronique des sondes (Figure 4) montre que la hauteur d'eau est quasi nulle la majorité du temps. De nombreux pics sont visibles fin 2019 à début 2020. Ces pics ne sont pas cohérents avec la figure précédentes (Figure 3) et la pluviométrie. Il semble qu'il y est un artefact de mesure sur cette sonde sur cette période.



**Figure 4 : hauteur d'eau dans le seuil, station SJ-ADS**

La corrélation entre les pics de hauteur et les prélèvements pour les MES (Tableau 2) ne se vérifie pas systématiquement.

Date	MES (mg/l)	
	min	max
13/11/2016	350,73	526,00
26/12/2016	4,07	6,85
08/01/2017	4,18	41,11
26/04/2018	1,27	14,11
27/04/2018	3,52	15,00
28/08/2018	17,78	54,63
04/02/2019	51,85	173,15
05/02/2019	12,04	46,48
06/02/2019	7,59	207,78
31/01/2019	60,38	1209,62
18/02/2019	6,30	27,41
21/02/2019	3,33	3,33
10/02/2020	8,40	8,90
11/02/2020	4,80	377,50
12/02/2020	322,60	322,60
13/02/2020	1,40	10,00

**Tableau 2 : teneur en MES, station SJ-ADS**

### 3.1.3. ZONE SUD (SJ-BA301)

Pour cette station, il n'existe pas de bassin en cascade directe, certains des bassins peuvent être distants de 80m. Les bassins concernés sont les bassins BS407-Saphir 3700m<sup>2</sup> (longueur 83m, largeur 38m), bassin DC410 4000m<sup>2</sup> (longueur 83m, largeur 63m) et le bassin BA308-Nacrite-Saumonee 3500m<sup>2</sup> (longueur 100m, largeur 33m).

Le préleveur s'est mis en route une dizaine de fois entre 2016 et 2020 (Tableau 3). De nombreuses dates concordent avec les stations SJ-ON1 et SJ-ADS.

Date	MES (mg/l)	
	min	max
13/11/2016	526	350
26/12/2016	4	6.85
08/01/2017	4.18	19.6
31/01/2019	60	1200
04-05-06/2019	7	200
10-11-12-13/02/2019	1.4	377
18/02/2019	6	17
21/02/2019	3	3

**Tableau 3 : teneur en MES, station SJ-BA301**

### 3.2. POINTS DE PRÉLÈVEMENTS

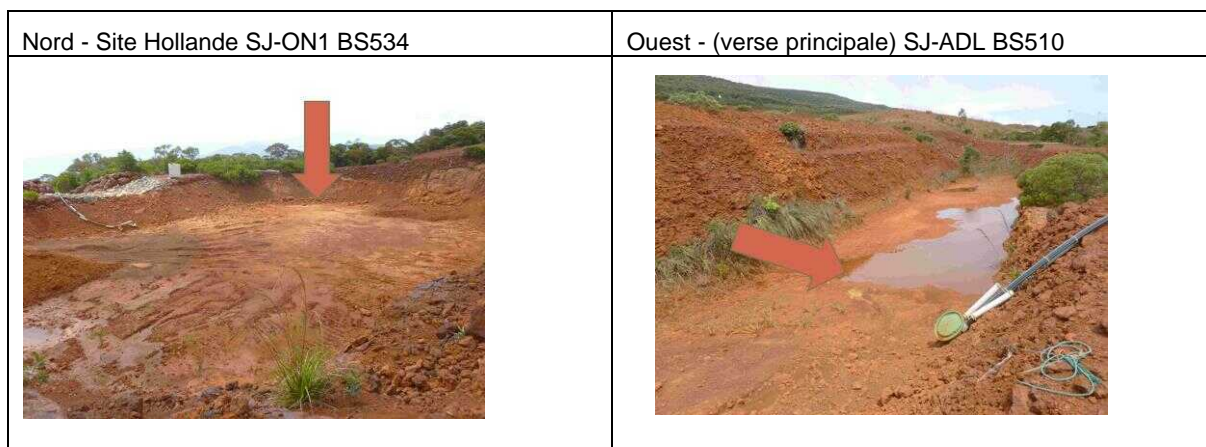
Deux déplacements sur le site Tiebaghi ont permis de prélever une dizaine d'échantillons. La station ciblée dans le chapitre précédant SJ- ADS n'a pas pu être échantillonnée par manque de sédiment. Elle a été remplacée par la station la plus proche possible : SJ-ADL.

Les échantillons ont été prélevés à la pelle en surface des bassins. La liste des prélèvements est détaillée dans le Tableau 4.

	Zone	Nom de la station	Type de matériau prélevé
1	Sud - Fridoline	SJ-BA301-1	sédiments
2	Sud - Fridoline	SJ-BA301-2	sédiments
3	Sud - Bassin récent	SJ-BS303	très faible quantité
4	Sud - Bassin récent	SJ-BS303	sédiments
5	Sud - Bassin récent	SJ-BS303	surageant
6	Ouest - (verse principale)	SJ-ADL BS510	sédiments
7	Nord - Site Hollande	SJ-ON1 BS534	sédiments
8	Site usine - laverie	BS543	sédiments
9	Site usine - Ech Minerais		Minerais sortie laverie
10	Site usine - proche unité de mise en pulpe		sédiments
11	Hors site - plage de Pagoumène		MES

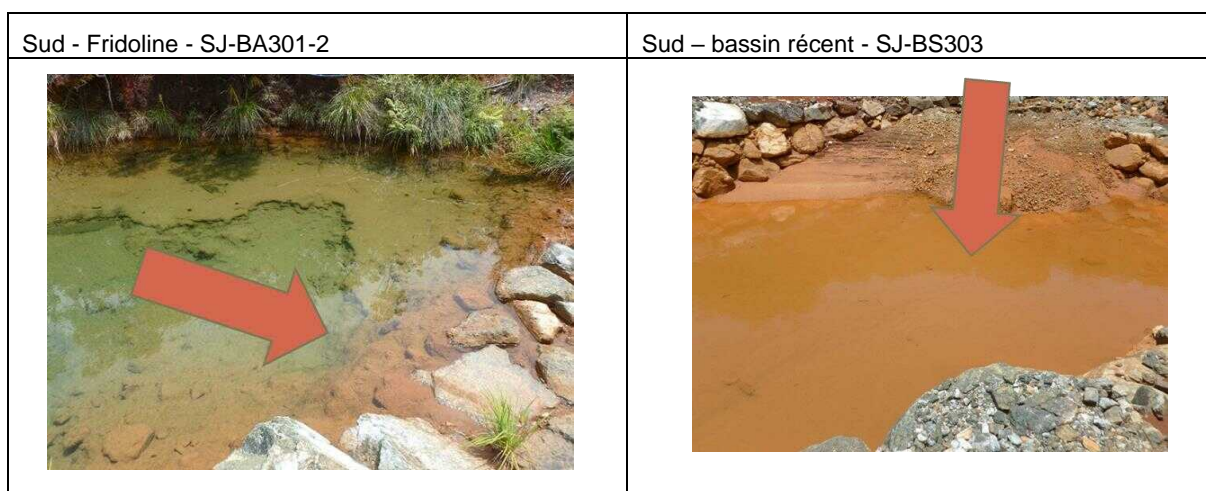
**Tableau 4 : liste des prélèvements**

Pour les sites Nord et Ouest, les bassins étaient à sec, les prélèvements ont été fait en fond de bassin (Figure 5).



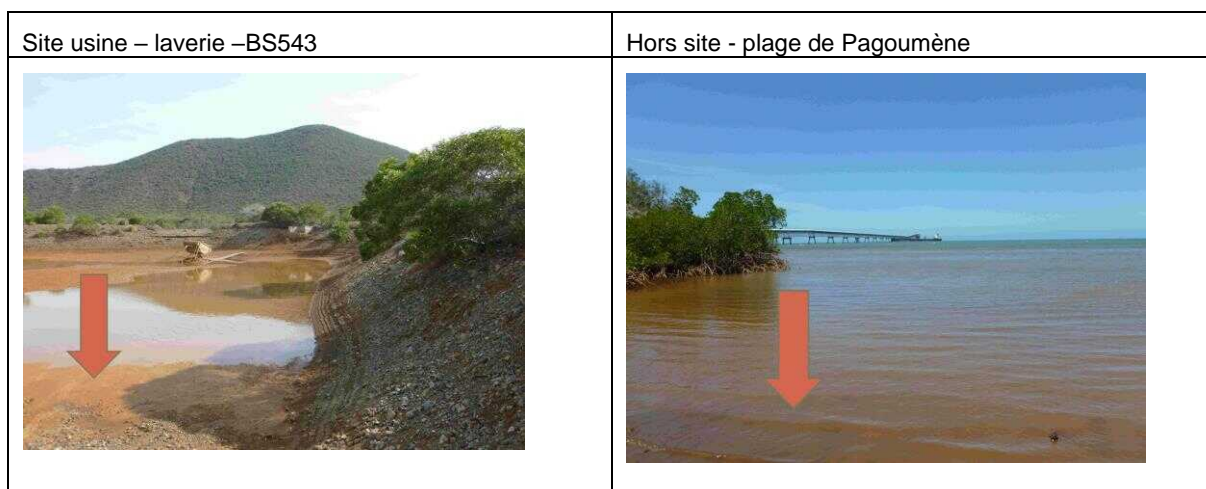
**Figure 5 : Prélèvements Zone Ouest et Nord**

Sur les sites de la zone sud il existe de forte différence de turbidité (Figure 6). Le bassin Fridoline SJ-BA301-2 a des apports de la nappe, il est clair. Le bassin récent, qui est situé sous une zone en activité, présente une forte turbidité.



**Figure 6 : prélèvements zone Sud**

Afin d'avoir un large panel d'échantillons, des prélèvements ont également été faits sur le site de traitement qui est en contrebas de la zone d'exploitation et dans le lagon (Figure 7).



