

BONNEAU Jérôme
2^{ème} année cycle ingénieur

Elève ingénieur Environnement



ETUDE DE FAISABILITE D'UNE MISE EN PLACE DE REGULATION PAR LOGIQUE FLOUE, SUR UNE CENTRIFUGEUSE A BOUES FONCTIONNANT EN EPAISSISSEMENT.



USINE D'EPURATION D'EAU SEINE AMONT A VALENTON (94)
ECOLE DES METIERS DE L'ENVIRONNEMENT **ANNEE 1997-1998**

ABSTRACT

L'objectif initial de ce stage d'une durée de 3 mois sur le site de l'usine d'épuration de Valenton (1,2 MEqH) était d'étudier la faisabilité de l'optimisation de l'atelier de centrifugation par la mise en place de régulation par logique floue sur des centrifugeuses à boues fonctionnant en épaissement.

Ce type de centrifugeuse, encore assez peu répandu, est utilisé à Valenton pour épaisir des boues en excès (à environ 4g/L) provenant du circuit de recirculation entre le bassin d'aération et le clarificateur, et destinées, après épaissement, à la digestion anaérobie.

A l'heure actuelle, la régulation de la Vr de la centrifugeuse est de type PID, sa consigne est la concentration de sortie désirée, c'est-à-dire que la Vr (vitesse relative de la vis par rapport au bol de la centrifugeuse) est asservie à la mesure de concentration de la boue centrifugée de sortie. Il s'agit ainsi d'une régulation aval.

Une bonne régulation de la centrifugeuse est obtenue lorsque l'écart entre la mesure de la concentration en sortie et la consigne est voisin de 0, cette consigne est fixée à 40 g/L.

Il s'avère que cette régulation n'est pas optimale et ne permet pas de rester à la valeur de consigne de façon stable. Aussi, il a été envisagé de l'expertiser pour mieux comprendre ce process, le fonctionnement exact de la centrifugeuse et de connaître son comportement face à diverses situations. Aussi, il a d'abord été nécessaire de fiabiliser et de valider toutes les mesures entrant dans le process et plus particulièrement, la mesure de concentration des boues centrifugées.

Les essais réalisés, en production, ont permis, de mettre en évidence certaines particularités du process, de l'améliorer dans sa fiabilité, et ont permis d'éclairer les zones d'ombre du fonctionnement de ce type de décanteuse encore mal connue. Ceci a entre autre débouché sur une abaque de principe, outil d'exploitation au quotidien, laissée à l'exploitant, lui donnant les moyens de mieux gérer ses consignes de fonctionnement tout en restant dans certaines limites liées à la centrifugeuse.

L'étude a également mis en évidence qu'une régulation par logique floue optimisant le fonctionnement de l'atelier centrifugation n'est pas, à l'heure actuelle, envisageable sur ce type de machine, notamment à cause d'un manque de réactivité des centrats face à des dérives du système et une non linéarité de fonctionnement sur la Vr. De plus, l'objectif de l'épaissement est bien de maîtriser les concentrations des bassins et non de faire marcher la machine au mieux de ses capacités.

SOMMAIRE

I. DEGREMONT ÇA COULE DE SOURCE !!	6
II. LE SUJET (POURQUOI, OU, COMMENT ...)	6
III. L'USINE D'EPURATION DE VALENTON OU COMMENT TRAITER 300 000 M³/J	7
A. Historique et caractéristiques de la station	7
1. Débits entrants	8
2. Flux de pollution	8
3. Qualité du rejet	8
B. Le process	8
1. Filière eau	9
A) traitement physique	9
1 - Le dégrillage	9
2 - Le dessablage	10
3 - Le déshuilage	10
4 - Décantation primaire	11
b) Traitement biologique	11
1 - Aération	12
2 - Les zones anoxiques :	13
3 - Clarification	13
2. Filière boues	15
1 - Centrifugation	15
2 - Digestion	15
3 - Epaissement	16
4 - Conditionnement	16
5 - Déshydratation	17
6 - Incinération	17
3. Schéma récapitulatif de traitement	19
4. Les équipements annexes	20
1 - Désodorisation	20
2 - Gaz	20
3 - Eau industrielle	20
IV. GENERALITES SUR L'EPAISSISSEMENT PAR CENTRIFUGATION	21
A. Le fonctionnement d'une décanteuse centrifuge	21
1. Théories de la séparation :	21
2. Gravité et force centrifuge :	22
3. La loi de Stokes :	23
B. Domaines d'application	23
1. En traitement des eaux :	23
2. Autres applications :	23
C. Paramètres d'exploitation	24
1. Vitesse absolue du bol V_A :	24
2. Vitesse relative V_R :	24
3. Profondeur de l'anneau liquide :	25
4. Centrifugabilité des boues:	25
V. PRESENTATION DU PROCESS	26
A. Circuit des boues	26
B. Le circuit des centrats	26
C. Le skid de mesure	27
1. Introduction	27
2. Le fonctionnement du skid	27

