



HAL
open science

Densification des boues activées par hydrocyclones - Impact de la granulation partielle sur les performances de traitement

Sylvie Gillot, Fayolle Yannick, Roche Clément

► **To cite this version:**

Sylvie Gillot, Fayolle Yannick, Roche Clément. Densification des boues activées par hydrocyclones - Impact de la granulation partielle sur les performances de traitement. TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural, 2022, 12, pp.1-20. 10.36904/202212133 . hal-04221938

HAL Id: hal-04221938

<https://hal.inrae.fr/hal-04221938>

Submitted on 28 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

1 **DENSIFICATION DES BOUES ACTIVEES PAR HYDROCYCLONES – IMPACT DE LA GRANULATION**
2 **PARTIELLE SUR LES PERFORMANCES DE TRAITEMENT**

3 **ACTIVATED SLUDGE DENSIFICATION THROUGH HYDROCYCLONES – IMPACTS OF PARTIAL**
4 **GRANULATION ON TREATMENT EFFICIENCY**

5 **GILLOT Sylvie^{1*}, FAYOLLE Yannick², ROCHE Clément³**

6 ¹INRAE, UR REVERSAAL, 5 rue de la Doua, F-69625, Villeurbanne, France – sylvie.gillot@inrae.fr

7 ²Université Paris-Saclay, INRAE, UR PROSE, 1 Rue Pierre Gilles de Gennes, F-92761, Antony, France –
8 yannick.fayolle@inrae.fr

9 ³SUEZ International, 16 place de l'IRIS - Tour CB21, 92040, Paris La Defense, France –
10 clement.roche@suez.com

11
12 ^{*}sylvie.gillot@inrae.fr +33 472208787

13
14 **CATEGORIE DE L'ARTICLE** : *Recherche appliquée*

15 **FORMAT DE L'ARTICLE** : *Article scientifique/technique*

16

17 **TABLE DES MATIERES :**

18	Résumé / Abstract.....	p. 3
19	Introduction.....	p. 3
20	1. Matériels et méthodes.....	p. 5
21	1.1. Système analysé.....	p. 5
22	1.2. Consolidation des données.....	p. 6
23	1.3. Charges massiques reçues par les files de traitement.....	p. 6
24	1.4. Taille des floccs biologiques et viscosité des boues	p. 8
25	1.4.1. Distribution de tailles de floccs biologiques	p. 8
26	1.4.2. Propriétés rhéologiques des boues	p. 8
27	2. Résultats et discussion.....	p. 8
28	2.1. Fonctionnement de la batterie d'hydrocyclones... ..	p. 9
29	2.1.1. Bilans massiques.....	p. 9
30	2.1.2. Minéralisation de la biomasse densifiée	p.10
31	2.1.3. Aspects énergétiques.....	p. 10
32	2.2. Analyse comparative du fonctionnement des files densifiée et témoin.....	p. 11
33	2.2.1. Impact de la densification des boues sur leur capacité à décanter	p. 11
34	2.2.2. Evolution de la biomasse	p. 11
35	2.2.3. Taille des floccs biologiques et viscosité des boues.....	p. 12
36	2.2.3.1. Taille des floccs biologiques.....	p. 12

37	2.2.3.2. Comportement rhéologique des boues	p. 14
38	2.2.4. Performances de traitement – Analyse comparée des files Témoin et Densifiée.....	p. 15
39	Conclusion.....	p. 17
40	Remerciements.....	p. 17
41	Bibliographie.....	p. 18
42		
43		
44		

45 **Résumé**

46 Pour traiter les eaux résiduaires, le procédé à boues activées conventionnel reste le plus utilisé dans les pays
47 industrialisés. Ce procédé peut être intensifié en densifiant la biomasse épuratoire. L'installation
48 d'hydrocyclones sur la boucle d'extraction des boues, créant une pression de sélection des particules les plus
49 denses, est l'une des méthodes de densification employées. L'objectif de cet article est d'analyser le
50 fonctionnement d'une file de traitement par boues activées de la station d'épuration de Dijon, équipée d'une
51 batterie d'hydrocyclones. Les performances obtenues ont été comparées à celles d'une file témoin. Les
52 résultats montrent la nette amélioration de la capacité des boues à décanter de la file densifiée, et le maintien
53 d'un indice de boues inférieur à 100 mL/g même en début de période hivernale habituellement accompagné
54 d'un foisonnement filamenteux. Les performances de traitement sur les deux files sont similaires pour le
55 traitement du carbone. La file densifiée montre un fléchissement du flux nitrifié, lié à une limitation de l'apport
56 d'oxygène. Des mesures complémentaires sont requises pour imputer cette limitation à la taille des particules,
57 significativement plus élevée dans la file densifiée, ou à une capacité de transfert d'oxygène différente, en lien
58 avec les modifications de comportement rhéologique observées. Ces mesures permettront également de
59 préciser le bilan énergétique du système, en prenant en compte l'ensemble des modifications induites
60 (puissances d'agitation et de pompage requises, notamment).

61 **Mots-clés** : traitement des eaux résiduaires, boues activées, densification, boues granulées

62 **Abstract**

63 For wastewater treatment, the conventional activated sludge process is still the most widely used in
64 industrialised countries. This process can be intensified by densifying the biomass. The installation of
65 hydrocyclones on sludge extraction, creating a selection pressure of the dense particles, is one of the
66 densification methods used. The objective of this article is to analyse the operation of an activated sludge
67 treatment line at the Dijon wastewater treatment plant, equipped with a hydrocyclone battery. The performance
68 obtained is compared to the one of a control line. Results show a clear improvement in the capacity of the
69 sludge to settle in the densified line, and the maintenance of a sludge index below 100 mL/g even at the
70 beginning of the winter period, usually accompanied by the development of filamentous bacteria. The treatment
71 performance of the two lines is similar for carbon. The densified line shows a slight decrease in nitrification,
72 linked to a limitation of oxygen supply. Additional measurements are required to attribute this limitation to the
73 size of the particles, which is significantly higher in the densified line, or to a different oxygen transfer capacity,
74 in connection with the changes in the observed rheological behaviour. These measurements will also make it
75 possible to specify the energy balance of the system, taking into account all of the induced modifications
76 (agitation and pumping powers required, in particular).

77 **Keywords**: wastewater treatment, activated sludge, densification, granular sludge

78 **Introduction**

79 Le procédé à boues activées, mis au point au début du 20^{ème} siècle, est encore aujourd'hui le principal procédé
80 de traitement des eaux résiduaires urbaines du fait notamment de son adaptabilité et de la possibilité d'obtenir
81 un traitement poussé de l'azote et du phosphore. En France, en 2019, 88% des 3962 stations d'épuration de
82 plus de 2000 EH intégraient un procédé à boues activées (<http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr>). De nombreuses améliorations et variantes des boues activées ont été proposées au cours

84 du temps, en lien avec l'évolution des niveaux de rejet demandés pour traiter l'azote, puis le phosphore.
85 L'efficacité d'un système à boues activées reste cependant directement liée à la capacité des boues à
86 décanter, et donc à l'efficacité de séparer la biomasse produite de l'eau traitée. Les déterminants de cette
87 capacité sont nombreux : charge massique appliquée, présence de bactéries filamenteuses dont les causes
88 peuvent être variées (absence de zone de contact, problème de septicité des effluents ou d'aération, présence
89 de graisses...), conception du clarificateur secondaire...

90 Plusieurs procédés de densification des boues activées, comme la granulation aérobie, ont été récemment
91 proposés pour intensifier les systèmes à boues activées en augmentant la capacité des boues à décanter.
92 Parmi eux, l'installation d'hydrocyclones sur la boucle d'extraction des boues a montré son aptitude à stabiliser
93 des indices de boues à des valeurs très faibles (REGMI et al., 2019; WILLOUGHBY et al., 2020; AVILA et al.,
94 2021; ROCHE et al., 2022). Ce procédé consiste à imposer une pression de sélection gravimétrique pour
95 retenir dans le système les floccs et granules les plus denses. Les matières les plus denses obtenues à la
96 sousverse des hydrocyclones sont renvoyées vers le réacteur biologique, tandis que la surverse contenant
97 les boues « légères » est dirigée vers la file de traitement des boues.

98 Les premiers résultats publiés sur cet équipement par FORD et al. (2016) ont montré une amélioration
99 significative de la vitesse de décantation des boues, et une potentielle stabilisation de la déphosphatation
100 biologique. Un lien entre la proportion de granules (floccs de taille supérieure à 200 μm) dans la biomasse et la
101 capacité de la boue à décanter a par ailleurs été établi par AVILA et al. (2017) et REGMI et al. (2019, 2022).
102 Au-delà de la réduction de l'indice de boues, la stabilisation de celui-ci pendant les périodes hivernales
103 usuellement sujettes à des épisodes de développement de bactéries filamenteuses constitue un avantage
104 significatif dans la fiabilisation des procédés. REGMI et al. (2022) ont par ailleurs confirmé l'hypothèse d'une
105 rétention sélective des microorganismes déphosphatants (ayant une densité supérieure aux autres), ce qui
106 leur a permis de stabiliser les performances de déphosphatation, sans ajout de réactifs.