**Figure 7 : prélèvements hors zone d'exploitation**

## 4. CARACTÉRISATION DES ÉCHANTILLONS

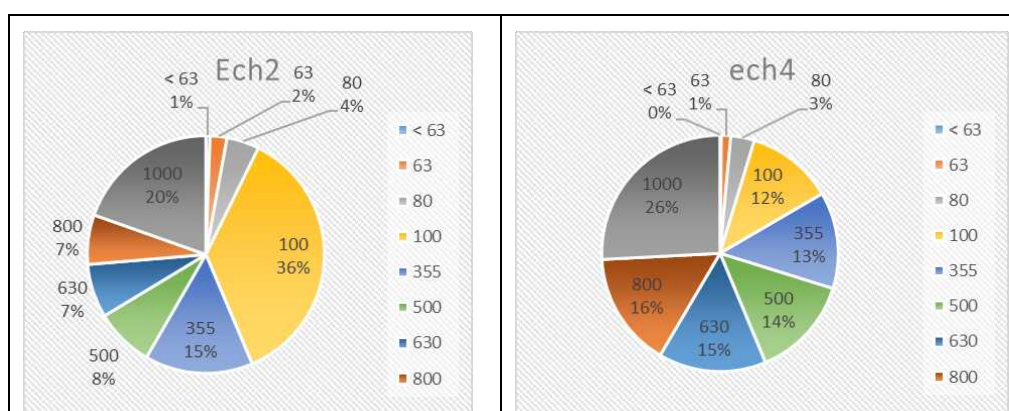
### 4.1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

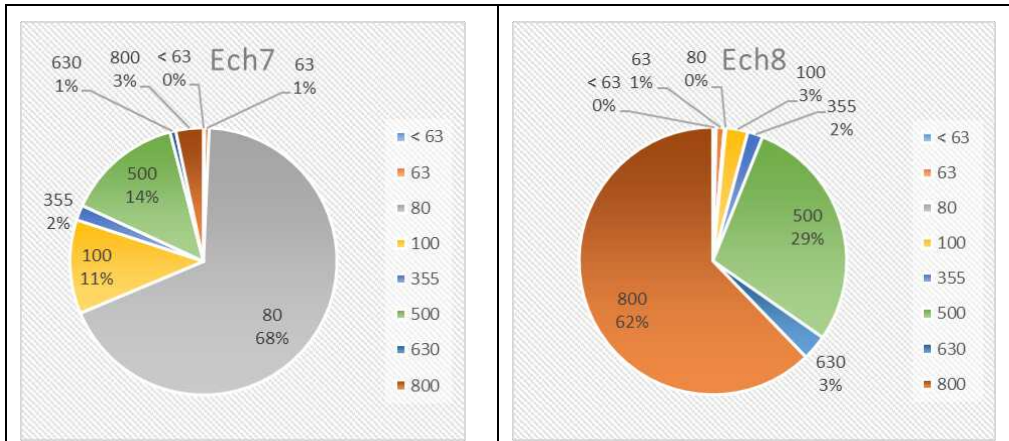
Les différents échantillons de sédiments ont été caractérisés, au laboratoire ISEA à l'UNC, selon le protocole suivant :

- **Tamissage de l'échantillon** : l'objectif est de séparer les différentes fractions des échantillons pour avoir accès aux fractions fines (inférieures à 63 µm ou 80 µm). La séparation de ces fractions fines a été réalisée en phase humide.
- **Détermination de la taille des agrégats par granulométrie laser**. Le protocole de mesure comporte une phase d'ultra-sons de 2 mn pour chaque échantillon. L'appareil utilisé est un mastersizer de la marque Malvern.
- **Analyse des proportions de phases minérales par diffraction de rayons X**. une fois séchées, une partie des fractions fines (inférieures à 63 µm ou 80 µm) des échantillons est séchée et broyée finement. La poudre est ensuite analysée par un diffractomètre de rayon X AERIS de Malvern-panalytical fonctionnant avec une source de rayon X au Cobalt. Les recherches des phases minérales ont été mises en œuvre avec les programmes Match !3 et Qualx et les quantifications de leurs proportions par affinement Rietveld à l'aide du programme MAUD.
- **Caractérisation des particules minérales par Microscopie électronique à transmission**. Les dispersions de MES des fractions fines (inférieures à 63 µm ou 80 µm) ont été diluées de façon à obtenir une dispersion translucide puis passées au bain à ultrason pendant 10 minutes. Enfin une goutte de dispersion est déposée sur une grille de cuivre recouverte d'un film de carbone. La grille est ensuite laissée sous une hotte aspirante pour son séchage pendant une nuit. L'analyse est réalisée à l'aide d'un microscope JEM 1400 de la marque JEOL et un analyseur EDX Oxford. La tension d'accélération des électrons utilisée était de 120 KV.

### 4.2. TAMISAGE ET GRANULOMÉTRIE LASER

Les figures ci-dessous présentent les refus des échantillons 2,4, 7 et 8 de Tiebaghi (Figure 8). Les données de ces granulométries, nous permettent de connaître la fraction des particules inférieures à 80 ou 63 µm. Les données des granulométries montrent que les quantités de fractions inférieures à 80 µm sont variables d'un échantillon à l'autre. Pour rappel, ce paramètre est étroitement lié aux événements qui ont eu lieu auparavant dans le bassin (pluie, curage récente etc..).



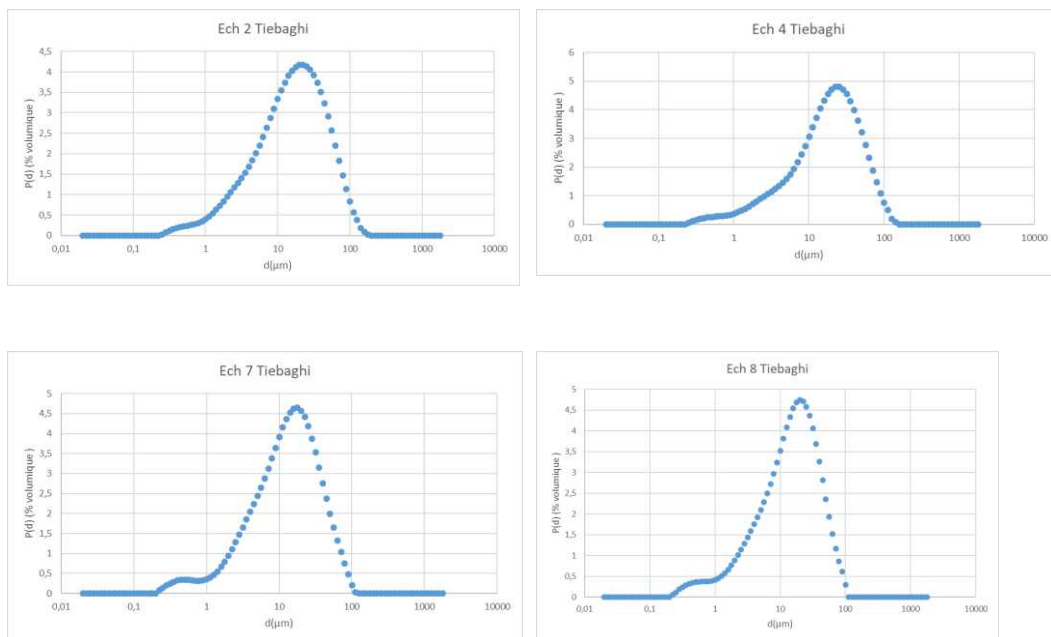


**Figure 8 : refus en % massique pour les échantillons 2, 4, 7 et 8 de Tiebaghi (maille en  $\mu\text{m}$ )**

La fraction  $< 63\mu\text{m}$  a ensuite été analysé par granulométrie laser ; les distributions des échantillons 2, 4, 7 et 8 sont représentées sur la Figure 9 : distribution en taille des échantillons 2,4, 7 et 8 de Tiebaghi. Ces données sont accompagnées des diamètres  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  et  $d_{90}$ , diamètres pour lesquels correspondent respectivement 10, 50 et 90 %(mass) de l'échantillon. Ces données nous montrent que les fractions des particules fines inférieures à  $80 \mu\text{m}$  sont similaires pour les échantillons 2, 4 et 7 et 8 avec des valeurs de  $d_{50}$  comprise entre 14 et  $20 \mu\text{m}$ .

Échantillons	$d_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )
Ech 4	3,5	19,8	58,6
Ech 7	2,8	14,2	44,4
Ech 8	2,8	16,0	47,7

**Tableau 5 :  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  et  $d_{90}$  pour les échantillons 2, 4 7 et 8 de Tiebaghi**

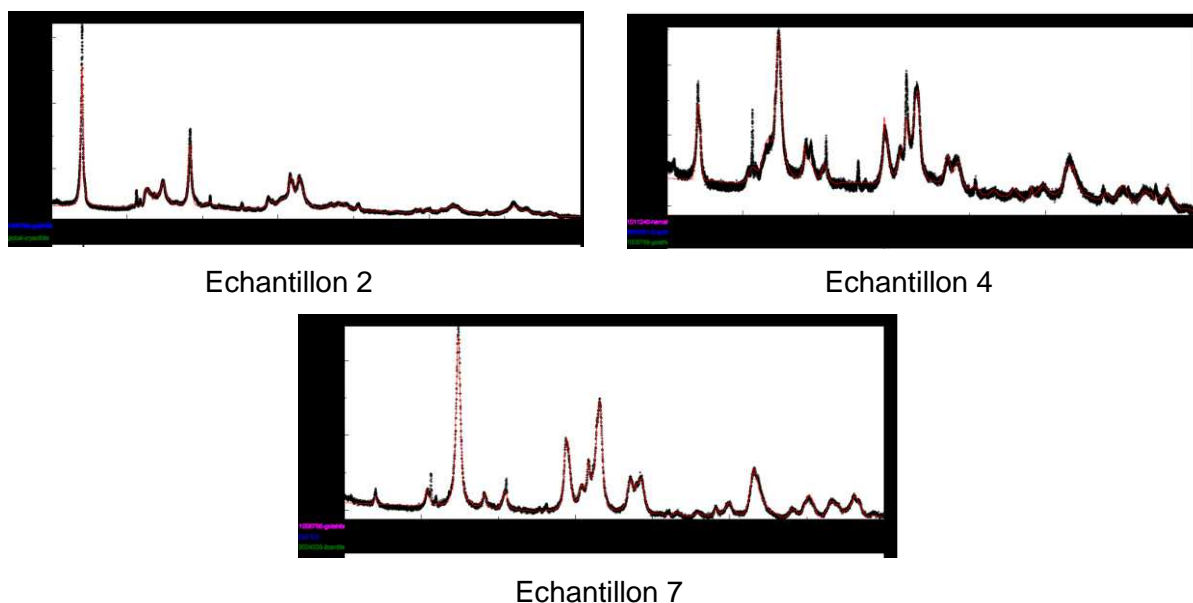


**Figure 9 : distribution en taille des échantillons 2,4, 7 et 8 de Tiebaghi**

### 4.3. DIFFRACTION DE RAYON X

Les ajustements des diffractogrammes des échantillons 2, 4 et 7 sont représentés sur la Figure 10 : diffractogramme des échantillons 2, 4 et 7 traité par affinement Rietveld. Ces ajustements ont permis de vérifier la présence des phases minérales présentes dans l'échantillon et de quantifier leurs proportions. Le Tableau 6 : % massique des phases minérales déterminées pas diffraction de rayon X, présente les proportions des différentes phases minérales présentes au sein des échantillons. Comme cela est déjà connu, les différents échantillons prélevés sur mines sont principalement constitués d'oxyde de fer (Goethite, magnétite ou hématite) et de phases de type phyllosilicates telles que les serpentines (chrysotile, lizardite).