a) Schéma de l'installation :	27
b) Principe de fonctionnement :	27
3. La sonde de mesure	28
VI. LA REGULATION	28
A. Les régulations classiques	28
1. La régulation TOR (Tout Ou Rien) :	28
2. La régulation standard :	28
3. Fonction de transfert d'un régulateur standard :	29
B. La régulation par Logique Floue	29
1. Historique :	30
2. Principe fondamental de la logique floue :	31
3. Réglage et commande par logique floue dans l'application industrielle :	32
4. Structure d'un contrôleur floue :	33
5. Fuzzification :	33
6. Les inférences :	33
7. Défuzzification :	34
8. Conclusion sur la logique floue	34
VII. EXPERTISE, ESSAIS ET MODELISATION	35
A. Introduction	35
B. Variables d'entrée/sortie	35
C. Phase 1 : Installation, familiarisation avec le process	36
1. Le cablage de l'enregistreur	36
2. Validation des mesures enregistrées	36
D. Phase 2 : Les paramètres de fonctionnement, expertise avant essais	36
1. Le débit d'alimentation	36
2. L'utilisation du polymère	36
3. La boue en excès entrante	37
4. La régulation en place	37
5. Conclusion sur l'expertise avant essais	38
E. Phase 3 : Validation des mesures, Dysfonctionnements observés et solutions mises en œuvre pour y remédier	38
1. Mauvaise corrélation entre concentration boue centrifugée et boue mélangée	38
2. Mauvaise régulation lorsque le commutateur a été basculé en Manu sur l'armoire électrique de la centrifugeuse	38
3. Mode de rinçage des sondes inefficace	39
4. Corrélation MeS entrée/centrats et dysfonctionnement électrovanne de rabattage mousse,	40
5. Décrochages des courbes de concentration	41
6. Conclusion sur la validité des mesures	43
F. Phase 4 : Essais en vue d'une mise en place de régulation par Logique Floue	43
1. Essais d'identification, afin d'optimiser les réglages du PID	43
2. Essais de variation de débit (Régulation en Auto)	44
3. L'évolution des centrats en fonction de l'évolution du système	46
4. Variations de Vr à CM constante et influence sur la concentration des boues centrifugées	46
5. Modélisation du comportement de la centrifugeuse suivant le type de Charge Massique entrante	47
6. Conclusion sur la mise en place de la logique floue	48
VIII. CONCLUSION	49
IX. BIBLIOGRAPHIE	50
X. REMERCIEMENTS	51
XI. ANNEXES	52
A. ANNEXE 1 : L'élimination de la pollution azotée	52
B. ANNEXE 2 : constitution d'une boue	54

1. Matière en suspension (mes) dans les boues liquides _____	54
a) Méthode par centrifugation (ce qui j'ai généralement utilisé): _____	54
b) Méthode par filtration : _____	54
2. Résidu sec ou matières sèches (ms) : _____	55
a) Résidu sec à 105 °C _____	55
b) Résidu sec à 550°C et matières volatiles (MV) : _____	55
C. ANNEXE 3 : Mode opératoire de rinçage du circuit de mesure _____	56

I. DEGREMONT ÇA COULE DE SOURCE !!

Degrémont, filiale du Groupe Lyonnaise des Eaux-Dumez est une entreprise d'ingénierie spécialisée dans la construction de stations de traitement des eaux résiduaires urbaines et industrielles.

L'entreprise possède une compétence sur l'ensemble des traitements d'eaux permettant de satisfaire les besoins des collectivités locales et industries quelle que soit la taille des installations ou la complexité des process. Degrémont développe également des activités de service tel que l'après-vente, la fabrication et la commercialisation de produits entrant dans le process du traitement de l'eau, la réhabilitation d'installations ou encore, comme c'est le cas à Valenton, l'exploitation de stations.

L'exploitation de la station de Valenton a été confiée par le SIAAP (Syndicat Interdépartemental d'Assainissement de l'Agglomération Parisienne) à la société ESA (Exploitation Service Assainissement), filiale commune de Degrémont Exploitation et d'OTV.

II. LE SUJET (POURQUOI, OU, COMMENT ...)

Le stage qui m'a été proposé par Jacques AUDIBERT du département Recherche et Développement du CERDEG (Centre d'Etude et de Recherche Degrémont) est parti de l'idée qu'il serait envisageable de réguler des centrifugeuses en épaissement de boues de façon plus optimisée, par Logique Floue. Ce type de régulation fonctionne actuellement parfaitement sur plusieurs sites pour des centrifugeuses à boues en déshydratation.

Le site de Valenton (Usine d'épuration d'eau "Seine Amont") a été retenu pour réaliser cette étude puisque le site utilise depuis peu des décanteuses centrifuges pour épaisir ses boues en excès avant de les envoyer en digestion.

L'étude comportera plusieurs phases : une première phase de recherche bibliographique au CERDEG, une deuxième phase sur site d'expertise, une troisième phase de validation des mesures et une dernière phase d'essais en vue de modéliser au mieux le comportement de la centrifugeuse dans diverses situations, afin d'envisager la mise en place éventuelle d'une régulation par logique floue sur le process.

Toute cette étude sera réalisée sur site, c'est-à-dire en production, et de ce fait je serais très limité dans mes essais par les contraintes liées à l'exploitation, n'étant pas indépendant du reste de la station comme sur un pilote d'essais, je réaliserais mes essais en accord avec le responsable d'exploitation dans la mesure où je ne perturberais pas significativement le process.

III. L'USINE D'EPURATION DE VALENTON OU COMMENT TRAITER 300 000 M³/J

A. HISTORIQUE ET CARACTERISTIQUES DE LA STATION

1987- 1988 : mise en service de la première ½ tranche de l'usine d'épuration "Seine Amont" (Valenton); capacité 150 000 m³/j.

1992 : mise en service de la seconde ½ tranche; capacité globale ainsi portée à 300 000 m³/j; soit en moyenne 12 500 m³/h. La capacité de pointe horaire est ainsi d'environ 18 750 m³/h.

Horizon 2015 : doublement de la capacité de l'usine, c'est-à-dire passage à 600 000 m³/j par temps sec et 21 m³/s par temps de pluie pour un débit journalier de 1,5 millions de m³.

L'usine de Valenton, constituée de 4 files d'eau parallèles, elles-mêmes composées d'un décanteur primaire, d'un aérateur et de deux clarificateurs en parallèle, traite la majeure partie des eaux usées du département du Val de Marne, sa capacité de 300 000 m³/j, correspond à environ 1,2 million d'équivalent habitants.