107 D'un point de vue opérationnel, la mise en place d'hydrocyclones sur des installations existantes permettrait
108 d'imposer une charge hydraulique sur les clarificateurs significativement supérieure à la charge usuelle de 0,6
109 m/h, et donc d'augmenter la capacité hydraulique des installations. Pour des systèmes neufs, une diminution
110 des emprises au sol requises pour le traitement est l'un des bénéfices envisageables. Pour des installations
111 existantes, STRUBBE et al. (2022) ont montré, à l'aide d'une étude numérique, que l'augmentation de la vitesse
112 de décantation de boues granulaires dans un système à boues activées permettait d'augmenter la capacité
113 de traitement du système de l'ordre de 20 %, mais qu'il fallait adapter le fonctionnement de l'installation pour
114 bénéficier de cette augmentation, en imposant des conditions de nitrification/dénitrification simultanées. En
115 effet, les granules, de par leur taille, induisent une limitation à la diffusion de l'oxygène, et donc potentiellement
116 une augmentation de la quantité d'air à apporter au système pour traiter la même charge. Ces auteurs
117 montrent aussi des gains énergétiques potentiels, mais les hypothèses faites ne prennent pas en compte
118 l'impact du changement des propriétés de boues (leur concentration et leur propriétés rhéologiques,
119 notamment) sur les puissances de pompage et d'agitation requises, ni sur le transfert d'oxygène. Or cet impact
120 sur le transfert d'oxygène a été mis en évidence expérimentalement (CECCONI et al., 2019), avec des
121 questions en suspens concernant le faible effet d'une augmentation de la concentration en MES observé pour
122 les boues granulaires, différent de celui usuellement obtenu en boues activées ou pour les procédés
123 membranaires (DURAN et al., 2016).

124 Concernant le procédé de densification des boues activées par hydrocyclones, les résultats publiés dans la
125 littérature jusqu'à récemment concernaient quasi exclusivement des stations sur le sol américain, hormis la
126 première installation du dispositif qui a eu lieu à Strass en Autriche (WETT et al., 2015). En 2019, une batterie
127 d'hydrocyclones a été installée sur l'une des quatre files biologiques de la station d'épuration de Dijon (400 000
128 EH). Le suivi de cette file, en parallèle avec une file témoin, a confirmé la réduction et le maintien d'un indice
129 de boues très faible, y compris pendant les périodes de foisonnement filamenteux (ROCHE et al., 2020).
130 L'indice de boues mesuré en diluant les boues à 2 g/L est directement corrélé au pourcentage de boues de
131 taille supérieure à 200 μm (ROCHE et al., 2022).

132 Cet article complète les résultats exposés dans ROCHE et al. (2022) en analysant finement le fonctionnement
133 du dispositif et son évolution dans le temps. L'augmentation de la taille des particules est décrite, de même
134 que la comparaison des distributions de taille des floccs obtenues par granulométrie. Le comportement
135 rhéologique des boues densifiées et conventionnelles est également étudié. Enfin, les questions en suspens
136 à l'issue de l'analyse sont identifiées, dans l'objectif de préciser les impacts potentiels liés à l'installation
137 d'hydrocyclones en termes de dimensionnement et de conduite des installations.

138 **1. Matériels et méthodes**

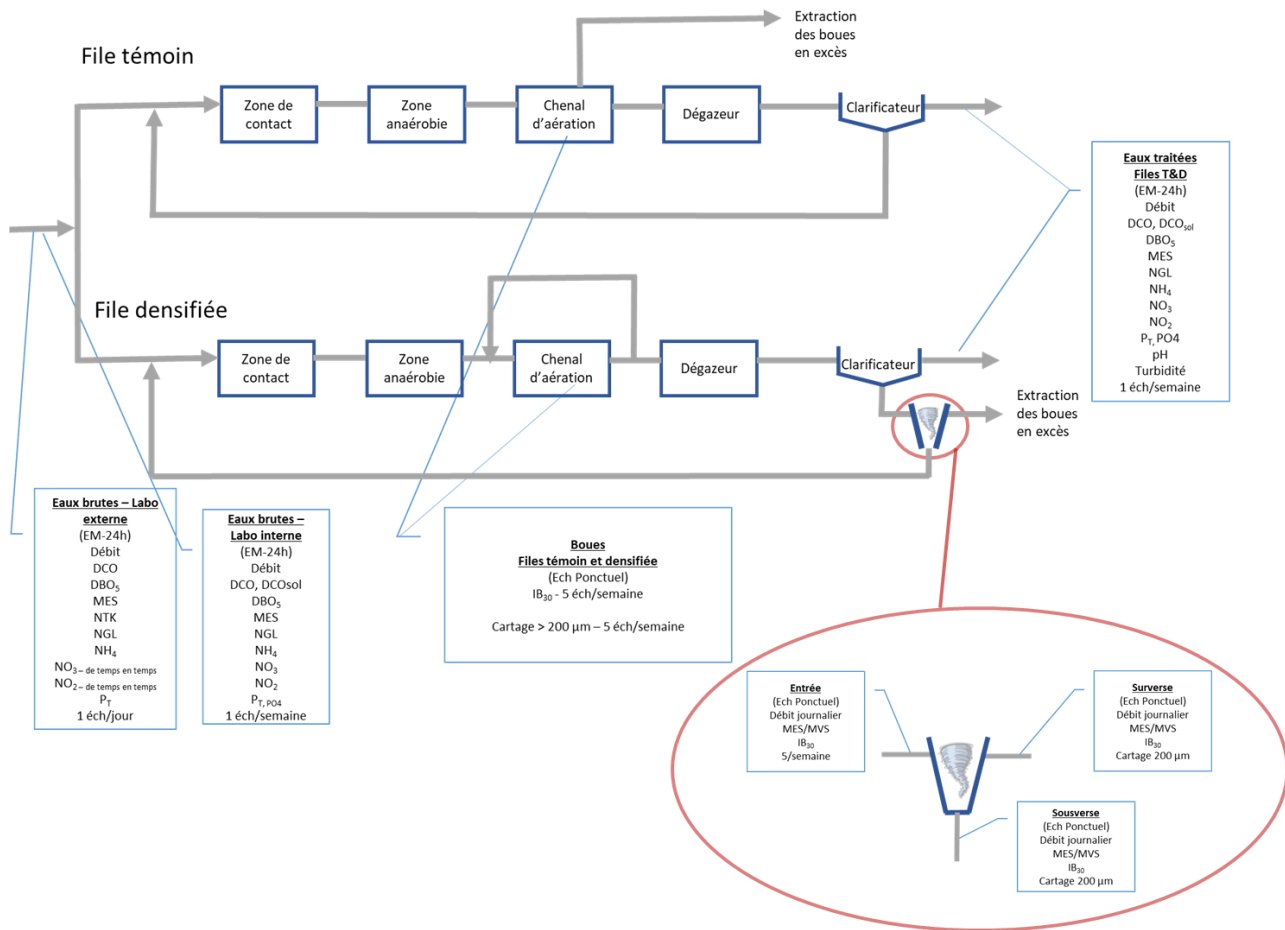
139 **1.1. Système analysé**

140 Le système a été installé sur la station d'épuration de Dijon (400 000 EH), comprenant un prétraitement, un
141 traitement biologique par boues activées (4 files composées chacune d'un bassin d'anaérobie, d'un chenal
142 d'aération et d'un clarificateur). Les boues produites sont épaissies à l'aide de grilles d'égouttage et
143 déshydratées par centrifugation.

144 L'une des quatre files biologiques de l'installation a été équipée d'une batterie de 8 hydrocyclones (technologie
145 inDENSE™, Newport GmbH, Autriche) alimentés par une fraction des boues activées de la recirculation des
146 boues à un débit unitaire de 10 m³/h (*Figure 1*). La fraction prélevée dans la recirculation des boues est ajustée
147 de manière à évacuer du système les boues produites quotidiennement, en modulant le nombre de cyclones
148 alimentés.

149 D'octobre 2019 à juin 2021 (soit pendant 21 mois), les performances de la file équipée (densifiée) ont été
150 comparées à celles d'une file conventionnelle à boues activées (file témoin). Comme détaillé dans ROCHE et
151 al. (2022) et indiqué sur la *Figure 1*, les principaux paramètres physico-chimiques de l'influent et de l'effluent
152 ont été mesurés (DCO, DBO₅, MES, N, P). Les boues ont été caractérisées en termes de décantabilité (indices
153 de boues) et de distribution granulométrique. Les fréquences de ces mesures sont indiquées sur la *Figure 1*.
154 Les mesures spécifiques réalisées en entrée et sortie des hydrocyclones sont également indiquées. A noter
155 que les mesures en sortie des deux clarificateurs et en entrée et sorties du cyclone ont été arrêtées en mars
156 2021. A partir de cette date, seules les charges reçues par les deux files ont été suivies, de même que les
157 évolutions classiquement mesurées de MES, MVS et IB dans les bassins.

158 Le débit d'air insufflé sur la file densifiée a été mesuré en continu, alors qu'il n'était pas mesuré sur la file
159 témoin suite à un dysfonctionnement du débitmètre sur toute la période de suivi. Les durées totales d'aération
160 par jour ont quant à elles été mesurées pour les deux files sauf pour la période 4, les mesures précises sur
161 les deux files ayant été arrêtées fin mars 2021.