Les compositions des échantillons sont variables. Par exemple, le % massique de goethite peut varier de 35 % pour l'échantillon 2 à 83 % pour l'échantillon 7.



Sur chaque graphique est représenté l'intensité en unité arbitraire en fonction de l'angle de diffraction  $2\theta/\text{Co}$ .

**Figure 10 : diffractogramme des échantillons 2, 4 et 7 traité par affinement Rietveld.**

Phases minérales	Ech 2 (% massique)	Ech 4(% massique)	Ech 7 (% massique)
Goethite	35,2	63,2	82,9
Magnétite	-	4,0	14,3
Lizardite	-	32,8	2,8
Chrysotile	64,8	-	-

**Tableau 6 : % massique des phases minérales déterminées pas diffraction de rayon X.**

## 5. ESSAIS DE FLOCCULATION

Des essais de floculation ont été réalisés sur les effluents miniers issus du site de Tiebaghi. Les objectifs de ces essais étaient :

- d'évaluer la faisabilité de clarifier des effluents miniers à l'aide de floculants biosourcés ;
- de fournir des informations quantitatives sur :
  - les doses de biofloculants nécessaires ;
  - les vitesses de décantation résultantes ;
  - le gain en turbidité résiduelle.

Ainsi cette section présente le matériel utilisé ainsi que la façon de traiter les résultats (§ 5.1) et les résultats obtenus sur les effluents miniers (§ 5.2). Les données ainsi générées servent de base aux premiers éléments de dimensionnement (§ 6).

### 5.1. MATERIEL ET METHODE

#### 5.1.1. FLOCCULANTS TESTÉS

L'efficacité à clarifier des effluents miniers de 4 polymères a évaluée :

- (i) Un produit floculant d'origine biologique développé par TBI de l'INSA Toulouse.

Ce biofloculant est fabriqué à partir de résidus du traitement des eaux par des microorganismes sélectionnés naturellement dans des eaux usées et de manière continue : la matière cellulosique a été récupérée des eaux résiduaires urbaines (ERUs) à l'aide d'un tamis et hydrolysée à 50°C après concentration. L'hydrolysate a ensuite été utilisé après une filtration grossière pour alimenter un réacteur continu,ensemencé avec une boue activée de la station d'épuration de Toulouse (France), fonctionnant à température ambiante et un pH régulé à 7 pour produire des polymères microbiens.

Ce mode de production fait l'objet d'un brevet "Procédé de production d'une biomasse cellulaire microbienne ayant des propriétés de floculant" [WO2020183103](#) déposé en France ([FR3093732](#)), Europe ([EP3938488](#)) et Etats-Unis ([US20220242759](#)).

- (ii) Des polymères d'origine naturelle commercialisés

Deux produits commerciaux ont été évalués sur kaolinite: l'un à base de tanin et l'autre à base d'amidon.

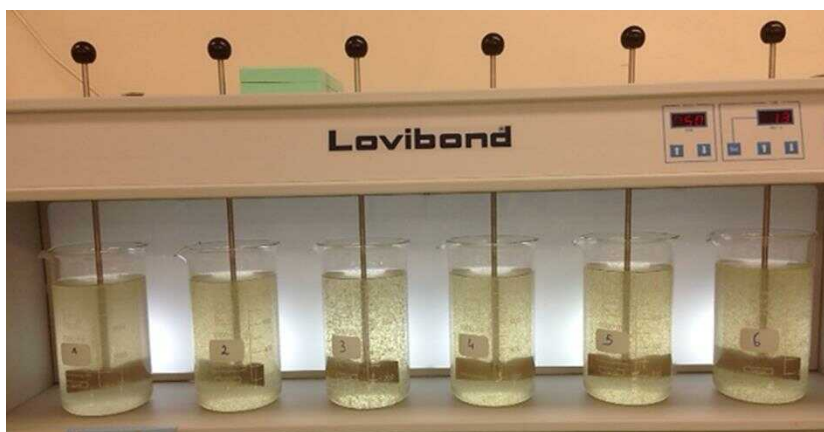
- (iii) Un polymère synthétique

Un polymère de type polyacrylamide anionique (AN910) a été utilisé pour comparer les résultats des biopolymères aux polymères plus conventionnels (Figure 12).

#### 5.1.2. ESSAIS DE FLOCCULATION EN JAR-TESTS

Les essais de floculation sont réalisés en jar-tests (Lavibond® - Amesbury, United Kingdom, modèle Flocc-Tester, SN: 1013/61444) en conditions identiques pour chaque combinaison de coagulant / floculant. Une photographie du système appelé « jar-test » est présentée sur la Figure 11.

.



**Figure 11 : photographie de l'appareillage « jar-test » utilisé pour effectuer les tests de floculation.**

Le coagulant utilisé est le chlorure ferrique. Pour chaque test, 6 béciers rempli avec 900 mL d'effluents à traiter (Kaolinite ou effluent minier) sont utilisés. Les trois premiers béciers sont utilisés comme référence (n°1: contrôle, n°2:  $\text{FeCl}_3$  20 mg/L seul, n°3  $\text{FeCl}_3$  20 mg/L + polyacrylamide AN910 (nommé PAM) 0.2 mg/L). Les trois béciers restants sont utilisés pour l'évaluation du biopolymère à 3 concentrations différentes (n°4, n°5, n°6 avec  $\text{FeCl}_3$  20 mg/L + biopolymère). Des concentrations entre 0,5 et 3 mg/L sont mises en œuvre dans les trois béciers de test.

Le protocole est le suivant :

- Sortir les effluents de la chambre froide au moins 6h avant l'essai (température).
- Agitation et prélèvement initial : mesure de la turbidité (HACH 2100N) → **Turb<sub>0</sub>**.
- Ajout coagulant ( $\text{FeCl}_3$  – 20 mg/L) dans tous les béciers sauf le contrôle.
- Agitation rapide 3 min – 150 RPM.
- Ajout Floculant en veillant à respecter l'ordre et en espaçant les ajouts d'une minute : PAM 0,2 mg/L - Biopolymère 0,5-1,0-3,0 ml/L dans les béciers 4 à 6.
- Agitation lente 15 minutes - 50 RPM.
- Décantation 1 minute et prélèvement à 2,2 cm, (la seringue est préalablement marquée pour respecter cette distance) - Mesure de la turbidité → **Turb<sub>x</sub>**.

Les capacités de floculation sont également testées sur un modèle minéral (la kaolinite) préparé au laboratoire pour obtenir une turbidité initiale autour de 500 NTU.

Le protocole des essais est le même que sur ERU excepté le dosage du coagulant ( $\text{FeCl}_3$ ), dont la concentration optimale est diminuée à 2 mg/L.

Les résultats sont analysés au vu des rendements d'épuration (en %) calculés comme suit :

$$\text{Rendement d'épuration}(\%r_x) = \frac{\text{Turb}_0 - \text{Turb}_x}{\text{Turb}_0} \cdot 100$$

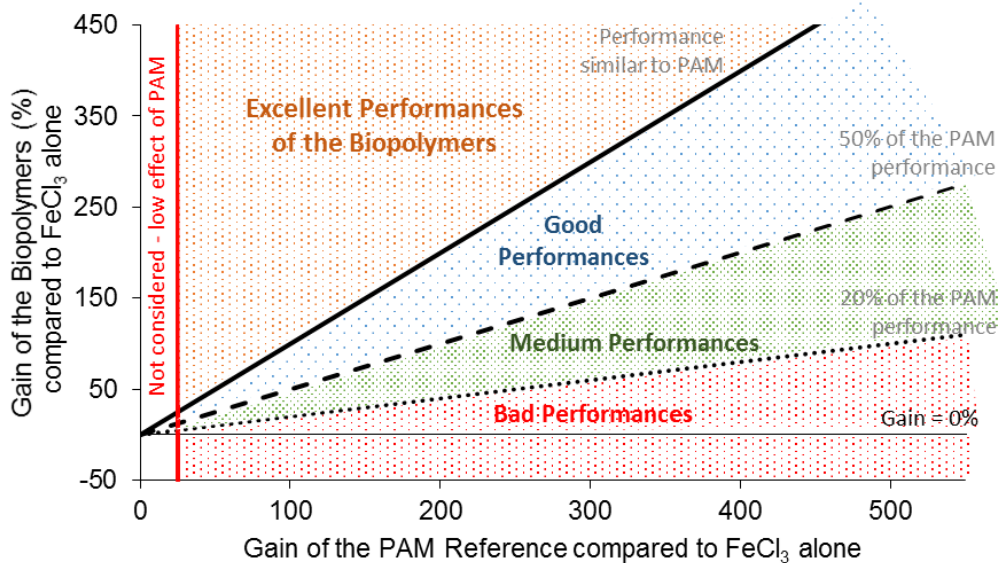
Les rendements d'épuration obtenus sont toujours rapportés à la référence qui contient seulement le chlorure ferrique. Lorsque le rendement d'épuration obtenu avec le polymère est supérieur à celui obtenu avec le chlorure ferrique seul, un gain positif est calculé comme suit :

$$\text{GainPolymère (vs } \text{FeCl}_3) = \frac{\%r_x - \%r_{\text{FeCl}_3}}{\%r_{\text{FeCl}_3}} \cdot 100$$

Finalement les performances obtenues sont systématiquement comparées à celles obtenues avec le PAM. Cette modalité d'analyse de résultat permet de comparer plusieurs polymères en relativisant leur performance vis-à-vis de celle du PAM obtenue sur le même effluent.

La méthode de représentation est donnée dans la Figure 12.

Quatre niveaux de performance sont définis : mauvais (inférieur à 20% du gain du PAM), moyen (entre 20% et 50% du PAM), bon (entre 50% et 100% du PAM) et excellent (supérieur au gain du PAM).



Sur l'axe des abscisses est reporté le gain du polymère commercial (PAM) par rapport au FeCl<sub>3</sub> seul (en pourcentage), et sur l'axe des ordonnées est reporté le gain (%) du biopolymère testé par rapport au FeCl<sub>3</sub> seul.

**Figure 12 : méthode de représentation choisie pour l'analyse des performances des polymères produits en tant que flocculant.**

### 5.1.3. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DES VITESSES DE DECANTATION

Pour étudier les propriétés de décantation des effluents miniers, des analyses au Turbiscan Lab (Formulation) ont été effectuées.