L'eau traitée par la station est rejetée en Seine à Alfortville par l'intermédiaire d'un émissaire de plusieurs kilomètres. Le traitement comprend à la fois la pollution carbonée et la pollution azotée.

1. DEBITS ENTRANTS

. capacité moyenne journalière	300 000 m ³ /j
. capacité moyenne horaire	12 500 m ³ /h
. capacité de pointe horaire	18 750 m ³ /h

2. FLUX DE POLLUTION

. DCO (Demande Chimique en Oxygène).....	189,3 t/j
. DBO (Demande Biologique en Oxygène)....	97,5 t/j
. MeS (Matière en Suspension).....	72,4 t/j
. NNTK (azote Kjeldahl).....	19,2 t/j
. NNH ₄ (azote ammoniacal)	16,1 t/j

3. QUALITE DU REJET

La norme impose que l'effluent épuré réponde aux objectifs de qualité suivants :

.DCO	< 90 mg/L
.DBO ₅	< 20 mg/L
.MeS	< 30 mg/L
.NTK.....	< 10 mg/L

Ces objectifs doivent être obtenus 95% du temps.

On note en outre que la pollution rejetée par habitant, selon les statistiques françaises (*mémento technique de l'eau*), est de :

- 70 à 80 g/jour de matières en suspension (MES)
- 35 g/jour de demande chimique en oxygène (DCO) sur une eau décantée
- 60 à 70 g/jour de demande biochimique en oxygène (DBO₅) sur une eau prétraitée
- 10 à 15 g/jour de NTK

En exploitation on obtient en fait des valeurs bien inférieures à la norme requise :

.DCO	< 70 mg/L
.DBO ₅	< 20 mg/L
.MeS	< 25 mg/L
.NTK.....	< 4 mg/L

Les DBO₅ correspondent aux matières vivantes consommant l'oxygène dissous dans l'eau à traiter. Les DCO regroupent les matières de toutes natures consommant de l'oxygène, dont les DBO₅. Le rapport entre les deux pour des eaux résiduaires urbaines est principalement compris entre 2 et 2,5.

B. LE PROCESS

Le but de l'épuration est de restituer au milieu naturel des effluents qui, après traitement physico-chimique et biologique, présentent un risque de pollution minimal pour l'environnement.

L'effluent brut subit un traitement physique suivi d'un traitement biologique. L'eau ressort alors épurée de la station. Finalement, la pollution initialement présente dans l'eau est concentrée dans les boues, pour être détruite ; c'est l'objet du traitement des boues.

1. FILIERE EAU

A) TRAITEMENT PHYSIQUE

Objectif : Eliminer les éléments volumineux, lourds, gras,... qui seraient gênants pour le traitement biologique.

Les eaux résiduaires urbaines , ainsi que les eaux de pluie, arrivant en entrée de station sont chargées de nombreux corps étrangers, qui ne sont pas biodégradables . L'eau est collectée par un réseau d'égouts, le relèvement, amenant la totalité de celle-ci au poste toutes eaux . A cet endroit, l'effluent est chargé de tout ce qui est rejeté par l'homme, ou déplacé par les courants .

Aussi, le prétraitement est destiné à extraire de l'eau brute la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature ou la dimension constituerait une gêne pour les traitements ultérieurs.

Lors du prétraitement, deux actions interviennent pour préparer l'eau à son entrée dans les bassins biologiques : Dégrillage et Dessablage/déshuilage simultanés.

1 - Le dégrillage

Il s'agit essentiellement d'une protection pour les installations situées en aval de la station.

Objectif : Eliminer les matériaux encombrants (bois, chiffons, plastiques, etc.) et ainsi,

- protéger les ouvrages aval contre l'arrivée de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation
- séparer et évacuer facilement les matières volumineuses charriées par l'eau résiduaire, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements suivants, ou en compliquer l'exécution .

Principe : passage des effluents à travers des grilles, pour retenir les matières de taille supérieure.

Réalisation : Une grille grossière (80 mm) puis une grille fine (20 mm) en série à nettoyage automatique. Les refus de grilles sont évacués par bennes compacteuses vers des sites de traitement d'ordures ménagères.

2 - Le dessablage

Objectif : Retenir les sables et autres matières minérales maintenus en suspension par le courant et ainsi,

- éviter les dépôts dans les canaux et conduits ainsi que dans les pompes
- protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion
- éviter de perturber les stades de traitement suivants.

L'action est portée ici sur les particules d'au moins 200µm.

Principe : Décantation de ces éléments dans des canaux par diminution de la vitesse de transfert.

Réalisation : Deux ouvrages à double fonction dessableur-déshuileur. Chaque dessableur est constitué de 3 canaux longitudinaux à fond tronconique avec pont mobile muni de pompes qui aspirent les sédiments vers un lavage puis stockage en trémies. Les sables sont évacués en décharge.

Le temps de séjour dans les dessableurs est d'environ 12 mn.

Lorsque le pont-mobile est sur le retour, un racleur de surface s'abaisse et conduit les graisses vers un réservoir de stockage où elles seront traitées ultérieurement .

Pont dessableur-deshuileur

3 - Le déshuilage

Le dégraissage, utilisé en parallèle avec le dessablage, a l'avantage de permettre un dimensionnement de l'ouvrage moins conséquent.

Objectif : Eliminer les flottants, généralement gras, de densité inférieure à celle de l'eau.

Principe : Flottation de ces particules par insufflation d'air diffusé dans le fond des canaux engendrant la formation "d'écumes".

Réalisation : Le pont mobile du dessableur est muni de racleurs qui enlèvent la couche superficielle d'écumes au niveau de la zone de déshuilage. Les écumes concentrées sur un séparateur, sont envoyées en digestion.