162

163 Figure 1. Représentation schématique des deux files de traitement analysées (témoin en haut, et densifiée
 164 en bas), et mesures associées

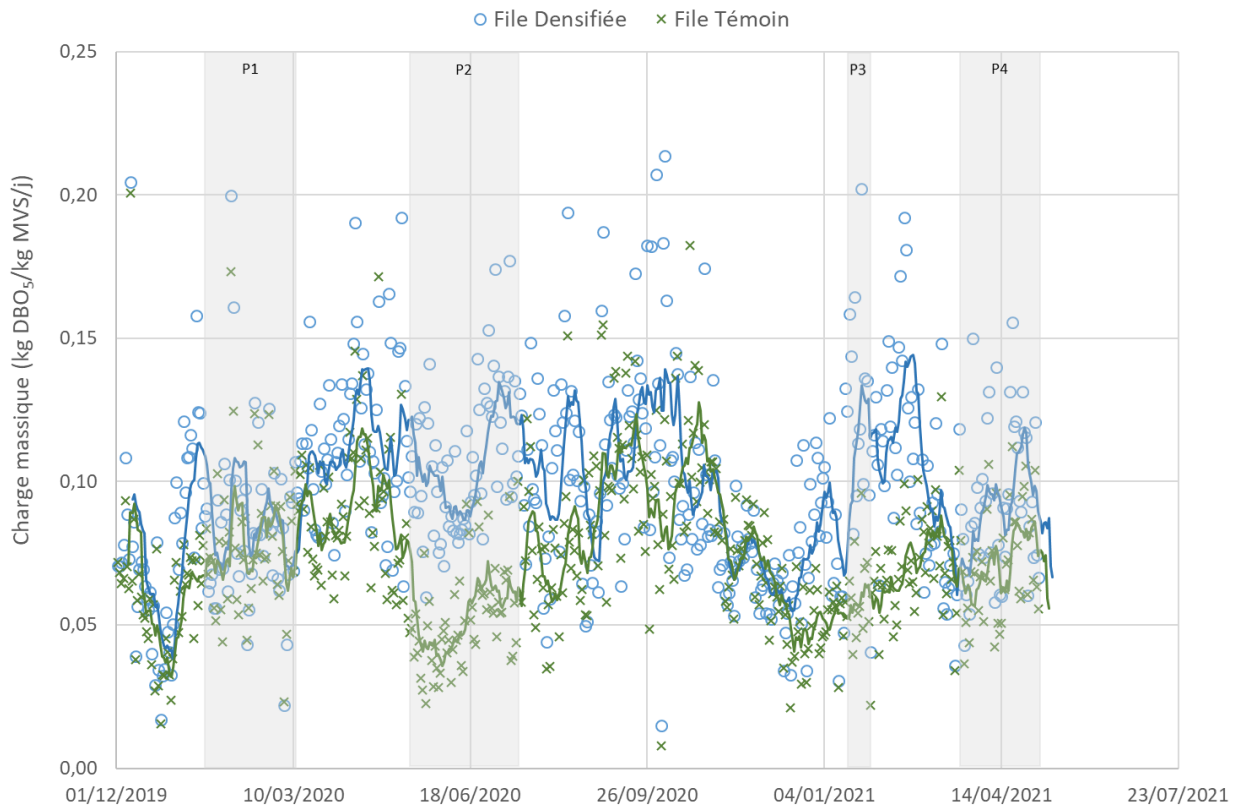
165 **1.2. Consolidation des données**

166 L'analyse et la consolidation des données de fonctionnement de l'installation ont été réalisées à l'aide de la
 167 procédure proposée par le groupe de travail de l'International Water Association (IWA) « Good Modelling
 168 Practice – GMP » (RIEGER et al., 2012) et résumée dans l'article publié par FILALI et al. (2015).

169 Cette analyse montre un fonctionnement de l'installation à 44 % de sa charge organique nominale en moyenne
 170 pendant la période de mesures. Après la suppression de quelques valeurs aberrantes, les bilans sur le
 171 paramètre phosphore ont pu être bouclés avec une erreur moyenne de 11%, ce qui a été considéré comme
 172 acceptable. A noter que les apports industriels sur la période ont été négligés, faute de données suffisantes.

173 **1.3. Charges massiques reçues par les files de traitement**

174 Les charges massiques reçues par les deux files suivies sont présentées sur la Figure 2.



175

176 Figure 2. Charges massiques reçues par les files biologiques densifiée et témoin – Les périodes de
 177 comparaison des deux files sont indiquées P1 à P4.

178 Les charges massiques (moyennées sur 7 jours) lors de la période analysée sont comprises entre 0,04 et 0,13
 179 kg DBO₅/MVS/j pour la file témoin et 0,04 et 0,15 kg DBO₅/MVS/j pour la file densifiée. Quatre périodes (P1 à
 180 P4) ont été identifiées pour faire la comparaison de fonctionnement des deux files. Elles sont schématisées
 181 sur la Figure 3 et les caractéristiques de fonctionnement sont rapportées dans le *Tableau I*. Ces périodes ont
 182 été choisies car elles présentaient un fonctionnement relativement stable et un nombre de données suffisant
 183 pour caractériser le fonctionnement des cyclones. Dans le *Tableau I*, la demande en oxygène pour la file
 184 densifiée a été estimée à partir des charges en DBO₅ et en azote traitées, en utilisant les coefficients
 185 classiques de besoins en oxygène (DERONZIER et al., 2002). Les données de débit d'air sur la file témoin
 186 n'ont pas pu être mesurées, suite au dysfonctionnement du débitmètre.

187 Les périodes 1 et 4 sont caractérisées par des charges appliquées similaires sur les deux files étudiées. Au
 188 cours des périodes 2 et 3, la charge massique sur la file densifiée a été augmentée afin d'étudier l'effet de
 189 cette augmentation sur ses performances (x 1,5 par rapport à la période 1). Cette augmentation a été réalisée
 190 en réduisant le débit d'alimentation de la file témoin. Consécutivement, la charge appliquée sur la file densifiée
 191 était le double de celle de la file témoin au cours des périodes 2 et 3.

192 1.4. Taille des floccs biologiques et viscosité des boues

193 Des mesures de propriétés rhéologiques des boues biologiques, couplées à une caractérisation de la
 194 distribution granulométrique des floccs, ont été réalisées sur les files témoin et densifiée au cours de deux
 195 campagnes de mesure (C1 et C2). L'ensemble de ces mesures a été réalisé directement sur l'installation afin
 196 de permettre la mesure sur les boues directement après leur prélèvement, et limiter ainsi l'évolution potentielle

197 de leurs propriétés avec le temps. Ces campagnes de mesures ont été réalisées du 22 au 29 septembre 2020
198 pour la première campagne (C1), correspondant aux conditions de charge de la période identifiée 2 (Tableau
199 I), et du 4 au 6 mai 2021 pour la seconde campagne (C2), correspondant à la fin de la période 4.

200 **1.4.1. Distribution de tailles de floccs biologiques**

201 La distribution de taille de floccs (DTF) des échantillons de boues a été obtenues à l'aide d'un granulomètre
202 laser en voie liquide Mastersizer 3000 (Malvern Instruments). Cet appareil permet de mesurer, à travers une
203 distribution volumétrique, la taille des particules d'un échantillon de boues mis en circulation dans un
204 dispersant (eau de sortie de la file étudiée filtrée à 0,1 µm). La méthode de mesure est détaillée dans
205 PECHAUD et al. (2021).

206 Afin de comparer les propriétés granulométriques de deux échantillons de boues soumis à des conditions
207 d'agitation équivalentes et de disposer d'informations quant à l'impact de ce taux de cisaillement sur leur taille
208 et leur structuration/déstructuration, les échantillons de boues sont placés après prélèvement dans une cuve
209 agitée standard afin d'être soumis à différentes conditions de cisaillement connues (PECHAUD et al., 2021).
210 Les résultats obtenus permettent à la fois d'analyser les distributions de tailles de floccs (DTF) pour un taux de
211 cisaillement donné, mais également d'analyser l'impact du cisaillement sur celles-ci. Les résultats présentés
212 par la suite correspondent à la fois au D₅₀, taille médiane de la distribution, mais également aux DTF brutes
213 des différents échantillons pour des taux de cisaillement équivalents.

214 **1.4.2. Propriétés rhéologiques des boues**

215 Les propriétés rhéologiques des boues biologiques ont été déterminée à l'aide d'un rhéomètre capillaire, tel
216 que développé dans le cadre de la thèse de Duran (2015). La mesure dans ces appareils consiste à déterminer
217 la perte de charge associée à l'écoulement des boues à un débit donné dans un capillaire de géométrie connue
218 (en termes de diamètre et de longueur). La configuration du dispositif de mesure permet d'éviter le phénomène
219 de décantation pour les boues faiblement concentrées. Les résultats obtenus permettent de déterminer
220 l'évolution de la contrainte de cisaillement (τ , exprimée en Pa) en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$, exprimé
221 en s⁻¹). La viscosité dynamique apparente du fluide (μ_{app} , exprimée en Pa s) peut alors être déterminée à l'aide
222 de l'équation 1.

$$\mu_{app} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{Eq. 1})$$

223 Pour chacune des deux campagnes de mesure, la rhéologie des boues a été déterminée pour la ligne densifiée
224 et la ligne témoin en effectuant des prélèvements dans les bassins d'aération et dans la recirculation des
225 boues, afin d'analyser l'effet de la concentration des matières en suspension sur les comportements
226 rhéologiques observés.