Le Turbiscan est un appareil d'analyse de la stabilité des suspensions colloïdales basé sur la mesure de la transmission et de la rétrodiffusion d'un rayon lumineux infrarouge (880 nm). La mesure est possible grâce à une cellule de détection qui intercepte les deux types de signaux qui sont émis à des intervalles de temps définis, et qui sont ensuite traduits et enregistrés sous forme de données numériques.

Pour les suspensions caractérisées dans cette étude, l'acquisition des données a été effectuée à 25°C.

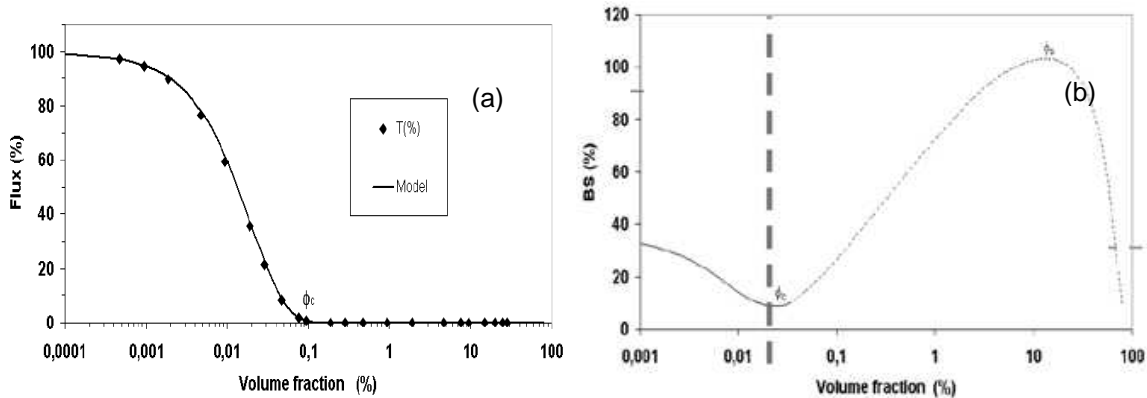
Les évolutions théoriques du signal de transmission (T) et de rétrodiffusion (BS) sont décrites par les équations 1 et 2 respectivement et représentée sur la Figure 13.

$$T = T_0 e^{\frac{-3r_i\phi Q_s}{d}} \quad (1)$$

$$BS = \frac{1}{\sqrt{\frac{2d}{3\phi(1-g)Q_s}}} \quad (2)$$

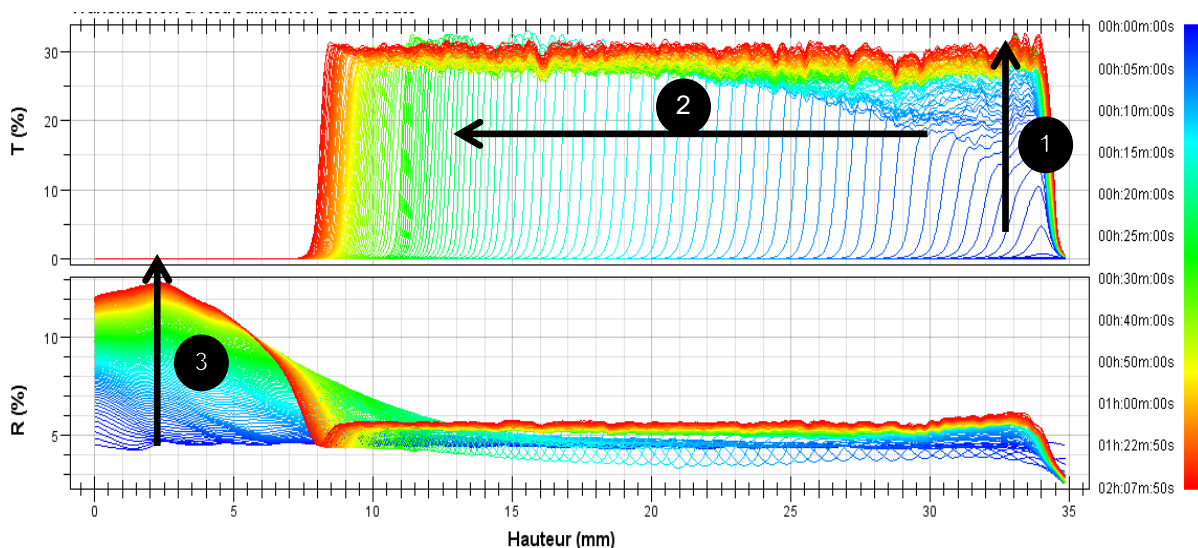
Avec :

T<sub>0</sub> : Signal de transmission de la phase continue (%) ; r<sub>i</sub> : Rayon interne de la cellule de mesure (m) ; φ : Fraction volumique ; Q<sub>s</sub> : Paramètre optique donné par la théorie de Mie et qui dépend de la longueur d'onde du rayon lumineux, du diamètre des particules, et des indices de réfraction des phases continue et dispersée ; d : Diamètre moyen des particules solides dispersées (m).



**Figure 13 : évolution théorique, pour un diamètre de particules constant, du signal de transmission (a) et de rétrodiffusion (b) en fonction de la fraction volumique.**

A titre d'exemple, les données brutes acquises lors d'une analyse de boue sont présentées sur la Figure 14.



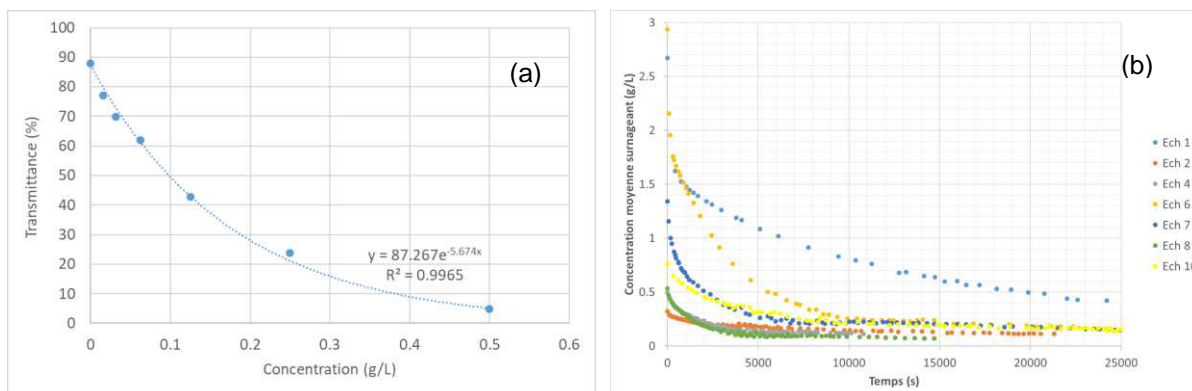
**Figure 14 : exemple de signaux de transmission et de rétrodiffusion ( $H=0$ , en pied de cellule).**

Les courbes obtenues décrivent une évolution indicative d'un phénomène de sédimentation :

- ❶ le signal de transmission s'intensifie dans la partie haute de la cellule ce qui indique une clarification de la phase liquide dans cette zone, et donc une diminution de sa concentration en particules solides (cf Figure 13a).
- ❷ Les pics de transmission s'élargissent avec le temps ce qui indique que le volume de cette phase clarifiée augmente avec le temps.
- ❸ Dans la partie basse de la cellule, le signal de transmission s'annule (fraction volumique supérieure à la fraction critique) alors que le signal de rétrodiffusion augmente. Ceci révèle l'accumulation de particules solides décantées dans le fond du tube, et donc la formation d'un lit concentré de boue (on se trouve alors sur la partie droite de la Figure 13b).

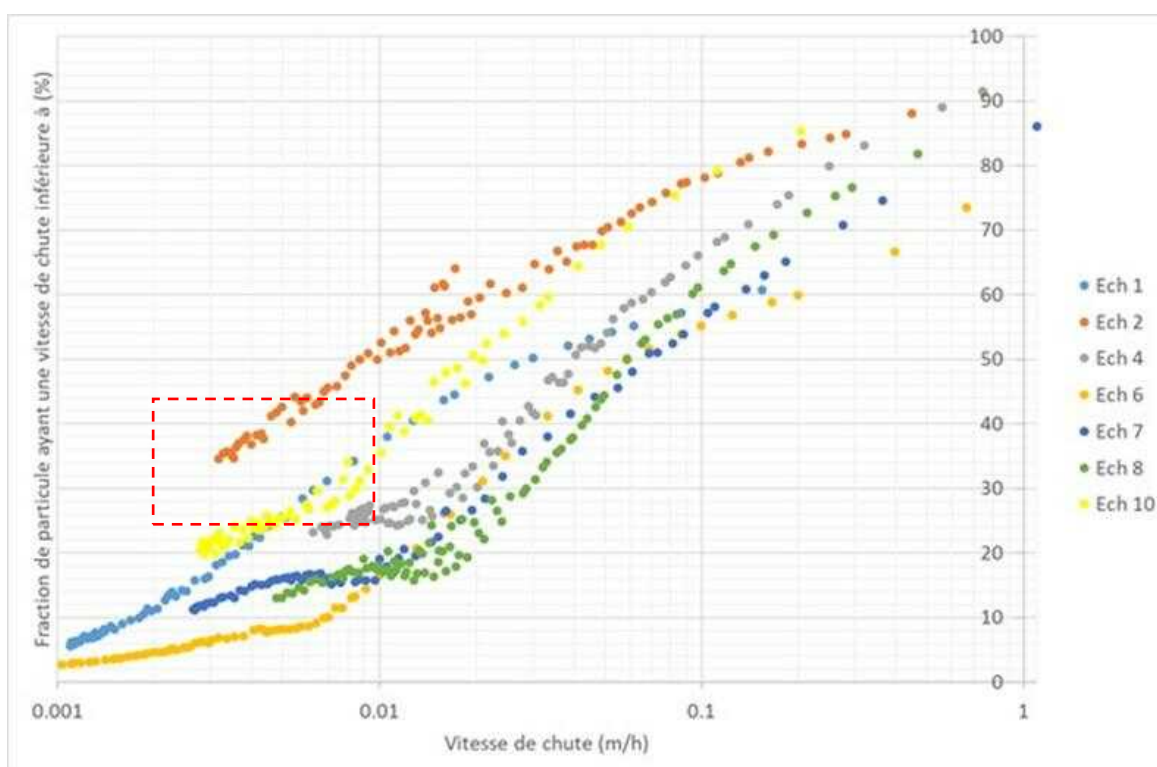
Par ailleurs, il est possible de remarquer que les courbes de rétrodiffusion passent par un minimum local qui se déplace vers la gauche. Ce minimum correspond à la hauteur du front de sédimentation qui diminue avec le temps.