Après le prétraitement, les effluents prétraités sont partagés sur 4 files d'eaux parallèles, où ils subissent le même type de traitement.

4 - Décantation primaire

Objectif : Retenir une partie des matières en suspension (MES) les plus lourdes.

Principe : Décantation par diminution de la vitesse de transfert dans des bassins engendrant une accumulation de boue appelée "boue primaire".

Réalisation : L'eau prétraitée entre dans un bassin circulaire de 52 mètres de diamètre muni d'une charpente de raclage à entraînement central. Le temps de séjour moyen de l'eau est de 3h ½ . La boue primaire est raclée vers une fosse centrale de 600 m³ où elle s'épaissit avant d'être pompée. Elle est alors traitée dans "la filière boue".

Les traitements physiques permettent l'élimination d'environ 50 à 60 % des matières en suspension.

Décanteur primaire vidé

b) TRAITEMENT BIOLOGIQUE

Objectif : Eliminer la pollution restante à majorité organique qui se présente sous forme dissoute ou colloïdale non décantable. Il se compose de l'Aération et de la Clarification.

1 - Aération

Objectif : Faire dégrader la pollution organique et minérale présente dans l'eau décantée, par la population de micro-organismes qui y vit naturellement.

Principe : Bassin en deux parties : la première, dans lequel on insuffle suffisamment d'air pour entretenir les conditions favorables au développement des micro-organismes qui vont consommer la pollution carbonée et nitrifier et la deuxième partie anoxique dans laquelle les micro-organismes réaliseront l'élimination de la pollution azotée avec la dénitrification.

Bassin d'aération en vue de dessus

Réalisation : Un bassin circulaire de 68 m de diamètre, de 30 000 m³ de volume pour V1A et 33 000 m³ pour V1B, dont 25 000 m³ de zone aérée, où s'opère la nitrification, en même temps que la destruction de la pollution carbonée, et 5 000 m³ de zone anoxique (8 000 m³ pour V1B), nécessaires à la dénitrification.

L'aération est réalisée au moyen d'un réseau de 8700 diffuseurs (disques poreux) assurant la distribution de l'air sous forme de micro-bulles.

Cet air ainsi distribué assure deux fonctions :

- l'apport d'oxygène nécessaire au développement des bactéries,
- le brassage de la liqueur aérée afin d'homogénéiser le mélange et d'éviter la décantation des micro-organismes qui sont agglomérés en floes.

Le temps de séjour moyen en zones aérées est de 8 heures.

La pollution organique (DCO, DBO) est dégradée par l'aération.

Il faut donc maintenir une quantité d'oxygène dissous de 2 à 3 mg/l pour obtenir de bons résultats en DCO, DBO, NTK.

Il y a parfois incompatibilité entre le besoin d'air pour maintenir les poreux en bon état, et les besoins pour le traitement. De ce fait, les zones d'aération sont souvent saturées, ce qui empêche le bon fonctionnement de la régulation, et crée une dépense exagérée en énergie.

De bonnes conditions de traitement de l'eau sont généralement spécifiées par la présence de vorticelles (protozoaires) et de rotifères (métazoaires) et permettent d'inhiber le développement des bactéries filamenteuses, des bactéries tueuses et des bactéries sceptiques.



Disques poreux du bassin d'aération vidé

2 - Les zones anoxiques :

Dans ces zones situées en tête de bassin, on n'insuffle pas d'air. L'oxygène qui s'y trouve est uniquement lié aux nitrates. Les micro-organismes qui y reviennent par la recirculation des boues, ont pour respirer le seul choix de dégrader ces nitrates pour en retirer l'oxygène. L'azote gazeux est libéré en surface. La quantité de nitrates est diminuée. C'est la dénitrification.

Sur les files 1 et 2, constituant la première tranche de construction, la zone anoxie de 5000 m³ est couverte et brassée à l'aide de surpresseurs, qui réinjectent l'azote atmosphérique confiné entre la surface de la boue et la couverture.

Sur la deuxième tranche, afin d'améliorer les performances, suite aux résultats obtenus sur les files 1 et 2, les zones anoxies ont été couvertes, agrandies (8000 m³ au lieu de 5000 m³, c'est-à-dire 1 m de profondeur en plus), et sont désormais homogénéisées avec des agitateurs lents situés en fond de bassin. Les performances de dénitrification sont accrues.

On obtient environ 45 % de dénitrification sur V1A et 55 % sur V1B. En contrepartie, il se produit parfois des phénomènes de moussage avec bactéries filamenteuses sur V1B, chose qui n'est jamais arrivée sur V1A. L'origine de ces moussages n'est d'ailleurs pas élucidé (temps de séjour trop long, insuffisance de brassage, mauvaise homogénéité du milieu,...)

Le temps de séjour moyen en anoxie est de 1 heure ½ sur V1A, et 2 heures ½ sur V1B.

3 - Clarification

Objectif : L'objectif est de séparer les boues activées et l'eau épurée qui les contient en réalisant une décantation. Les boues, ainsi décantées, sont aspirées par un pont suceur.

Principe : Décantation des floccs (agglomération des micro-organismes) par diminution de la vitesse dans les bassins.

Réalisation : Bassin circulaire de 52 m de diamètre muni d'un pont suceur à entraînement central.

Afin de maintenir une biomasse constante dans l'aérateur, toute la boue activée qui décante dans le clarificateur est reprise par succion et renvoyée dans la zone anoxie de l'aérateur par l'intermédiaire de vis d'Archimède. Cette boue est qualifiée de « boue de retour ou de recirculation ».

La boue activée étant constituée de matières vivantes, il convient de réduire au minimum le temps de séjour de celles-ci dans les clarificateurs. Ce temps de séjour est d'environ 5h ½ .