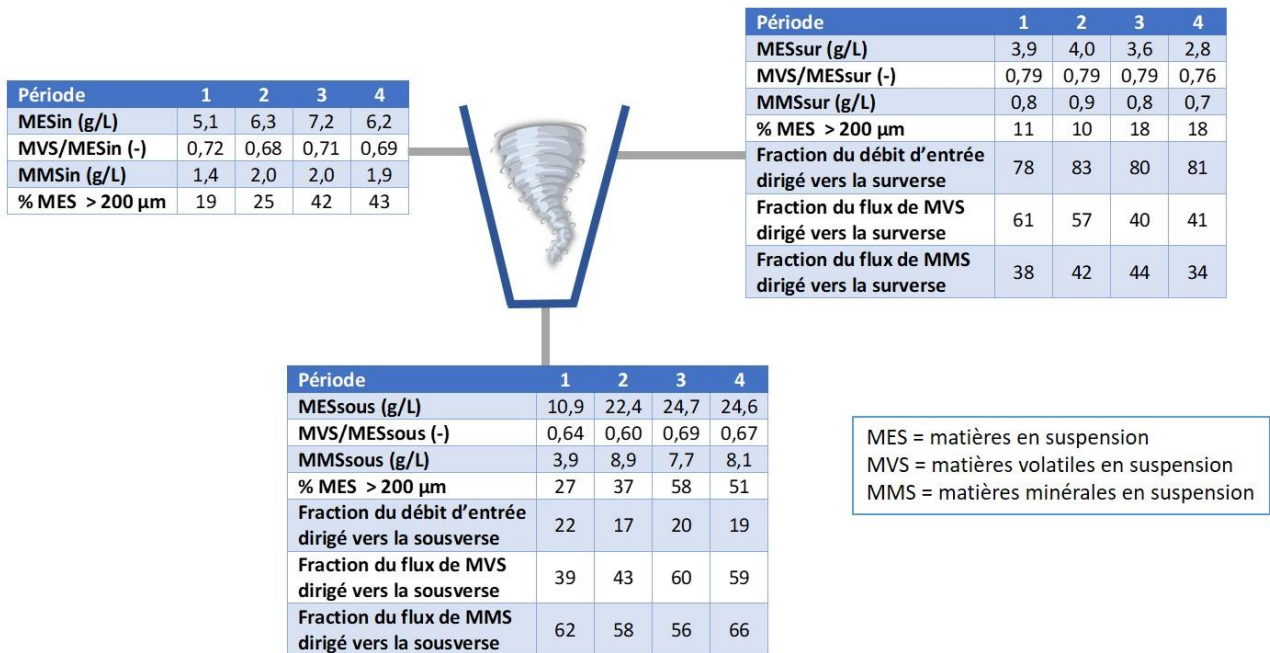
227 **2. Résultats et discussion**

228 La première partie des résultats présentés concerne la file densifiée, et particulièrement le fonctionnement de
229 la batterie d'hydrocyclones. La seconde s'intéresse à l'évaluation comparative des performances des deux
230 files étudiées.

231 **2.1. Fonctionnement de la batterie d'hydrocyclones**

232 **2.1.1. Bilans massiques**

233 La *Figure 3* présente les concentrations des matières en suspension en entrée et sorties (surverse et
 234 sousverse) de la batterie d'hydrocyclones pour les périodes 1 à 4 présentées dans le *Tableau I*. La répartition
 235 des débits et des flux en sortie du dispositif est également présentée.



236
 237 Figure 3. Débits, flux, et concentrations des matières en suspension en entrée et sortie des hydrocyclones
 238 pour les 4 périodes considérées

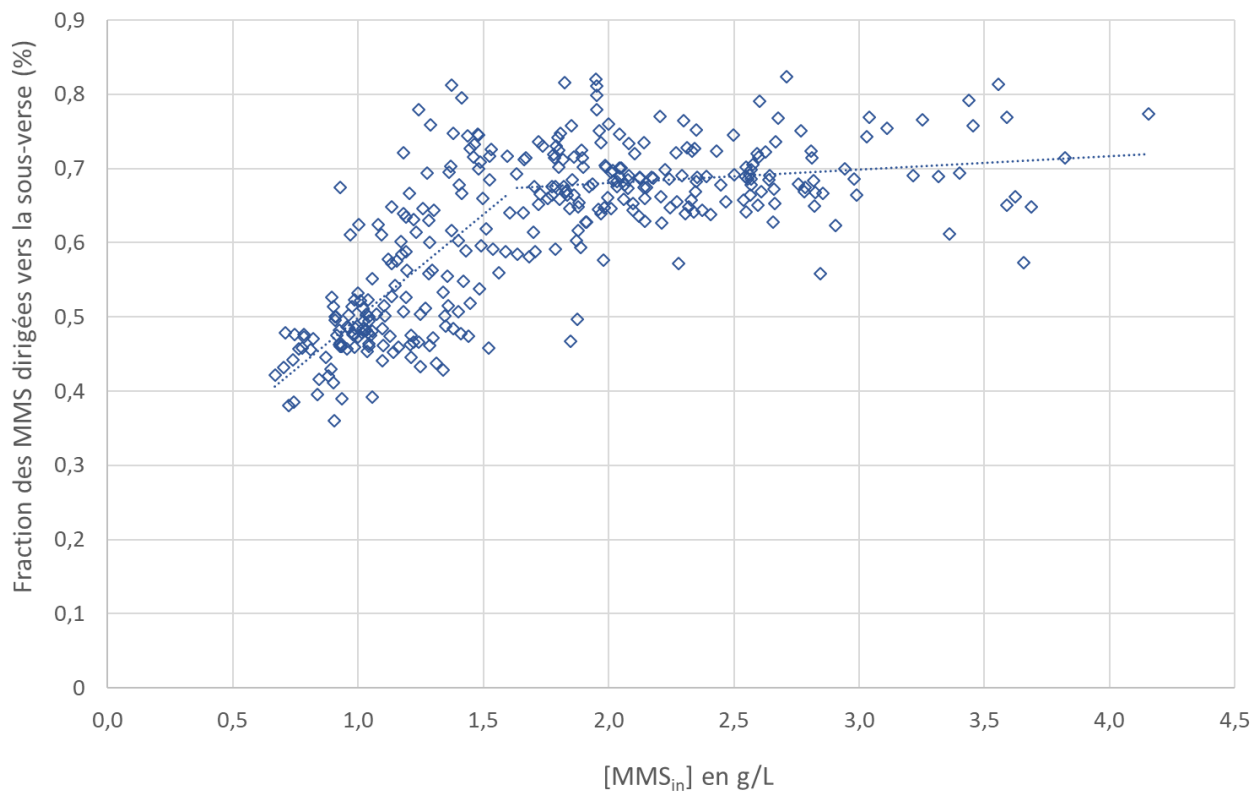
239 La densification des boues conduit à une forte augmentation de la concentration en MES de la sousverse, qui
 240 atteint en fin d'expérimentation (période 4) une valeur de l'ordre de 25 g/L. Cette augmentation induit une
 241 augmentation de la concentration en MES en entrée du dispositif (et donc dans les bassins biologiques), sans
 242 que les ratios MVS/MES soient significativement impactés. En effet, ces ratios sont peu différents d'une
 243 période à l'autre, même s'ils évoluent un peu au cours du temps, en lien notamment avec les évolutions de la
 244 typologie de l'influent.

245 Les hydrocyclones permettent de sélectionner les boues les plus denses : la fraction de biomasse ayant une
 246 taille supérieure à 200 µm augmente donc de 19 % des MES pour P1 à 43 % des MES en fin de la période de
 247 mesure. Si les MVS sont majoritairement redirigées vers la surverse en début de période (à 60 %), et donc
 248 évacuées du système, la proportion s'inverse en fin de l'étude où 60 % des MVS sont redirigées vers le bassin
 249 biologique.

250 La répartition des débits en sortie de cyclones reste stable au cours du temps, avec 80 % du débit environ
 251 vers la surverse, alors que la répartition de MMS varie peu dans le temps.

252 **2.1.2. Minéralisation de la biomasse densifiée**

253 La *figure 4* présente la fraction des matières minérales en suspension (MMS) dirigées vers la sousverse en
 254 fonction de la concentration des MMS en entrée des cyclones. Ces données synthétisent l'ensemble des
 255 mesures faites sur la durée de l'étude.



256

257 Figure 4. Fraction des matières minérales en suspension dirigées vers la sousverse

258 L'augmentation des MMS en entrée de cyclones, liée à la sélection des matières les plus denses, conduit à
 259 une augmentation de la fraction de ces MMS dirigées vers la sousverse jusqu'à une valeur en entrée d'environ
 260 1,7 g/L. Au-delà, la concentration en MMS en entrée des cyclones n'influence plus cette proportion. Ce graphe
 261 montre que les boues du bassin biologique ne continuent pas à s'enrichir en matières minérales indéfiniment.