L'étalonnage du signal de transmittance en fonction de la concentration a d'abord été établi (Figure 15a) puis le signal a été intégré sur la partie supérieure du tube de façon à évaluer la concentration moyenne subsistant dans le surnageant au cours du temps ((Figure 15b).



**Figure 15 : courbe d'étalonnage du signal de transmittance en fonction de la concentration (a) ; évolution temporelle de la concentration moyenne du surnageant au cours du temps (b).**

Enfin ces données ont été utilisées pour évaluer la distribution des vitesses de chute des particules (Figure 16).



**Figure 16 : distribution des vitesses de chute des particules. Site Tiebaghi**

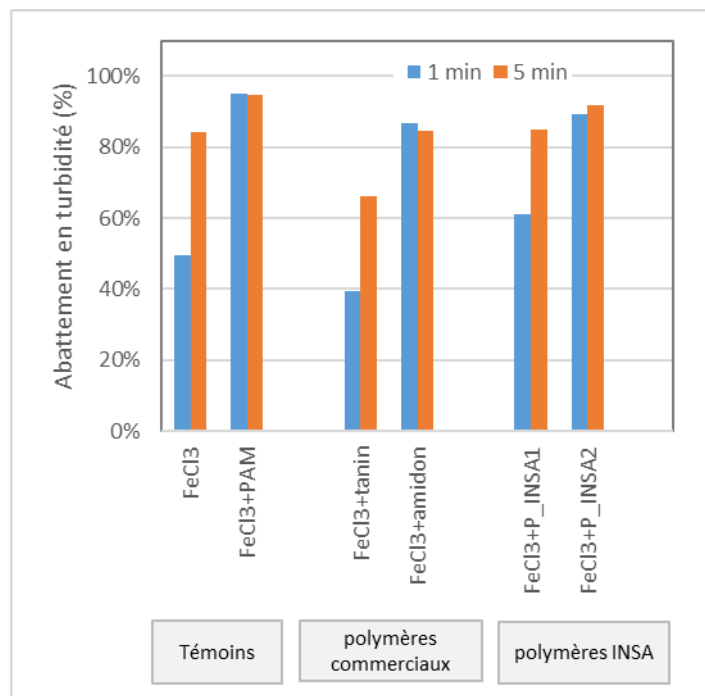
La caractérisation des échantillons prélevés sur le site de Tiebaghi met en évidence certaines informations importantes en vue de la mise en place d'un système de captation :

- Les vitesses de décantation sont faibles, avec de 75 à 95% massique des particules qui ont une vitesse de chute inférieure à 1 m/h et ne seraient donc pas retenues dans un décanteur primaire généralement dimensionné sur la base de 1,4 m/h.
- Une fraction significative (de l'ordre de 20% massique) des échantillons 4/7/8/10 possède une vitesse de décantation extrêmement faible, inférieure à 0,01m/h (cf encadré rouge Figure 16)

## 5.2. RÉSULTATS

### 5.2.1. KAOLINITE

Une première évaluation de l'efficacité des polymères a été réalisée sur des suspensions de Kaolinite de turbidité initiale égale à 500 NTU. La Figure 17 présente les résultats obtenus en termes d'abattement de la turbidité par rapport au témoin sans aucun ajout.



**Figure 17 : abattement en turbidité de suspension de kaolinite après 1 et 5 minutes (soit 1.34 m/h et 0,26 m/h respectivement).**

Ces résultats mettent en évidence plusieurs éléments intéressants :

- Le PAM présente les meilleurs résultats avec un abattement de la turbidité de 95% quel que soit le temps de décantation.
- Parmi les floculants biosourcés évalués, le tannin n'a pas permis de plus-value par rapport à l'utilisation de chlorure ferrique seul.
- Parmi les floculants biosourcés produits à l'INSA, le P\_INSA2 permet à la fois d'améliorer l'efficacité de capture par rapport à l'utilisation de FeCl<sub>3</sub> seul, mais aussi d'avoir une efficacité importante dès les temps de décantation courts (89% après 1 minute).

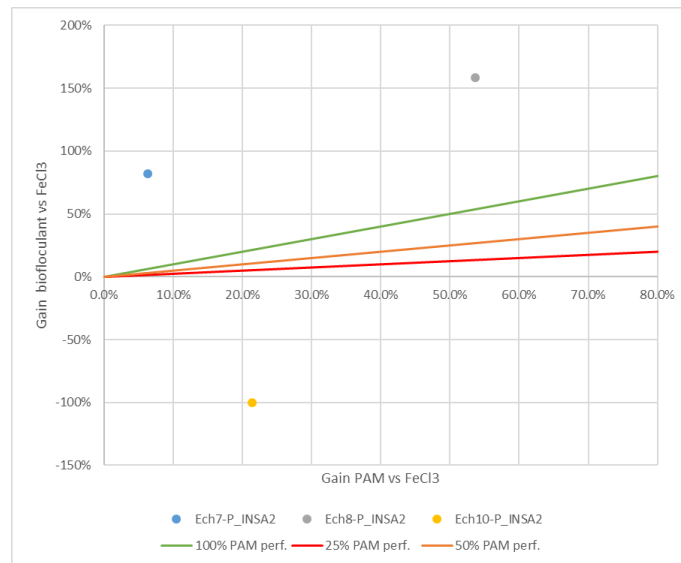
Ainsi, pour les évaluations sur les effluents miniers issus de Nouvelle Calédonie, les performances du biopolymère P\_INSA2 sont mises en regard de celles du PAM.

## 5.2.2. SITE DE TIEBAGHI

### Des performances contrastées selon les prélèvements

Les performances de biopolymères pour abattre la turbidité d'effluents miniers ont été évaluées sur les échantillons 7, 8 et 10, prélèvements pour lesquels les quantités disponibles étaient suffisantes pour la réalisation des tests. Pour rappel l'échantillon 7 provient de la station située dans la zone Nord et les échantillons 8 et 10 proviennent de bassins de collecte proches de l'usine de lavage des minerais. Ces échantillons présentent un intérêt tout particulier puisqu'ils contiennent une fraction significative de matière avec des vitesses de décantation extrêmement faibles (< 0,01 m/h ; cf. Figure 16).

La Figure 18 présente donc les résultats obtenus à partir du biopolymère produit à l'INSA, P\_INSA2, en comparaison avec les performances du PAM.

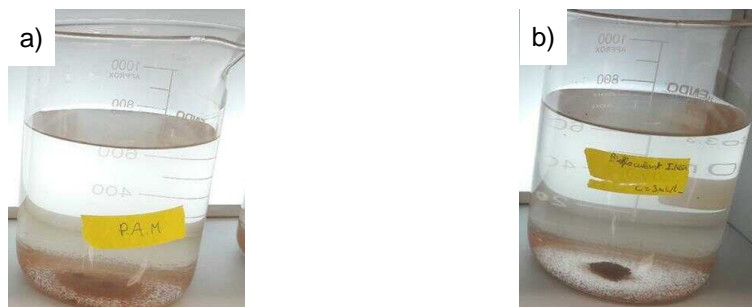


Les points correspondent aux résultats après une minute de décantation.

**Figure 18 : efficacité de biopolymères en présence de chlorure ferrique (20mg/L) par rapport au PAM (0,2 mg/L).**

Les résultats obtenus sont contrastés puisque sur l'échantillon 10 les performances en termes d'abattement de la turbidité après 1 minute de décantation n'ont pas mis en évidence de capture, et une dégradation de la décantation a même été observée par rapport à l'utilisation du coagulant seul (ordonnée négative Figure 18).

À l'opposé, l'utilisation du même biopolymère sur les échantillons 7 et 8 ont permis d'obtenir des performances supérieures à celle obtenues avec le PAM sur ces échantillons (point au-dessus de la ligne verte, Figure 18+ observation qualitative Figure 19).



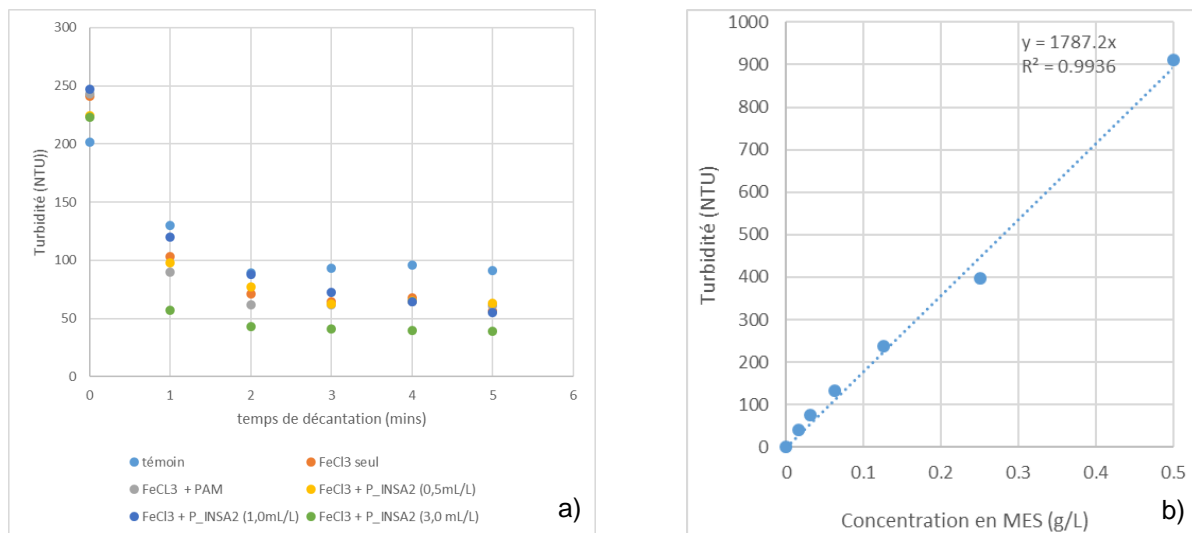
**Figure 19 : observation après décantation de l'échantillon 8 pour a) le PAM ; b) IP\_INSA2**

### A retenir :

La faisabilité de traiter des effluents miniers à l'aide d'un biopolymère d'origine microbienne a été démontrée.