Parfois, une dénitrification prématurée provoque des remontées de boues à la surface des clarificateurs. Les cloisons siphonides retiennent ces boues pour éviter leur entraînement avec l'eau épurée, et les stockent dans les bâches à écumes. Elles sont ensuite pompées pour être recirculées dans les bassins d'aération.

Une petite partie de la boue recirculée est pompée pour être traitée avec les boues. Ce sont les boues en excès. La quantité extraite correspond à la quantité formée par la dégradation des matières polluantes. En théorie, la quantité de boues produites est proportionnelle (avec un coefficient 0.7) à la DBO éliminée dans le bassin.

Cette boue est envoyée en partie dans le décanteur primaire, l'autre partie étant concentrée directement par centrifugation, avant de rejoindre la digestion.

L'eau épurée est envoyée directement en SEINE.

Vue de deux clarificateurs au premier plan

2. FILIERE BOUES

L'épuration des eaux produit des boues qu'il faut traiter :

EFFLUENT BRUT = EAU TRAITEE + BOUES

BOUES FRAICHES = BOUES PRIMAIRES + UNE PARTIE DES BOUES EN EXCES
(renvoyées dans le décanteur primaire)

La boue en excès renvoyée dans le décanteur primaire a pour but de diminuer la densité de la boue primaire afin d'en faciliter le pompage.

Les boues fraîches, qui contiennent entre 80 et 85% de MV, doivent être suffisamment concentrées, avec un minimum d'eau, mais doivent également avoir un temps de séjour le plus court possible à ce stade pour éviter les risques de fermentation (bullage) au sein du décanteur.

Si toutes les boues en excès étaient envoyées dans le décanteur, la fermentation serait trop forte, la décantation difficile, et on n'obtiendrait pas une bonne concentration des boues. Le niveau du lit de boues (nommé voile de boues) monterait dans le décanteur, provoquant acidification, problèmes de digestion, et mauvaises odeurs.

Les boues en excès que l'on n'envoie pas dans le décanteur, sont concentrées à part, par des centrifugeuses. La boue centrifugée, rejoint les boues fraîches avant l'introduction en digestion.

1 - Centrifugation

Objectif : Concentrer les boues en excès afin de déconcentrer les bassins d'aération.

Principe : La centrifugation est un procédé de séparation qui utilise l'action de la force centrifuge pour provoquer la décantation accélérée des particules d'un mélange liquide-solide.

Réalisation : 3 centrifugeuses dimensionnées pour 66 m³/h sans adjuvant, et pouvant aller jusqu'à 100 m³/h avec polymère.

Les caractéristiques des centrifugeuses de modèle D7L sont :

pooids de l'ensemble	=	11 Tonnes
puissance des moteurs	=	132 kW pour le bol et 15 kW pour la vis
débit d'alimentation nominal	=	66 m ³ /h sans polymère et 100 m ³ /h avec polymère
vitesse de bol max.	=	2200 Trs/min sans polymère 2000 Trs/min avec polymère
vitesse relative	=	2 à 20 Trs/min

2 - Digestion

Objectifs :

- Décomposer la matière organique fermentescible pour stabiliser la boue,
- Détruire les germes pathogènes,
- Réduire le volume et le poids de matières.

Principe : Décomposition des boues par des bactéries anaérobies à 37 °C dans un réacteur fermé nommé digesteur. La destruction des matières organiques putrescibles a pour conséquence la formation d'un biogaz à haute teneur en méthane, environ 65 %. Ce gaz est également formé de 30 % environ de CO₂, d'un peu d'azote et des impuretés telles que l'H₂S.

Réalisation :

- 4 digesteurs primaires (2 de 8300 m³, 2 de 9300 m³) en parallèle où s'effectue la première phase de la digestion (temps de séjour moyen : 21 jours) à une température voisine de 37 °C obtenue grâce à des échangeurs de chaleur eau/boue.
- 1 digesteur secondaire (de 7600 m³) non chauffé où s'achève la fermentation (temps de séjour moyen : 5 jours).

Le brassage est assuré par des surpresseurs qui réinjectent dans le digesteur une partie du gaz produit par fermentation. Ce brassage assure une bonne répartition de la température dans toute la masse de boue, facilite le dégazage de la boue, évite la formation d'une croûte à la surface du liquide, et élimine les risques de décantation. La boue digérée ressort aux alentours de 30 g/L pour partir vers les épaisseurs.

3 - Epaissement

Objectif : Concentrer la boue par une diminution de sa teneur en eau. Cette phase s'effectue à l'issue de la digestion.

Principe : Décantation naturelle des particules les plus lourdes et formation d'une couche plus liquide en surface qui est éliminée par surverse.

Réalisation : 4 bassins circulaires de 52 m de diamètre (volume unitaire de 12000 m³) équipés d'une charpente de raclage lent.

Les épaisseurs peuvent être utilisés comme des stockeurs, selon les besoins de l'exploitation. Ils permettent une souplesse pour faire des opérations de maintenance qui nécessitent des arrêts prolongés des équipements de filtration, en aval. La boue épaissie est pompée au centre via la déshydratation.

Vue des 4 épaisseurs

4 - Conditionnement

Objectif : Détruire l'état colloïdal des boues digérées, afin d'en faciliter la déshydratation.

Principe : Ajout d'un polymère cationique qui agglomère les colloïdes en libérant l'eau interstitielle.

Réalisation : Injection du polymère par pompage dans la boue en amont des filtres-presses.

Au démarrage de la station, le conditionnement se faisait par floculation de la boue avec de la chaux et du chlorure ferrique. Les installations existent toujours, mais sont à l'arrêt, ce conditionnement posant des problèmes de compatibilité avec le four d'incinération.

5 - Déshydratation

Objectif : Réduire la teneur en eau des boues.