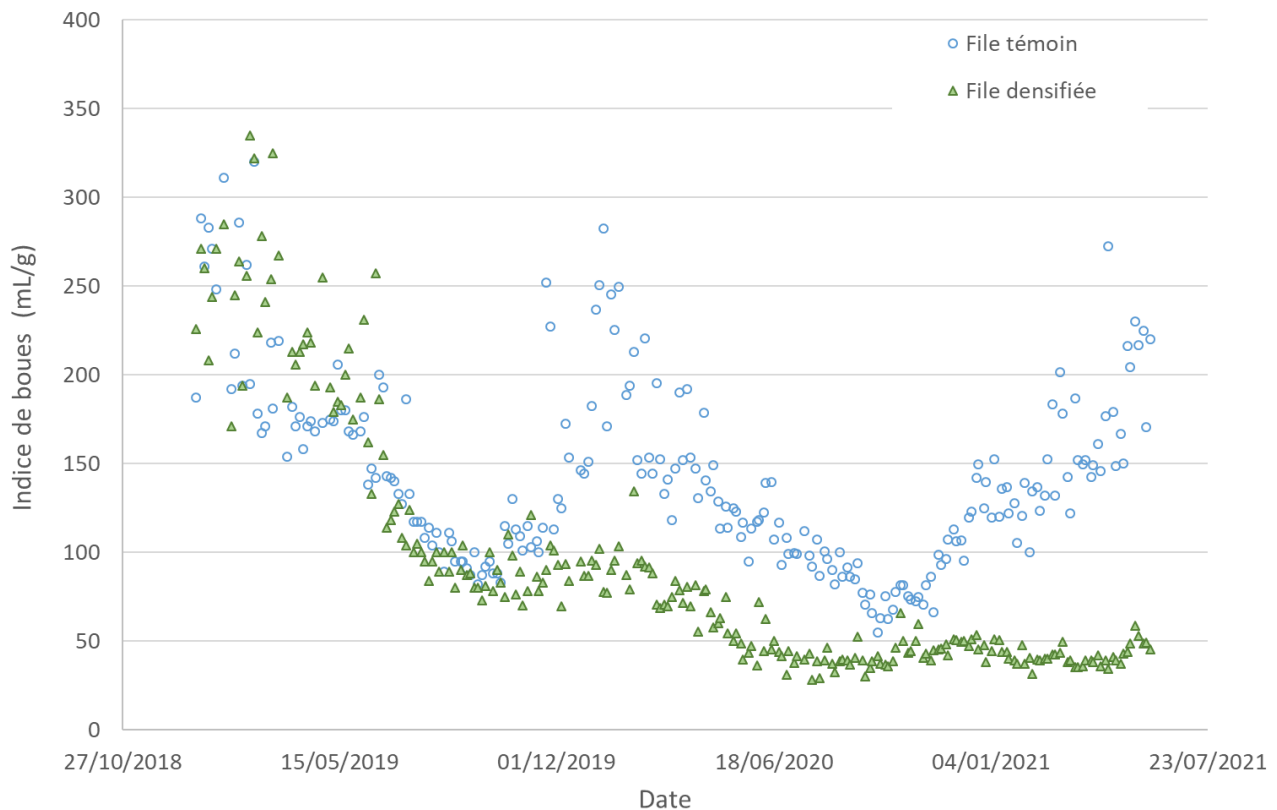
262 2.1.3. Aspects énergétiques

263 L'énergie dépensée par la batterie des cyclones correspond à l'énergie de la pompe d'alimentation du dispositif
 264 et de la reprise des boues en surverse pour alimenter la file boues. En moyenne, le fonctionnement des
 265 cyclones conduit à une dépense énergétique de 340 kWh/j, ce qui correspondrait à environ 5 % de la
 266 consommation globale de l'installation si le dispositif était installé sur les 4 files de traitement biologique. A titre
 267 de comparaison, l'extraction des boues du système à boues activées représente environ 2 % de la
 268 consommation de l'installation. Cependant, cette augmentation de besoin énergétique pour l'extraction des
 269 boues est compensée par une réduction du taux de recirculation des boues au clarificateur, rendu possible
 270 par la meilleure décantabilité des boues densifiées, et dont le gain énergétique est estimé à environ 684 kWh/j
 271 entre la file densifiée et la file témoin pour des taux de recirculation moyens de 50% et 157%, respectivement.

272 2.2. Analyse comparative du fonctionnement des files densifiée et témoin

273 2.2.1. Impact de la densification des boues sur leur capacité à décanter

274 Les indices de boues obtenus sur les files de traitement témoin et densifiée sont présentés sur la Figure 5.



275

276 Figure 5. Evolution des indices de boues sur les files témoin et densifiée

277 La mise en fonctionnement des hydrocyclones permet de stabiliser l'indice de boues sur la file densifiée, à
 278 une valeur inférieure à 100 mL/g début 2020 et inférieure à 50 mL/g à partir de juin 2020. L'évolution de l'indice
 279 de boues sur la file témoin est classique et correspond à celle observée les années précédentes comme
 280 indiqué dans Roche et al., (2022). L'augmentation typique en début d'hiver, en lien avec le développement de
 281 bactéries filamenteuses, est observée sur cette file, alors que l'indice de boues est maintenu constant sur la
 282 file densifiée pendant cette période.

283 2.2.2. Evolution de la biomasse

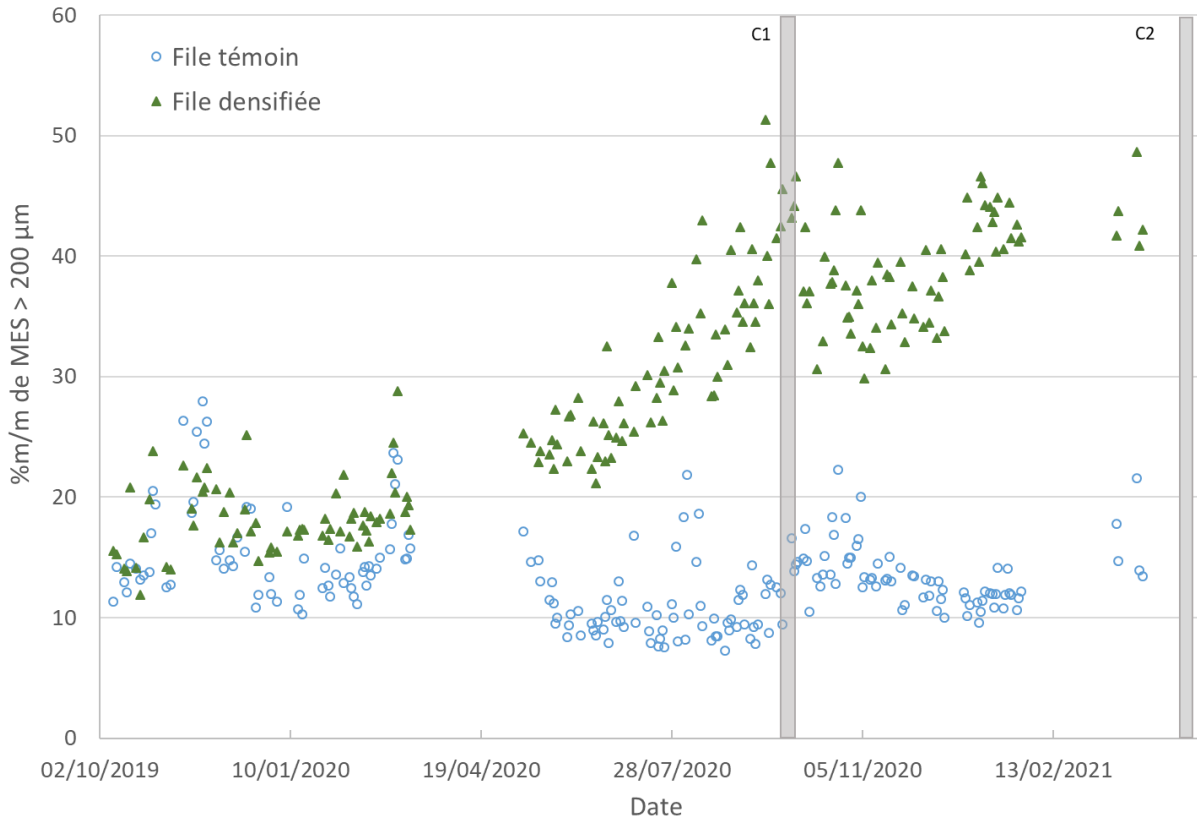
284 Comme indiqué sur la *Figure 3*, le ratio MVS/MES des boues qui alimentent les hydrocyclones (pris dans la
 285 recirculation des boues, donc identique à celui du bassin d'aération de la file densifiée), varie peu et est
 286 compris entre 0,68 et 0,72. Sur la même période, le ratio MVS/MES des boues de la file témoin est compris
 287 entre 0,75 et 0,78. La mise en place du dispositif conduit donc à un ratio MVS/MES de 6 à 10 % inférieur à
 288 celui obtenu sur la file témoin, en lien avec une quantité de matières minérales plus importante dans les
 289 bassins biologiques (+ 30 % en fin d'essai). Néanmoins, en lien avec la fraction de MMS de la sousverse qui
 290 se stabilise (*Figure 4*), la pression de sélection imposée ne conduit pas à une augmentation continue de la
 291 concentration en matières minérales dans le système.

292 2.2.3. Taille des floccs biologiques et viscosité des boues

293 2.2.3.1. Taille des floccs biologiques

294 L'évolution de la proportion (en masse) de matières en suspension de taille supérieure à 200 μm est
 295 représentée sur la *Figure 6*. Les deux campagnes de caractérisation fine des floccs (taille, comportement

296 rhéologique) sont indiquées sur cette figure également (C1 et C2).