#### Un taux de capture significatif

De façon à évaluer la plus-value de l'utilisation d'une étape de coagulation-floculation en termes de taux de capture de matière, des cinétiques de décantation ont été suivies sur l'échantillon 8 après application de diverses doses en biopolymère (Figure 20a). Par ailleurs la corrélation entre turbidité et concentration a été établie (Figure 20b) de façon à accéder à des taux de capture massique.



**Figure 20 : cinétique de décantation échantillon 8 (a) ; courbe d'étalonnage turbidité – MES (b).**

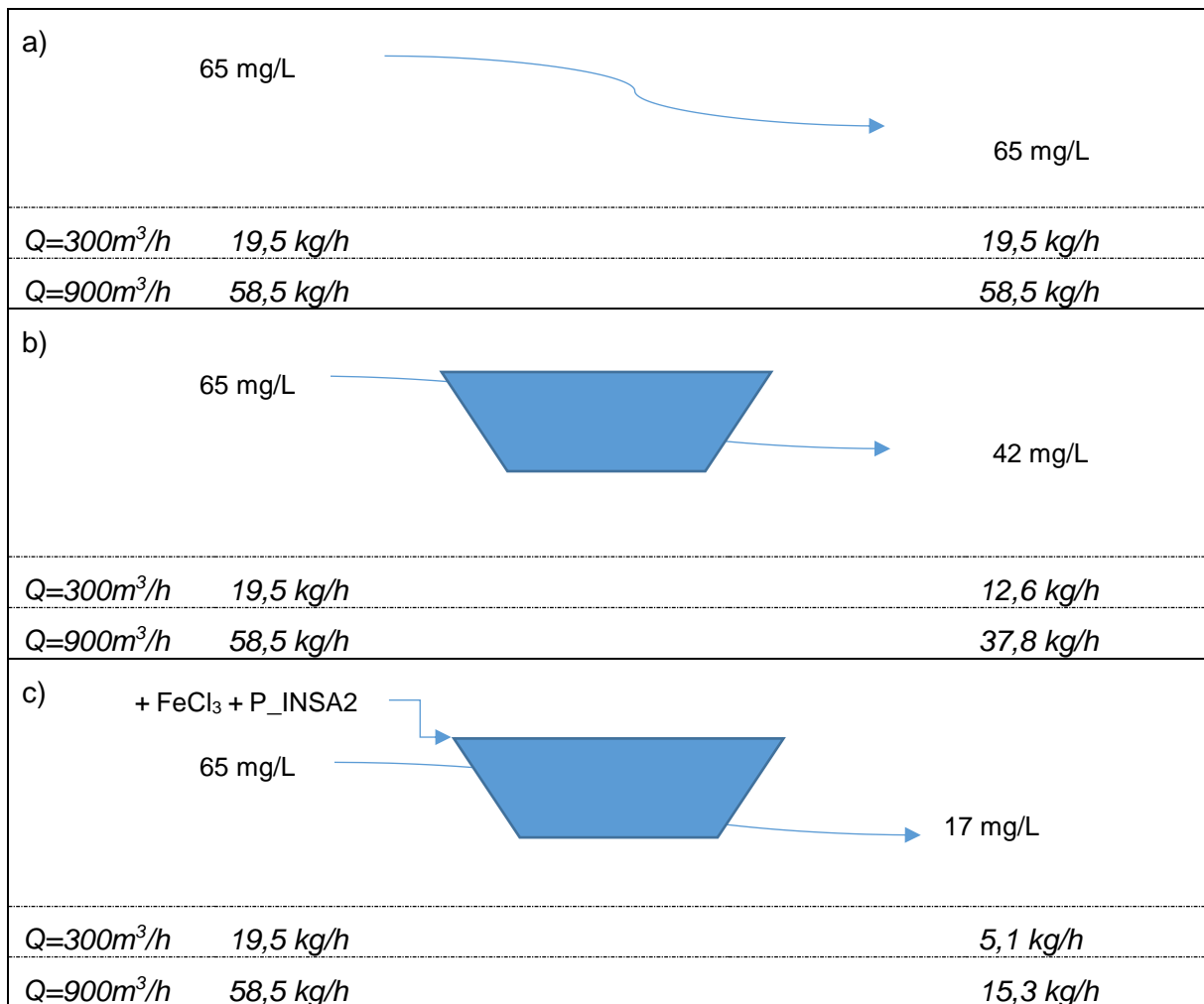
Divers enseignements peuvent être tirés de ces résultats :

Les résultats intéressants obtenus avec le polymère P\_INSA2 après 1 minute de décantation se confirment pour des durées plus importantes. Le taux de capture, exprimé par rapport à l'échantillon qui décanterait sans ajout de produits (i.e. situation actuelle) est similaire pour les diverses durées (et donc vitesses) de décantation et de l'ordre de 56% +/- 2% (massique) pour des vitesses comprises entre 0,26 m/h (5 minutes) et 1,32 m/h (1 minute).

Un pallier est atteint très rapidement (à partir de 2 minutes soit 0,66 m/h) indiquant que certaines fractions ne seront pas retenues même dans de grands bassins. Cela correspond à 19% de la matière totale et à 44% des matières qui ne seraient pas retenues dans un bassin purement physique.

### 5.3. CONCLUSION

- Le potentiel des biopolymères bactériens produits selon le brevet [FR3093732](#) a été mis en évidence, avec des performances supérieures au polyacrylamide sur certains échantillons.
- 81% de la matière devrait être retenue dans des bassins dimensionnés sur la base de vitesse de décantation de 0,66 m/h. Ce taux de capture descend à 74% si seules les particules décantant à une vitesse supérieure à 1,32 m/h sont retenues (cf. illustration Figure 21).
- Cela pourrait représenter une amélioration de l'ordre de 56% par rapport à des bassins sans étape de coagulation/floculation.

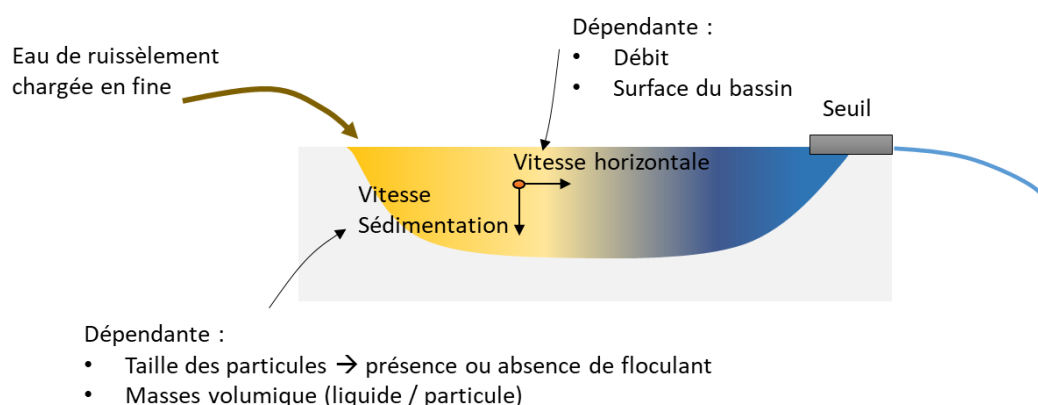


**Figure 21 : exemple de concentration et flux de matière correspondants - sans bassin (a) ; avec décantation physique (b) ; avec décantation physico-chimique (c) – basé sur les résultats obtenus avec l'échantillon 8 et pour une vitesse de décantation de 1,34 m/h.**

## 6. PRÉ-DIMENSIONNEMENT

### 6.1. PRINCIPE

Le dimensionnement des ouvrages de séparation d'eau chargée en MES se base sur la relation entre les vitesses horizontales et verticales des particules et la géométrie des bassins (Figure 22). Les essais en laboratoire (jar tests) apportent les informations sur le taux de capture et la vitesse de sédimentation obtenue sans flocculant et avec flocculant.



**Figure 22 : principe de la décantation**

Pour réaliser les calculs il est nécessaire de faire quelques hypothèses :

- la vitesse du fluide est constante dans le bassin et unidirectionnelle ;
- une particule déposée n'est pas remise en circulation ;
- la vitesse de chute est constante et prise égale à la vitesse de sédimentation obtenue en eau stagnante (essais en laboratoire).

### 6.2. DONNÉES DE TERRAIN

Les données terrain ne sont pas suffisamment exhaustives pour faire un pré-dimensionnement spécifique du site de Tiebaghi. Pour pouvoir fournir des ordres de grandeur, il a été nécessaire d'extrapoler. Le site de la zone nord a servi d'exemple pour ce pré-dimensionnement. Sur ce site, 3 bassins sont en cascade et le bassin versant représente environ 0.7 km<sup>2</sup>.



**Figure 23 : photo aérienne de la zone Nord (Google earth®).**

Les surfaces des bassins ont été mesurées à partir des photos aériennes, la profondeur a été évaluée lors de la visite, elle est proche de 2 m. Les bassins ne sont pas rectangulaires, il est donc normal que la surface ne correspondent pas à la largeur x longueur.

- bassin1 BS532 2760 m<sup>2</sup> (longueur 86m, largeur 36m, profondeur 2 m) ;
- bassin2 BS533 1700 m<sup>2</sup> (longueur 66m, largeur 28m, profondeur 2 m) ;
- bassin3 BS534 1200 m<sup>2</sup> (longueur 53m, largeur 34m, profondeur 2 m).

Le taux de MES et les débits ont été extrapolés à partir de ceux obtenus lors d'un fort évènement pluvieux, celui du 2 février 2020. Les données de MES proviennent des mesures faites sur les échantillons prélevés par le préleveur automatique : valeur minimale : 150 mg/L, valeur maximale = 300 mg/L.

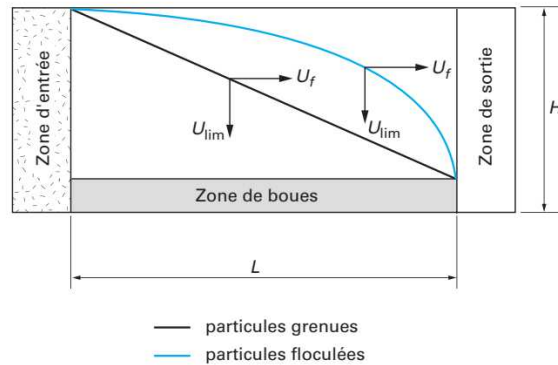
Les débits ont été calculés à partir :

- des précipitations de cet épisode (31 mm sur 24h - 2 février 2020) ;
- la surface du bassin versant 0.7 km<sup>2</sup> ;
- un coefficient de ruissellement de terre découverte (coef =1).

Le calcul permet d'obtenir un débit de 900 m<sup>3</sup>/h. Ce débit est considéré comme un débit maximal.