Principe : Filtration des boues sur filtres-presses

Réalisation : 6 Filtres-presses. Les matières solides sont retenues prisonnières dans les chambres carrée de 1,4 m de coté (140 par filtre) formées par le serrage (à 300 bars) de plateaux légèrement creux, recouverts de toiles filtrantes par lesquelles percole le filtrat (l'eau interstitielle). Les pompes pressent les boues à environ 13 bars, pendant 2 à 4 heures.

Le gâteau de filtration, encore nommé « cake », est récupéré lors des débatissages manuels à l'issue de la filtration, sur des bandes transporteuses, qui le dirigent vers l'incinération ou le parc de stockage.

Ces gâteaux sont composés d'environ 30 % de matière sèche, (70 % d'eau) . Ils sont solides, d'aspect noirâtre, relativement élastiques et représentent la pollution qui a été ôtée des effluents entrés sur la station.

Ainsi au final, 300 000 m³/j d'eau brute se retrouvent concentrées à environ 200 m³/j de cake.

Salle des filtres-presses

6 - Incinération

Objectif : Réduire au minimum le volume final de produit à évacuer ainsi que les nuisances générées par les boues.

Principe : Combustion des boues.

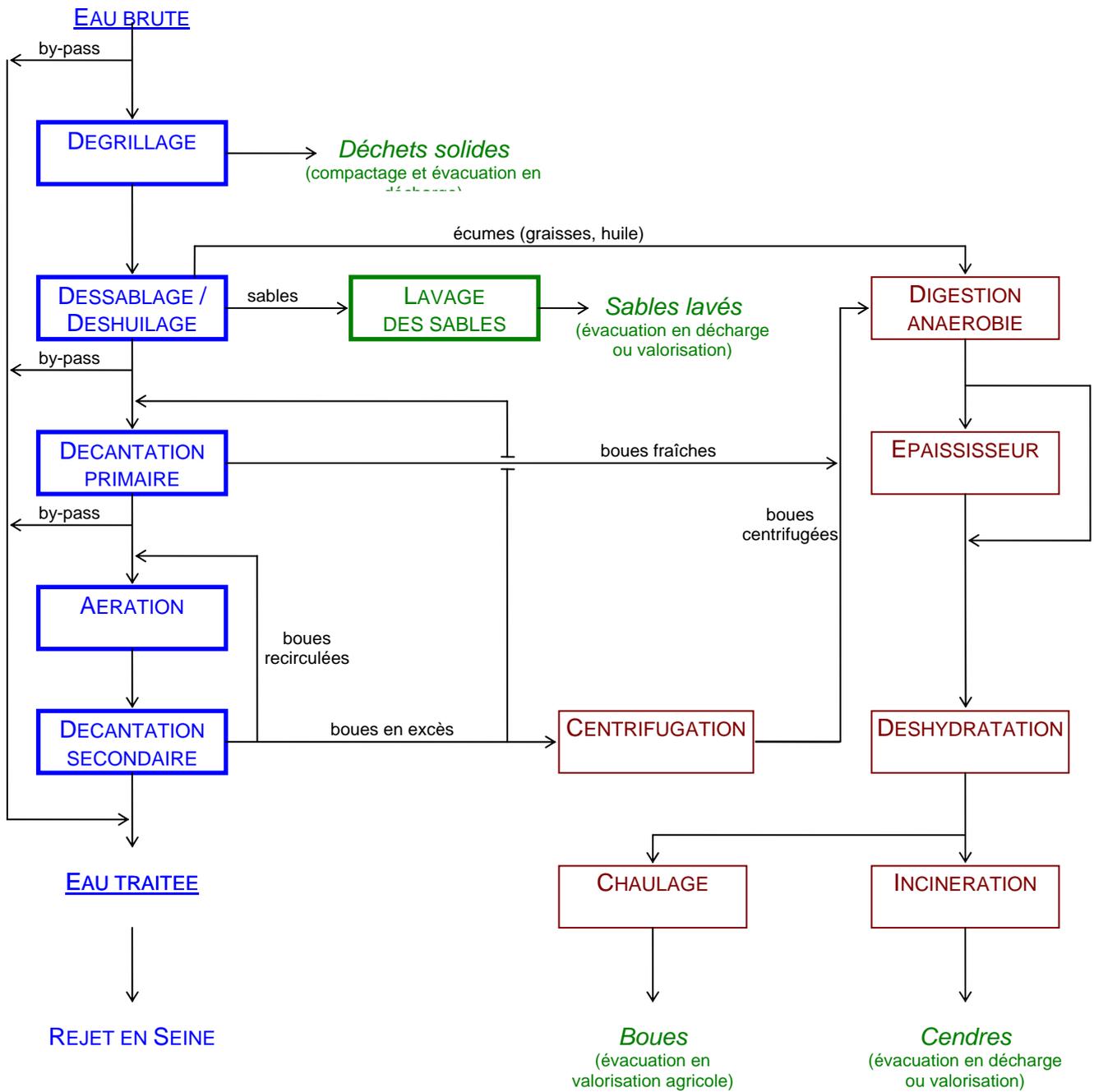
Réalisation : Un four à lit de sable fluidisé à 800 °C permet d'incinérer en continu 8 T/h de cake, introduits par 8 vis d'Archimède.

Les cendres sont récupérées dans un laveur à eau, avant le rejet de la vapeur d'eau par une cheminée.

Les cendres sont la partie minérale de la boue, soit environ 50 % en matières sèches. Elles sont égouttées dans les lagunes, puis transférées sur un parc de stockage avant l'évacuation en décharge.

A l'heure actuelle le four ne fonctionne pas car il est en réhabilitation afin d'être aux normes en ce qui concerne les rejets à l'atmosphère. Les boues sont donc stockées sur aire bétonnée avant d'être envoyées par camions en épandage agricole.