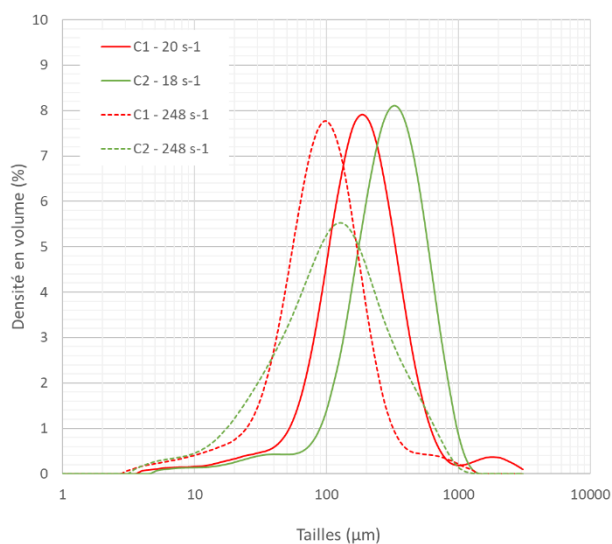


297

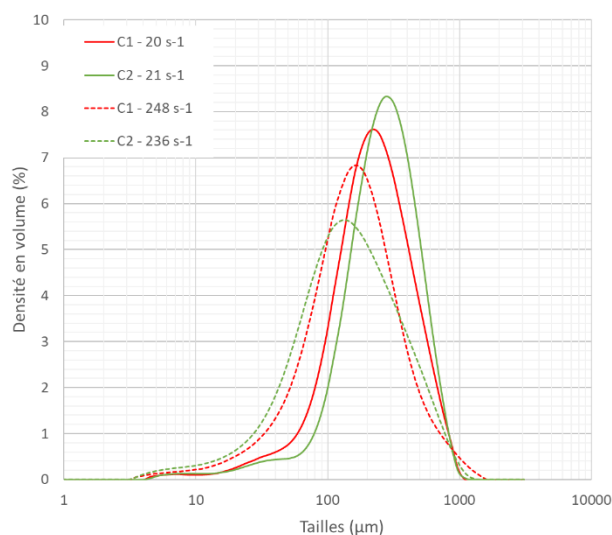
298 Figure 6. Evolution de la proportion de MES de taille supérieure à 200 μm

299 La fraction de biomasse de la file densifiée ayant une taille supérieure à 200 μm représente environ 15 % des
300 MES en début de période et se stabilise à 43 % en fin de suivi. Pour la file témoin, cette fraction est relativement
301 stable, avec une moyenne et un écart type à 13 % et 4 %, respectivement.

302 Les distributions de tailles de floccs pour les deux files lors des deux campagnes de mesure sont présentées
303 sur la *Figure 7*.



(i)



(ii)

304 Figure 7. Distribution de tailles des floes pour les taux de cisaillement extrêmes appliqués dans la cuve agitée
 305 pour les boues prélevées dans les bassins d'aération des files (i) témoin et (ii) densifiée lors des campagnes
 306 C1 et C2

307 Pour l'ensemble des échantillons, le diamètre médian des floes biologiques décroît logiquement lorsque le
 308 taux de cisaillement appliqué dans la cuve agitée augmente. Cette décroissance est liée à une déstructuration
 309 et une érosion progressive des floes biologiques, formant ainsi des floes de plus petite taille. Les diamètres
 310 médians obtenus pour la campagne C1 passent de 180 à 101 μm pour la ligne témoin et de 220 à 174 μm
 311 pour la file densifiée. Pour une même gamme de taux de cisaillement (de 20 à 250 s^{-1}), les diamètres médians
 312 obtenus pour la campagne C2 passent de 291 à 149 μm pour la ligne témoin et de 325 à 248 μm pour la file
 313 densifiée.

314 Pour un taux de cisaillement donné, le diamètre médian des floes de la file densifiée est supérieur à celui des
 315 boues de la file témoin. De plus, les floes issus de la file témoin ont une tendance plus forte à se déstructurer
 316 que ceux issus de la file densifiée lorsque le taux de cisaillement augmente. Cette différence de comportement
 317 est probablement liée à la structure plus dense des floes de la ligne densifiée, nécessitant des contraintes
 318 hydrodynamiques plus fortes pour qu'ils s'érodent. La structure des floes de la file témoin est supposée plus
 319 lâche, classique des boues activées, avec des ponts et des liaisons faibles dans leur partie externe et une
 320 structure plus dense en interne.

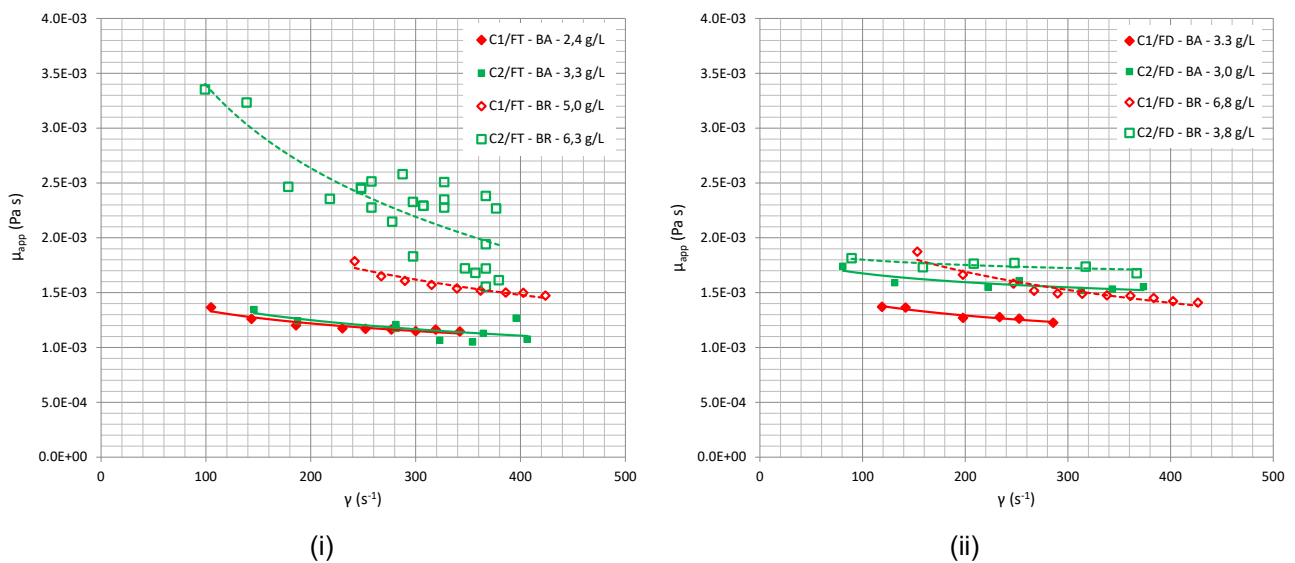
321 Pour la file densifiée, la distribution granulométrique des floes biologiques lors de la campagne C2 indique une
 322 tendance plus forte à la déstructuration des floes en lien avec une augmentation du taux de cisaillement sur
 323 la gamme étudiée (écart plus important entre les médianes des deux distributions, en comparaison de la
 324 première campagne). Pour le taux de cisaillement le plus faible, la taille médiane des floes biologiques
 325 mesurée lors de la campagne C2 est plus importante que lors de la campagne C1, avec un étalement de la
 326 distribution équivalent. Cependant, la tendance plus forte à la déstructuration est illustrée par l'apparition
 327 importante de floes de petite taille sur la distribution C2 déterminée pour le taux de cisaillement le plus fort
 328 indiquant une structure externe des floes biologiques potentiellement plus lâche avec des liaisons plus faibles
 329 en comparaison de l'échantillon issu de la campagne C1.

330 Pour la file témoin et pour les deux taux de cisaillement représentés, les médianes des diamètres des flocs
331 biologiques lors de la campagne C2 sont légèrement plus fortes, indiquant une augmentation du diamètre
332 moyen des flocs biologiques entre les deux campagnes. L'impact de l'augmentation du taux de cisaillement
333 semble équivalent lors des deux campagnes, indiquant possiblement une structure générale des flocs
334 équivalente.

335 En conclusion, la densification des boues induit des flocs de plus grande taille, et qui montrent une capacité
336 d'érosion (en faisant varier le taux de cisaillement dans la cuve alimentant le granulomètre) moindre par
337 rapport aux boues activées, sans doute en lien avec leur structure plus dense.

338 2.2.3.2. Comportement rhéologique des boues

339 La Figure 8 présente les rhéogrammes obtenus pour les deux files étudiées lors des deux campagnes de
340 mesure.



341 Figure 8. Viscosité apparente des boues prélevées dans les bassins d'aération (BA) et la recirculation des
342 boues (BR) de (i) la file témoin (FT) et (ii) la file densifiée (FD) en fonction du taux de cisaillement appliqué
343 dans le rhéomètre capillaire. Les concentrations en MES des échantillons prélevés sont indiquées dans la
344 légende de chaque courbe.

345 Pour l'ensemble des échantillons prélevés, les boues présentent un comportement non-newtonien
346 rhéofluidifiant, typique des boues activées, leur viscosité diminuant avec l'augmentation du taux de
347 cisaillement appliqué. Pour les boues issues des bassins d'aération, la viscosité apparente de la file densifiée
348 est systématiquement supérieure à celle de la ligne témoin. Bien que dans le cas de la campagne C1, cette
349 différence peut être éventuellement attribuée à la différence de concentration en MES, les résultats obtenus
350 lors de la campagne C2 font apparaître cette même tendance malgré une concentration en MES équivalente
351 (3,0 et 3,3 g/L respectivement pour les deux files), illustrant un comportement rhéologique différent entre les
352 deux files.