### 6.3. CALCULS

Les évaluations suivantes ont été réalisées en considérant la clarification des effluents miniers dans un décanteur à flux horizontal constitué d'une cuve parallélépipédique (Figure 24).



**Figure 24 : représentation schématique d'un décanteur à flux horizontal (Blazy et Al. 1999)<sup>1</sup>**

La vitesse horizontale de transfert de fluide  $U_f$  dépend du débit de fluide ( $Q$ ) ainsi que des caractéristiques géométriques du décanteur (hauteur  $H$ , largeur  $l$ ):  $U_f = \frac{Q}{H \cdot l}$ .

Lors de la décantation les particules atteignent une vitesse limite de chute,  $U_{lim}$ , donnée par la loi de Stokes et une particule sera retenue par l'ouvrage de longueur  $L$  si  $\frac{U_{lim}}{H} > \frac{U_f}{L}$ .

Ainsi une particule sera retenue si sa vitesse limite est supérieure à la vitesse de Hazen :  $U_{lim} > \frac{Q}{L \cdot l}$ . Ce seuil de coupure apparaît donc comme indépendant de la profondeur du bassin. Cela implique comme précisé § 6.1 que les particules déposées ne sont pas remises en suspension et donc qu'une gestion des sédiments adéquate est opérée.

Sur la base des résultats obtenus en laboratoire (§5) et des éléments théoriques ci-avant, deux types d'estimations ont été réalisées :

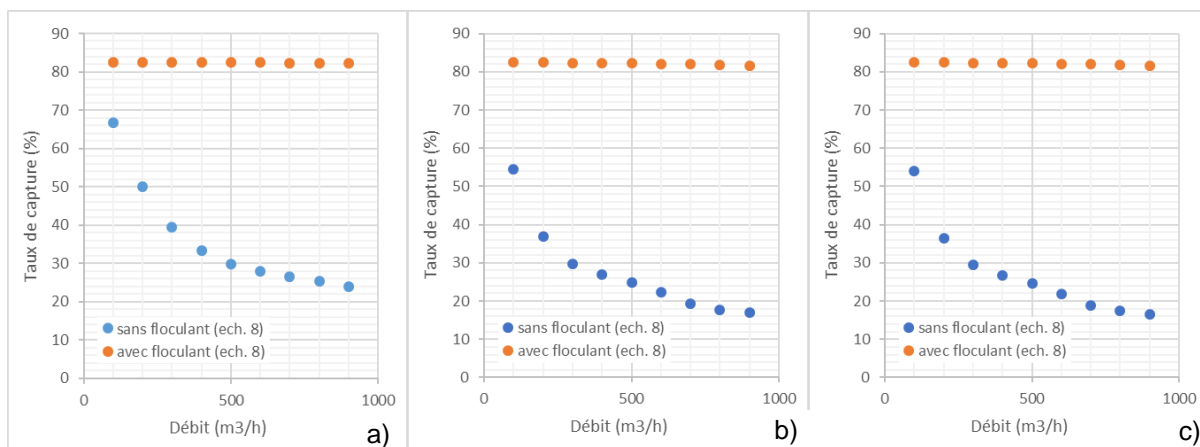
#### *Estimation du taux de capture sur les bassins existants en fonction du débit*

La Figure 25 présente les estimations de taux de capture susceptibles d'être obtenus, sous réserve des hypothèses émises §6.1, pour divers débits allant jusqu'au débit maximal observé lors d'un épisode pluvieux (900 m<sup>3</sup>/h) et ce pour des géométries (et donc surface de décantation) correspondant aux trois bassins de la zone nord. Pour effectuer les calculs, nous avons considéré que les bassins étaient rectangulaires, les surfaces recalculées sont : bassin1 BS532 3096 m<sup>2</sup>, bassin2 BS533 1848 m<sup>2</sup> et bassin3 BS534 1802. La surface totale de ces 3 bassins en série est : 6746 m<sup>2</sup>.

Le calcul simule 3 scénarios d'injection du biofloculant :

- Injection dans le bassin1 – aucune injection dans les 2 autres bassins ;
- Injection dans le bassin2 – aucune injection dans les 2 autres bassins ;
- Injection dans le bassin3 – aucune injection dans les 2 autres bassins ;

<sup>1</sup> Blazy P., Jdid E.A., Bersillon J-L. "decantation – aspects théoriques" – Techniques de l'ingénieur J3450 (1999)



**Figure 25 : estimation des taux de capture sur la zone nord - bassin1 BS532 (a) - bassin2 BS533 (b) - bassin3 BS534 (c)**

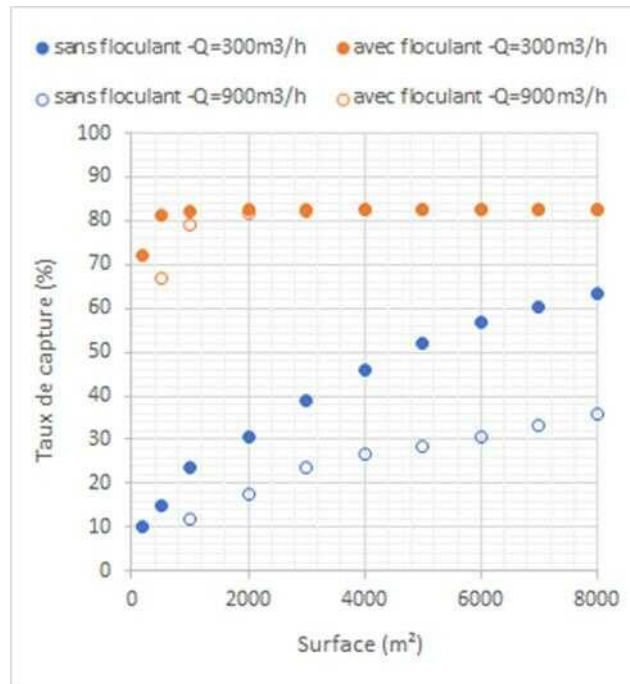
Deux observations principales peuvent être tirées de ces graphiques, :

- La gamme de débits étudiée (100 à 900 m<sup>3</sup>/h) conduit à des vitesses horizontales de transfert de fluide (0,05 à 0,5 m/h) pour lesquelles la rétention avec ajout de coagulation/floculation avec le biopolymère P\_INSA2 n'est pas impactée : 19% de la matière entrante ne sera pas retenue dans ces conditions et ne le serait que peu ou pas pour des bassins plus grands du fait de la grande stabilité de la matière qui compose cette fraction.
- Hormis pour des débits très faibles, la différence est significative entre les estimations avec et sans floculant. Pour illustrer, en considérant la géométrie du bassin 1 :
  - Pour le débit moyen de 300m<sup>3</sup>/h, l'ajout de coagulant/floculant permet de passer de 40% à 81% de rétention de la matière.
  - La différence est plus significative encore pour le débit maximum de 900m<sup>3</sup>/h où l'ajout de biopolymère permet de passer de 24% à 81% de rétention.

Les différences sont plus importantes encore sur les bassins 2 et 3 dont les surfaces horizontales sont moindres, et par conséquent les vitesses de fluide plus élevées.

#### *Estimation du taux de capture en fonction de la dimension des bassins*

En prévision d'une évolution des sites (ou pour de futurs sites), la Figure 26 présente les taux de capture atteignables (toujours sous réserve des hypothèses pré-citées) pour différentes surfaces de bassin, avec/sans l'utilisation d'étape de coagulation/floculation, et ce pour le débit moyen (300m<sup>3</sup>/h) et de pointe (900m<sup>3</sup>/h).



**Figure 26 : estimation des taux de capture selon la surface de décantation disponible avec/sans floculant et pour débit moyen (300m³/h) et débit de pointe (900m³/h)**

Là encore deux éléments principaux sont à retenir de ces résultats :

- Concernant la décantation purement physique, le taux de capture évolue quasiment linéairement avec la surface et cela devrait être le cas jusqu'à des vitesses de 0,02 m/h (cf. Figure 16) soit des surfaces de 15000 m² et 45000 m² pour des débits de 300 m³/h et 900 m³/h respectivement pour un taux de capture de l'ordre de 80%
- L'ajout de coagulant/floculant devrait permettre de réduire significativement la taille des bassins jusqu'à 1000 m², sans pour autant atteindre une rétention supérieure à 81%, et ce même pour le débit de pointe.

#### *Bassin en série et taux de capture*

Les 3 bassins utilisés pour ces calculs sont en série, la surface totale est d'environ 7000 m². Pour cette surface, dans un système sans floculant le taux de capture est de 30% à 900 m³/h et 60% à 300 m³/h alors que le système avec floculant atteint un taux de capture de 80% pour les 2 débits.

## 7. FEUILLE DE ROUTE SUR LA MISE EN OEUVRE DES BIOFLOCCULANTS

### 7.1. DIMENSIONNEMENT D'UN PILOTE

#### 7.1.1. PRINCIPE

Le pilote a pour objectif de valider les données de laboratoire et d'observer la sensibilité du procédé à la réalité du terrain, notamment concernant la dynamique et l'intensité des épisodes pluvieux.

Afin que le pilote de traitement puisse s'intégrer dans l'environnement minier, nous proposons que le pilote soit équipé d'un système d'alimentation électrique autonome et qu'il soit s'équipé de kits solaires autonomes (panneau + batterie). Ceux-ci alimenteront les pompes qui permettront de faire fonctionner l'ensemble.

Afin d'étudier l'effet d'une étape de coagulation/floculation, il est proposé de conduire deux décanteurs en parallèle, un sans floculant et un deuxième avec floculant. L'objectif est de comparer les MES retenues dans les deux décanteurs après un événement de forte pluie, et ce en traitement d'un même effluent.