3. SCHEMA RECAPITULATIF DE TRAITEMENT



4. LES EQUIPEMENTS ANNEXES

1 - Désodorisation

Objectif : Supprimer les mauvaises odeurs générées au niveau du prétraitement.

Principe : Lavage chimique de l'air. L'élimination des polluants est régie par les lois de l'échange gaz-liquide. Les principaux polluants peuvent être classés en différentes catégories:

- produits soufrés: H₂S, mercaptans, sulfures
- produits azotés: ammonium, amines, oxydes d'amines, indole, scatole...
- produits organiques divers : acides organiques (acétique, propionique, butyrique....), aldéhydes, phénols.

Les solutions employées pour traiter les produits précédents sont : soude, eau de Javel, acide et parfois eau ozonée. Elles servent, soit à capter le polluant par dissolution simple, soit à le neutraliser par action chimique.

Réalisation : L'ensemble des installations de dégrillage, raclage d'écumes, refus de grille, est placé dans un bâtiment unique d'où l'air est extrait puis désodorisé par trois laveurs en série (acide sulfurique, Javel, et soude).

L'air débarrassé de ses particules malodorantes est relargué dans l'atmosphère et l'eau de lavage est renvoyée en tête de station.

2 - Gaz

Le biogaz, formé dans les digesteurs, par la destruction d'une partie des matières organiques, est tout d'abord stocké dans un gazomètre, à faible pression. Il est ensuite comprimé à environ 3 bars, dans une sphère de stockage.

Le gaz constitue un appoint d'énergie non négligeable :

- Il est brûlé dans les chaudières, afin de réchauffer de l'eau qui circule dans une boucle. Cette eau traverse des échangeurs eau - boue, pour le chauffage à 37 °c des digesteurs. Cette boucle sert également au chauffage des locaux, en hiver.
- Le gaz est également utilisé pour incinérer les boues déshydratées.
- enfin, il est utilisé comme combustible pour les groupes électrogènes, pendant la période d'hiver (écrêtage des heures de pointe et des heures pleines d'hiver).

3 - Eau industrielle

Objectif : Avoir un réseau d'eau non potable pour les besoins de refroidissement, arrosage, dilution, etc.

Principe : - Un réseau en eau tamisée, dite eau industrielle : pompage d'eau en SEINE, tamisage, et stockage dans un château d'eau pour avoir un réseau à environ 3.5 bars.

- Un réseau en eau décarbonatée : Une partie de l'eau industrielle est décarbonatée à la chaux, pour être distribuée sur le refroidissement des pompes, appoint d'eau de la boucle eau chaude. Cette eau est adoucie, en plus de la décarbonatation pour alimenter en appoint les tours de lavage de la désodorisation.

IV. GENERALITES SUR L'EPAISSISSEMENT PAR CENTRIFUGATION

A. LE FONCTIONNEMENT D'UNE DECANTEUSE CENTRIFUGE

La centrifugation est un procédé de séparation qui utilise l'action de la force centrifuge pour provoquer la décantation accélérée des particules d'un mélange solide-liquide.

Le principe de fonctionnement d'une décanseuse est d'introduire à l'intérieur du rotor le mélange à déshydrater. Ce mélange est réparti entre le bol et la vis convoyeuse de sédiment, où il est soumis à l'effet d'une force centrifuge importante. L'action de la centrifugeuse est définissable, en mesurant la concentration des boues après cette phase de traitement. Le liquide clarifié ou centrat, est entraîné vers un orifice d'évacuation, tandis que la boue progresse à une vitesse réglée par le différentiel de rotation de la vis d'extraction par rapport au bol, pour être évacuée à l'extrémité conique de ce même bol.

Toutefois avant d'étudier la centrifugation et ses paramètres d'exploitation, nous allons nous attarder sur les théories de la séparation.

1. THEORIES DE LA SEPARATION :

La figure 1 montre un décanteur par gravité, continu, dans lequel le liquide ou le mélange de liquides (si on ajoute du polymère) pénètre en une des extrémités et s'écoule régulièrement vers l'autre. Sur le chemin, les solides se déposent sur le fond et un liquide clair, sans particules, s'écoule de l'orifice de sortie à l'extrémité opposée.

figure 1:

La figure 2 montre un séparateur centrifuge à sédimentation simple où l'on obtient le même effet que sur la figure 1. En faisant tourner le récipient, on engendre une force centrifuge de plusieurs fois la gravité, augmentant ainsi la vitesse de sédimentation.

figure 2 :

Ces solides peuvent être retirés en continu par un transporteur à vis d'Archimède monté dans l'ensemble tournant. Ce principe est utilisé dans les décanteurs centrifuges (figure 3).

figure 3 :

Une amélioration du décanteur par gravité de la figure 1 consiste à monter un déflecteur du côté entrée et des plaques inclinées dans la cuve. Ceci accroît l'efficacité de la séparation,

les particules solides partant d'une meilleure position de sédimentation et devant parcourir une distance plus courte avant d'atteindre leur point de sédimentation.

figure 4 :

Cette amélioration a été transposée aux décanteuses rotatives et grâce à la rotation du récipient et de ses inserts, l'effet de la force centrifuge s'ajoutant à celui des plaques inclinées et à la distance de sédimentation plus courte, on aboutit à une séparation très efficace.

figure 5 :

Dans l'enceinte de centrifugation se forment deux phases principales distinctes :

- un culot de centrifugation (sédiment) qui n'a généralement pas une structure homogène. Il y a en effet, classification entre les particules de masse volumique élevées (fond du culot de centrifugation) et les particules plus légères (colloïdes organiques par exemple).

- un liquide surnageant (centrat) qui est souvent constitué d'une phase unique bien clarifiée ou parfois trouble (présence de fines particules colloïdales peu décantables). Toutefois, il peut aussi comporter deux ou plusieurs phases si le liquide interstitiel du mélange comprend des éléments de masse volumique différente (présence d'huile par exemple).