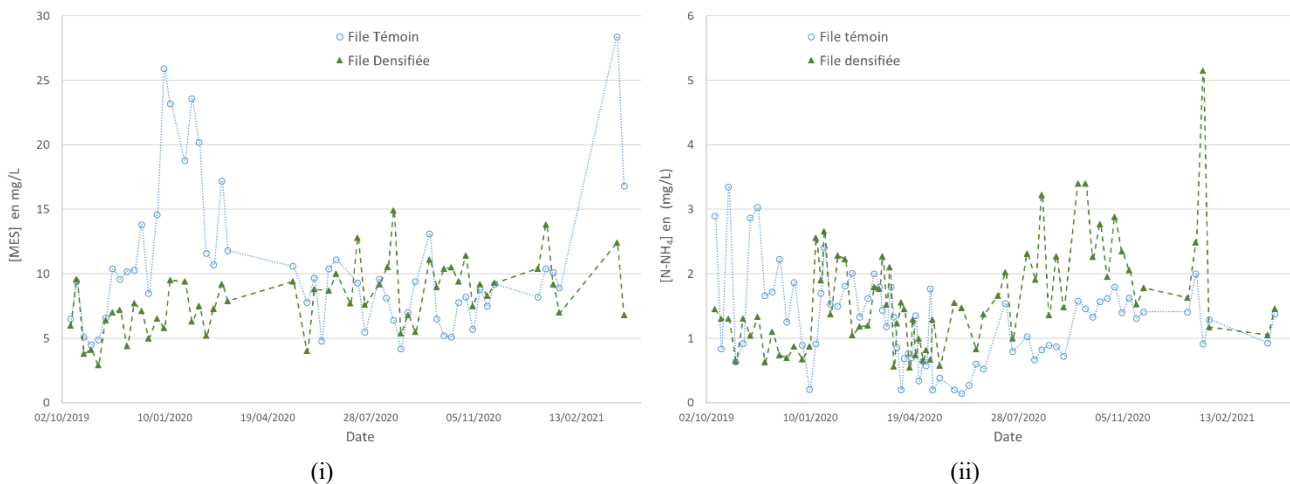
353 Ces différences de comportement sont également illustrées par l'impact de la concentration en MES sur les
354 propriétés rhéologiques des boues issues des boucles de recirculation des deux files. En effet, sur l'ensemble
355 de la gamme de taux de cisaillement étudiée, la viscosité apparente des boues issues de la recirculation de

356 la ligne densifiée est systématiquement inférieure à celle de la ligne témoin. De plus, pour un taux de
357 cisaillement donné, la viscosité apparente des boues issues de la ligne densifiée n'est que faiblement
358 influencée par la concentration en MES de ces dernières, contrairement aux boues issues de la file témoin qui
359 suivent une évolution conforme aux évolutions généralement constatées pour les boues activées
360 conventionnelles (DURAN et al., 2016).

361 Ces tendances peuvent potentiellement être expliquées par les propriétés granulométriques différentes des
362 deux boues présentées précédemment. En effet, les évolutions observées sur la cohésion des floccs
363 biologiques semblent indiquer une plus grande densité des floccs biologiques pour la file densifiée en
364 comparaison de la file témoin, ce qui est cohérent avec les valeurs mesurées par ROCHE et al. (2022). Cette
365 densité se traduirait par une structure plus resserrée comprenant moins de liaisons faibles et lâches se
366 déstructurant facilement sous l'application d'un cisaillement, tel qu'attendu. Aussi, pour une même quantité de
367 MES, du fait de cette structure resserrée, les boues densifiées occuperaient un volume et une surface totale
368 développée significativement inférieurs à la boue issue de la file témoin. Ces propriétés pourraient donc se
369 traduire, toujours pour une même concentration en MES, en une « consistance » inférieure et un
370 comportement rhéofluidifiant moins marqué par rapport à ceux observés pour les boues issues de la file
371 témoin.

372 2.2.4. Performances de traitement – Analyse comparée des files témoin et densifiée

373 Les concentrations en matières en suspension (MES) et en N-NH₄ mesurées en sortie des clarificateurs des
374 deux files étudiées sont représentées sur la Figure 9.

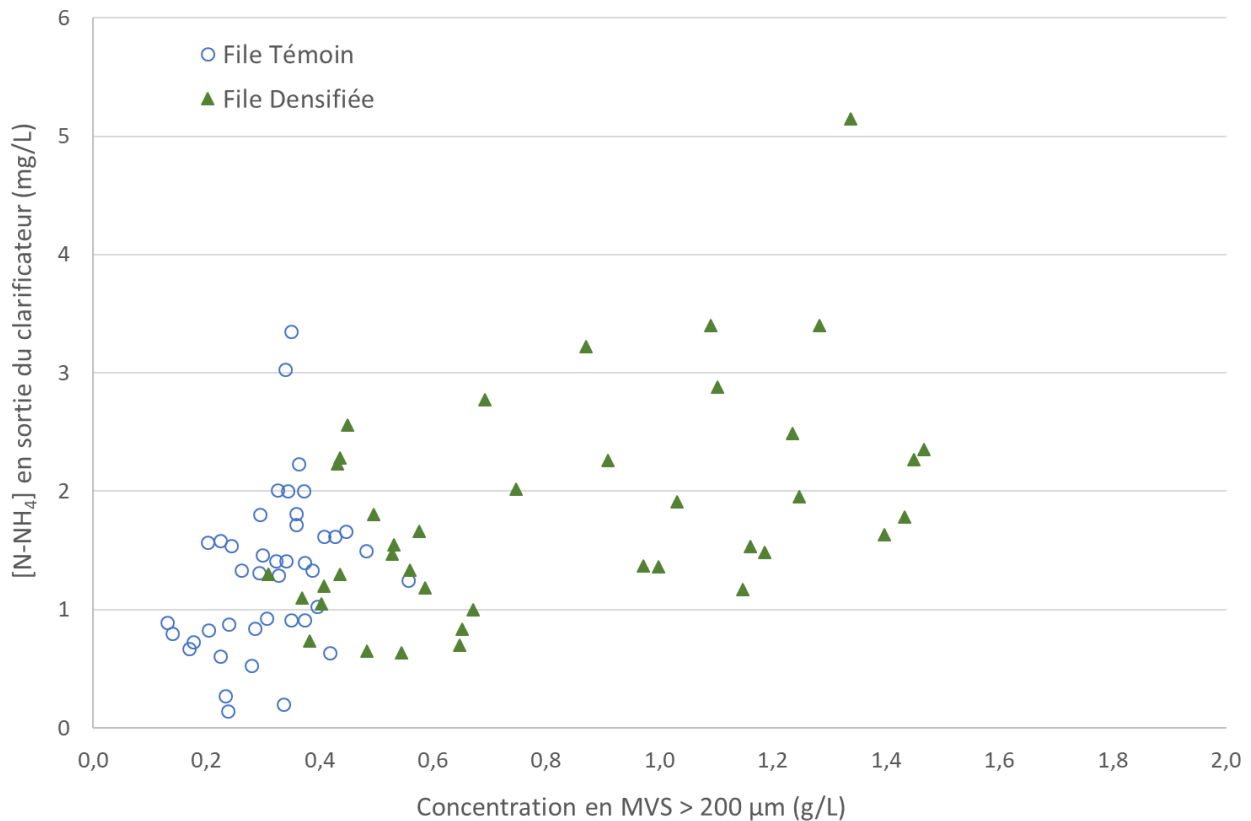


375 Figure 9. Evolution des MES (i) et de l'azote ammoniacal (ii) en sortie des clarificateurs des files témoin et
376 densifiée

377 Les performances de traitement de la DCO soluble sont similaires pour les deux files (données non montrées),
378 alors que les MES en sortie de la file densifiée sont significativement moins élevées que celles de la file témoin
379 pendant les périodes correspondant à l'augmentation de l'indice de boues en période hivernale pour la file
380 témoin (cf. Figure 5).

381 A partir de mai 2020, la concentration d'azote ammoniacal semble légèrement plus élevée sur la file densifiée,
382 y compris pour des périodes de charge similaire. Les mesures de concentration en oxygène dissous et de
383 débit d'air insufflé indiquent une puissance d'aération insuffisante pour maintenir une concentration moyenne

384 en oxygène élevé dans cette période. Cette limitation pourrait être imputée à deux facteurs : la limitation de la
385 diffusion en oxygène dans des particules de plus grande taille, et/ou l'impact de ces particules sur le transfert
386 d'oxygène. Comme indiqué sur la *Figure 10*, un lien semble en effet exister entre la taille des particules et la
387 concentration en N-NH₄ en sortie des clarificateurs.



388

389 Figure 10. Relation N-NH₄ et concentration de MVS de taille supérieure à 200 µm

390 Des mesures complémentaires sont nécessaires pour préciser l'impact de la taille des particules sur le
391 transfert d'oxygène, les quelques mesures publiées n'étant pas conclusives (CECCONI et al., 2019).