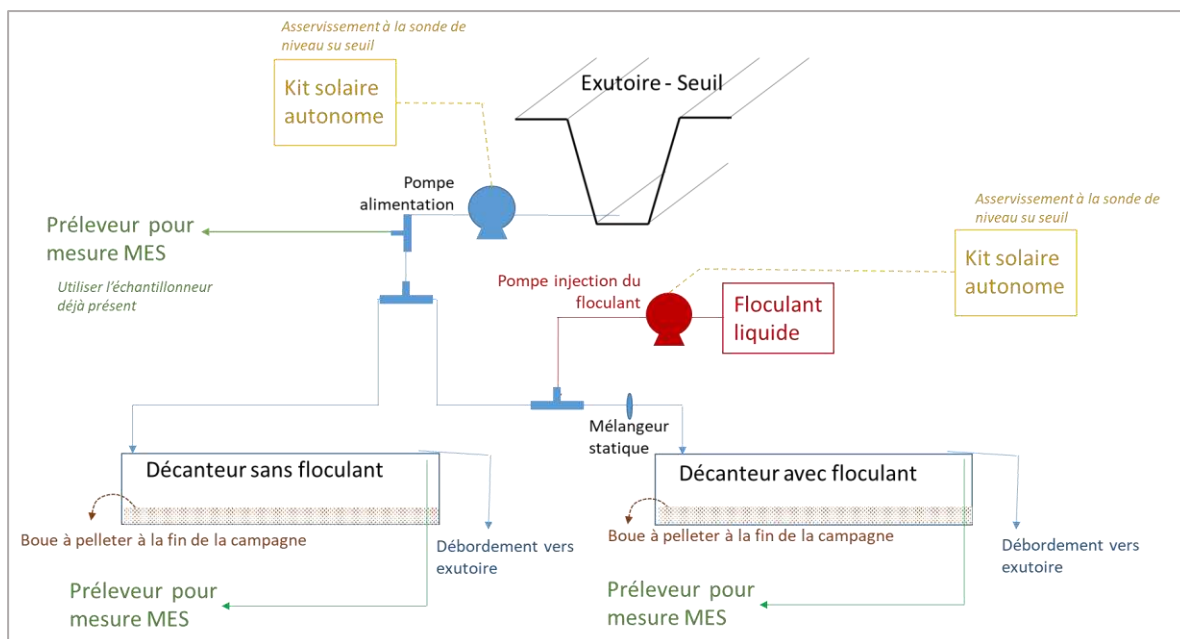
Pour faciliter la mise en œuvre, le floculant doit être préparé sous forme liquide. On considère qu'il se mélange dans la conduite avec l'aide d'un mélangeur statique de conduite.

Les événements météorologiques étant soudains et intenses, il est primordial que la mise en route du pilote soit immédiate, pour cela, elle doit être asservie au niveau d'eau dans les seuils. Les seuils sont déjà équipés de sondes de niveau, ces sondes peuvent être utilisées pour l'asservissement des pompes.

#### 7.1.2. DESIGN DU PILOTE

L'installation (Figure 24) devrait se composer de :

- Pompe d'alimentation avec son tuyau d'alimentation positionné au fond du seuil. La pompe est une pompe péristaltique alimentée par un kit solaire autonome, elle est asservie à la sonde de niveau déjà sur place et se met en route quand la sonde détecte une certaine hauteur d'eau
- Le préleveur déjà sur la station peut être utilisé sur le pilote. Il est préférable qu'il soit sur la conduite d'alimentation du pilote et non pas dans le seuil, cela permet de lever des doutes de représentativité des échantillons entrant dans le pilote. Il est lui aussi asservi à la hauteur d'eau.
- Un simple « T » sur la conduite d'alimentation du pilote permet de diviser le débit en deux.
- Bidon de floculant liquide
- Pompe péristaltique d'alimentation du floculant. La pompe est asservie à la hauteur d'eau.
- Un mélangeur statique à mettre dans la tuyauterie
- Deux décanteurs identiques avec débordement.
- Deux préleveurs automatiques qui prélèvent au niveau du débordement. Ils doivent être asservis au niveau d'eau dans le seuil et se mettre en route en même temps.
- Une vidange en fond de décanteur de façon à assurer l'extraction des boues qui seront ensuite caractérisées en termes de volume et siccité de façon à pouvoir proposer un plan de gestion adéquat



**Figure 27 : synopsis d'un pilote de traitement**

Le dimensionnement de l'ensemble dépend du débit qu'on « évalue » comme étant représentatif et des moyens financiers alloués.

A titre d'exemple, le Tableau 7 synthétise les principaux éléments de dimensionnement pour des débits de 1/100<sup>ème</sup> et 1/1000<sup>ème</sup> du débit de pointe en se basant sur une vitesse limite de 0,5 m/h, correspondant à la situation observée sur le bassin 1 lors de l'épisode pluvieux. Le rapport largeur x longueur de ce même bassin a été conservé pour cette évaluation.

	1/100 <sup>ème</sup>	1/1000 <sup>ème</sup>
Débit (m <sup>3</sup> /h)	9	0.9
Vitesse limite (m/h)	0.5	
Surface (m <sup>2</sup> )	18	1.8
Largeur (m)	2.68	0.85
Longueur (m)	6.71	2.12
Dose biopolymère (mg/L)	3	
Concentration solution mère (mg/L)	1000	
Débit biopolymère (L/h)	27	2.7
Débit biopolymère (L/jour)	648	64.8

**Tableau 7 : éléments de dimensionnement de l'unité pilote**

### 7.1.3. FONCTIONNEMENT

Lors de fort évènement pluvieux

- Le seuil se remplit.

- La sonde de niveau détecte un certain niveau d'eau dans le seuil
- Les pompes d'alimentation et d'injection se mettent en route.
- Le préleveur se met en route (attention à ce que le volume prélevé soit petit par rapport au débit)
- Les décanteurs se remplissent puis débordent (pour que le décanteur soit opérationnel immédiatement il faut qu'il soit plein d'eau claire).
- À la fin de l'évènement pluvieux (lorsqu'il n'y a plus d'eau dans les seuils), il faut nettoyer les décanteurs pour qu'ils puissent être opérationnels pour la campagne suivante.

Les pompes et la tuyauterie doivent être entretenues avec soin pour éviter le bouchage et le dépôt de particules.

#### **7.1.4. AUTRES OPTIONS**

Le mélange du floculant avec le flux chargée peut se faire à l'air libre dans des chicanes (passif) avec un espace croissant entre les chicanes pour réduire la vitesse de l'eau. Ce système fonctionne sans aucun risque de panne, mais il occupe plus de place.

Le floculant pourrait être encapsulé et avoir une diffusion dans le flux lorsque celui-ci traverse les capsules. Cela éviterait la pompe d'injection du floculant. Pour l'instant cette option existe pour des floculants à base de polyacrylamide, elle n'existe pas pour des floculant biosourcés. Elle nécessite d'avoir une bonne maîtrise de la vitesse de dissolution des floculants.

Pour éviter la pompe d'alimentation du pilote, il est possible de l'échanger par une « boîte à débit ». C'est un réservoir qui se place sous le seuil. Il est alimenté par une conduite gravitaire. Sur la partie basse du réservoir on perce 2 trous de diamètre connus (à la même hauteur). On relie ces trous à des canalisations qui font alimenter gravitairement les décanteurs. Quand la boîte est pleine, la vitesse dans les trous est constante (équation de Bernoulli) et donc le débit est constant. Ce système demande un entretien de la « boîte » pour que les MES ne s'accumulent pas dedans et que cela ne bouche pas la tuyauterie.

Pour éviter les deux préleveurs automatiques sur la sortie de décanteurs, la mesure de captage peut être faite sur les boues restantes dans les deux décanteurs. Pour cela, il faut siphonner les décanteurs de l'eau surnageante puis récupérer la boue pour la sécher et la peser.

## **7.2. POINTS D'ATTENTION ET LIMITATION**

Différents points d'attention et de limitation sont à noter :

- Le floculant sous forme liquide peut avoir une stabilité limitée dans le temps. Il est donc important que le remplissage du bidon se fasse en fonction des prévisions météorologiques.
- Le système n'est pas équipé d'une station de dosage et régulation du débit du floculant, ce qui peut diminuer l'efficacité du pilote. En effet, les caractéristiques de l'eau chargée varient fortement au cours d'un fort évènement pluvieux. Il faut donc faire un compromis entre sur-dosage et sous-dosage.
- Un plan de gestion des boues et sédiments devra être suivi de façon à éviter des remises en suspension lors de l'évènement pluvieux suivant. Une valorisation (matériaux de construction ?) sur place permettrait d'assurer un exutoire.

## **7.3. PRODUCTION DU FLOCULANT SUR PLACE**

Le biofloculant qui a montré des propriétés intéressantes (P\_INSA2) a été produit sur la base du brevet "Procédé de production d'une biomasse cellulaire microbienne ayant des propriétés de floculant" [WO2020183103](#) déposé en France ([FR3093732](#)), Europe ([EP3938488](#)) et Etats-Unis ([US20220242759](#)).

Cette production nécessite des sucres simples comme matière première et le rendement de conversion du procédé de production est de l'ordre de  $0,46 \text{ g}_{\text{polymère}}/\text{g}_{\text{sucrose}}$ .

Cela correspond donc à 6,5 mg de sucre / L d'effluent à traiter, soit encore 1,95 kg de sucre /h pour un débit moyen de 300 m<sup>3</sup>/h d'effluent à traiter, soit encore 140kg de sucre pour un épisode pluvieux de 3 jours.

NB : ces flux de matière correspondent aux besoins pour assurer la production du biopolymère, une fois les populations microbiennes stabilisées.

## 8. CONCLUSION

Le projet BOREAL avait pour objectif d'étudier l'applicabilité des biofloculants pour la séparation liquide/solide des eaux de ruissellement chargées en MES sur les sites miniers de Nouvelle Calédonie. Afin de répondre au mieux aux problématiques des mineurs, l'étude s'est focalisée sur le site minier de Tiebaghi.

Les essais de sédimentation en laboratoire ont mis en évidence l'intérêt de mettre en place une séparation liquide/solide par floculation pour piéger une part importante des MES des eaux de ruissellement du site. En effet, les vitesses naturelles de sédimentation des particules présentes sur site sont lentes, elles sont inférieures à 1m/h voire inférieures 0.01 m/h. Dans une configuration classique, ces vitesses permettent de retenir 30 à 60 % des MES dans les bassins. Le biofloculant testé (Brevet [FR3093732](#)) a montré de bons résultats sur certains échantillons et permettrait d'atteindre un taux de capture de 80%.

Ces premiers résultats sont prometteurs mais restent à consolider. Il faut tout d'abord s'assurer que ce taux de capture est reproductible et étudier sa sensibilité aux différentes caractéristiques des MES. Il est également essentiel de pouvoir tester le traitement en conditions réelles pour appréhender les risques de relargage/ de chasse qui peuvent se produire lors d'évènements exceptionnels. Ce traitement doit être intégré à la gestion globale des eaux de ruissellement et mis en adéquation avec le plan de gestion des boues (fréquence de curage, lieu de stockage, etc.).

Pour réaliser cette phase de validation, nous préconisons de mener une étude pilote sur site. Le pilote doit permettre de quantifier « le plus » apporter par une unité de floculation, pour cela nous recommandons d'avoir un pilote avec deux bassins en parallèle, un sans floculant et un avec floculant. Les évènements météorologiques étant soudains et intenses, il est primordial que la mise en route du pilote soit asservie au niveau d'eau dans les exutoires.