392 Il n'a pas été noté d'évolution de la durée d'aération par jour, alors que le débit d'air total insufflé pour une
393 même demande en oxygène (déterminée à partir des charges en DCO et en azote éliminées) semble être
394 supérieur en début de période de mesure qu'en fin de suivi (Tableau I). Le débit d'air insufflé sur la file témoin
395 n'a malheureusement pas été mesuré, suite à un dysfonctionnement du débitmètre. Il conviendrait de préciser
396 si les capacités d'aération des deux types de biomasse sont similaires ou non, comme supposé par STRUBBE
397 et al. [2022]. En lien avec les capacités de transfert d'oxygène, les limites de nitrification de la biomasse
398 densifiée devront être précisées, de même que l'évolution de la masse de biomasse nitrifiante après la mise
399 en place du dispositif. Enfin, les puissances à installer pour garder les matières en suspension mériteraient
400 également d'être précisées.

401 Conclusion

402 L'analyse des données de fonctionnement de la batterie d'hydrocyclones installée sur l'une des files de
403 traitement biologique de la station d'épuration de Dijon conduit aux conclusions suivantes :

404 - Le dispositif permet de maintenir un indice de boues constant et inférieur à 100 mL/g tout au long de la
405 période, alors que l'indice de boues de la file témoin suit une évolution saisonnière classique, fonction de la
406 température dans le réacteur biologique. Contrairement à la file témoin, les MES en sortie de clarificateur ne
407 se dégradent pas en période de développement de bactéries filamenteuses.

408 - Les boues biologiques de la file densifiée présentent un diamètre médian supérieur à ceux de la file témoin.
409 De plus, leur structure semble plus dense comme impliquant une meilleure résistance aux variations de
410 cisaillement. Cette structure différente semble être à l'origine de différences de comportement rhéologique
411 entre les deux files de traitement. En effet, l'influence de la concentration en MES sur la viscosité apparente
412 des boues de la ligne densifiée s'avère très limitée, en comparaison des variations mesurées sur la ligne témoin,
413 classique des boues activées.

414 - Hormis une meilleure stabilité sur les MES, les performances de traitement obtenues sont similaires à celles
415 de la file témoin, avec un point d'attention à porter sur les capacités de nitrification de la biomasse densifiée.
416 La limitation d'oxygène notée pourrait être imputée à un impact de la taille des particules sur le transfert
417 d'oxygène, ou à une diffusion plus faible de l'oxygène dans les particules.

418 - La pression de sélection imposée ne conduit pas à une augmentation continue de la concentration en
419 matières minérales dans le système. Celle-ci se stabilise à une valeur qui semble dépendre de la concentration
420 en matières minérales en entrée de la batterie de cyclones.

421 Des mesures complémentaires sont à réaliser afin de préciser les limites du système, notamment en termes
422 de capacité nitrifiante et d'impact de son installation sur les performances énergétiques (puissances requises
423 d'aération et d'agitation, notamment). Elles conduiront certainement à une redéfinition des règles usuelles de
424 dimensionnement, particulièrement la concentration maximale des boues et la vitesse ascensionnelle limite
425 des clarificateurs.

426 **Remerciements**

427 Les auteurs remercient DEGREMONT FRANCE ASSAINISSEMENT et SUEZ International pour le
428 financement de l'analyse des résultats obtenus sur le site de Dijon. Matthieu DOREL et Sylvain PAGEOT
429 (INRAE, UR PROSE) sont également vivement remerciés pour la réalisation des mesures de rhéologie et de
430 granulométrie sur site.

431

432

433 **Bibliographie**

434 AVILA, I., FREEDMAN, D., JOHNSTON, J., WISDOM, B., MCQUARRIE, J. (2021) : « Inducing granulation
435 within a full-scale activated sludge system to improve settling. » *Water Science and Technology* : 84.2: 302-
436 13.

437 CECCONI, F. MANEL GARRIDO-BASERBA, M. ESCHBORN, R. DAMERELD, J., ROSSO, D. (2019) : «
438 Oxygen transfer investigations in an aerobic granular sludge reactor. » *Environmental Science: Water
439 Research & Technology*; 6(3) : 679-90.

440 DERONZIER G., SCHÉTRITE S., RACAULT Y., CANLER J-P., LIÉNARD A., HÉDUIT A., DUCHÈNE PH.

441 (2002) : *Traitement de l'azote dans les stations d'épuration des petites collectivités*. Document technique
442 FNDAE n° 25, 79 p.

443 DURAN QUINTERO, C. (2015) : *Comportement rhéologique des boues activées : mesures, modélisation et*
444 *impact sur le transfert d'oxygène dans les bioréacteurs aérés* [thèse]. Toulouse : Université de Toulouse, 253
445 p.

446 DURAN, C., FAYOLLE, Y., PECHAUD, Y., COCKX, A., GILLOT, S. (2016) : « Impact of suspended solids on
447 the activated sludge non-newtonian behaviour and on oxygen transfer in a bubble column. » *Chemical*
448 *Engineering Science*, 141 : 154-65.

449 FILALI, A., HAUDUC, H., RIEGER, L., PHILIPPE, L., NAULEAU, F., GILLOT, S. (2015) : « Analyse et
450 consolidation de données de fonctionnement des stations d'épuration : une étude de cas. » *Techniques,*
451 *Sciences et Méthodes*; 12 : 105–35.

452 FORD, A., RUTHERFORD, B., WETT, B., BOTT, C. (2016) : *Implementing hydrocyclones in mainstream*
453 *process for enhancing biological phosphorus removal and increasing settleability through aerobic granulation*.
454 Conférence WEFTEC 2016, New Orleans, Louisiana, Etats-Unis.

455 PECHAUD Y., PAGEOT S., GOUBET A., DURAN C., GILLOT S., Fayolle Y. (2021) : « Size of biological flocs
456 in activated sludge systems: Influence of hydrodynamic parameters at different scales. » *Journal of*
457 *Environmental Chemical Engineering*; 9(4) : 105427.

458 REGMI, P., JIMENEZ, J., MURTHY, S., WETT, B., HIRIPITIYAGE, D., STURM, B. (2019) : *Impact of*
459 *Hydrocyclone based wasting on settling characteristics and nutrient removal*, Conference WEFTEC 2019,
460 Chicago, Illinois, Etats-Unis.

461 REGMI, P., STURM, B., HIRIPITIYAGE, D., KELLER, N., MURTHY, S., JIMENEZ, J. (2022) : « Combining
462 continuous flow aerobic granulation using an external selector and carbon-efficient nutrient removal with AvN
463 control in a full-scale simultaneous nitrification-denitrification process. » *Water Research*; 210 : 117991.

464 RIEGER, L., GILLOT, S., LANGERGRABER, G., OHTSUKI, T., SHAW, A., TAKACS, I., WINKLER, S. (2012) :
465 *Guidelines for Using Activated Sludge Models*, IWA Publishing, ISBN: 9781843391746, London, UK, 312 p.

466 ROCHE, C., DONNAZ, S., MURTHY, S., & WETT, B. (2022) : « Biological process architecture in continuous-
467 flow activated sludge by gravimetry: Controlling densified biomass form and function in a hybrid granule–floc
468 process at Dijon WRRF, France. » *Water Environment Research* : e1664.

469 ROCHE, C., MEILLIEZ, M., GIGNIER, E., WETT, B. (2020) : *Retour d'expérience sur une unité de*
470 *démonstration en densification des boues activées : décanter plus vite pour une performance plus robuste*.
471 Journées Information Eaux, Conférence, Poitiers, 6-8 octobre 2020.

472 STRUBBE, L., PENNEWAERDE, M., BAETEN, J.E., VOLCKE E.I.P. (2022) : «Continuous aerobic granular
473 sludge plants: Better settling versus diffusion limitation. » *Chemical Engineering Journal*; 428 : 131427.

474 WETT, B., PODMIRSEG, S. M., GOMEZ-BRANDON, M., HELL, M., NYHUIS, G., BOTT, C., MURTHY, S.
475 (2015) : « Expanding DEMON sidestream deammonification technology towards mainstream application. »
476 *Water Environment Research*; 87(12) : 2084–89.

477 WILLOUGHBY, A., BROOKS, M., ANGELOTTI, B., FITZGERALD, C., FLEISCHER, E., GALLAGHER, T.,

478 Constantine, T., SUN, Y. (2020) : *Wasting through the spin cycle: a full-scale demonstration of WAS*
479 *hydrocyclones to provide capacity improvements*. Conférence WEFTEC 2020, New Orleans, Louisiana, Etats-
480 Unis.
481

		Charge massique		Débit d'alimentation des hydrocyclones	Durée d'aération		Ratio débit d'air / demande en O ₂
		kg DBO ₅ /kg MVS/j		m ³ /j	h/jour		Nm ³ /kg O ₂
Période	Dates	File Témoin	File Densifiée	File Densifiée	File Témoin	File Densifiée	File Densifiée
1	31/01/20- 12/03/20	0,08	0,09	1118	12,9	12,5	13,4
2	14/05/20- 14/07/20	0,05	0,11	1305	11,1	16,2	14,5
3	17/01/21- 28/01/21	0,06	0,12	1413	12,1	11,2	10,0
4	20/03/21- 05/05/21	0,07	0,09	1398	n.d.	n.d.	n.d.

484 Tableau I. Conditions de fonctionnement des files densifiée et témoin pour les 4 périodes identifiées