2. GRAVITE ET FORCE CENTRIFUGE :

Dans la séparation par gravité normale, la seule force agissant sur la séparation est la force normale de gravité (poids de l'objet). Il s'agit d'une force constante que l'on ne peut modifier.

La force engendrée par un séparateur centrifuge est plus puissante de plusieurs milliers de fois, car un objet tournant autour d'un axe à une distance « r » de l'axe à une vitesse angulaire « ω » connaît une accélération « a » dans le sens radial, selon la formule suivante:

$$a = r \omega^2 = (2\pi/60)^2 n^2 r = 0,011n^2 r \quad \text{avec } n \text{ en tours/minute}$$

L'accélération engendrée par une séparation centrifuge est toujours exprimée par référence au champ de gravitation terrestre en nombre de g:

$$G = \text{nombre de } g = \frac{\omega^2 r}{g} = 11,2 \cdot 10^{-4} n^2 \cdot r \quad (g = 9,81 \text{ m/s}^2)$$

Dans un cas caractéristique où $r = 0.35\text{m}$, $g = 9,81\text{m/s}^2$ et $n = 2500$ Trs/min

$$G = \frac{0,011 * 0,35 * (2500)^2}{9,81} = 2450$$

Donc, un séparateur centrifuge peut améliorer la décantation, par rapport à la gravité, selon un rapport de 2450 à 1.

3. LA LOI DE STOCKES :

La loi de Stokes est une formule relative à la vitesse de sédimentation. Elle énonce que si une particule solide ou liquide se déplace dans un milieu visqueux sous l'effet de la gravité, elle atteindra une vitesse constante. Il s'agit de la vitesse de sédimentation V_g .

A l'aide d'une formule tirée de la loi de Stokes, on peut calculer la vitesse de sédimentation :

$$V_g = d^2 \frac{(d_p - d_l)}{18u} * g$$

avec : d - diamètre des particules
 d_p - densité des particules
 d_l - densité de la phase continue
 u - viscosité de la phase continue
 g - accélération due à la pesanteur

Ainsi, on note que :

- 1- plus le diamètre de la particule est grand et plus la vitesse de sédimentation est élevée.
- 2- plus la différence de densité entre la particule et la phase continue est importante et plus la vitesse de sédimentation est élevée.
- 3- plus la viscosité de la phase continue est faible et plus la vitesse de sédimentation est élevée.

B. DOMAINES D'APPLICATION

1. EN TRAITEMENT DES EAUX :

L'application la plus répandue de la centrifugation est la séparation des matières solides de suspensions très concentrées. Utilisée ainsi pour le traitement des boues résiduelles, elle permet :

- la déshydratation avec production d'un sédiment plus ou moins consistant selon la nature de la boue à traiter (boues d'alimentation);
- l'épaississement accéléré de boues faiblement concentrées en vue de l'optimisation des filières de traitement des boues.

2. AUTRES APPLICATIONS :

- transformation des minerais : industries de transformation du kaolin et du carbonate de calcium, producteurs de bentonite et de dioxyde de titane,

- pétrochimie : raffineries de pétrole et industries annexes, comme les huiles de lubrification et les additifs pour huiles,
- chimie organique : fabricants de produits intermédiaires et de produits finis organiques : la nitroglycérine, les colorants organiques et les pesticides.
- chimie minérale : eau oxygénée et autres agents de blanchiment, acides , produits siliceux et industrie des engrais.

C. PARAMETRES D'EXPLOITATION

1. VITESSE ABSOLUE DU BOL V_A :

La décantabilité est directement proportionnelle au carré de la vitesse de rotation du bol. Les champs centrifuges appliqués s'échelonnent de 500 à 1000 g (pour les gros diamètres) à 3000-4000 g (pour les machines de plus petite taille). Dans notre cas nous sommes aux alentours de 2500 g.

De fortes valeurs de V_A (Tr/mn) permettent d'accroître les débits et améliorent compactage et siccité. Mais elles augmentent bruit, usure, vibrations et surtout, favorisent le reflux, en zone conique, de sédiments pâteux à texture fluente. Les modifications de V_A peuvent s'effectuer par changement de poulie motrice ou par moteur à vitesse variable.

2. VITESSE RELATIVE V_R :

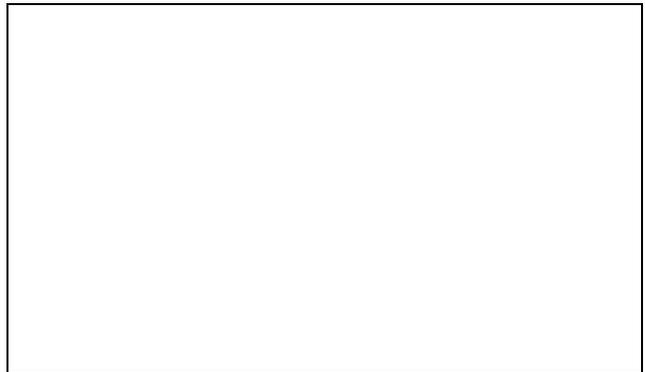
Ce paramètre essentiel fixe la rapidité de convoyage du sédiment, et donc le temps d'essorage. Cette différence de vitesse est généralement obtenue chez Guinard par l'intermédiaire d'un réducteur planétaires.

La vitesse relative varie de 2 à 20 Trs/mn dans l'application de Valenton. Son augmentation permet d'accroître le débit volumique du solide décanté, dans les limites permises de remplissage de la vis. La diminution de V_R permet d'obtenir des sédiments plus concentrés et un centrat plus clair; ceci jusqu'à un certain point de fonctionnement où là on obtient des retours de sédiments dans les centrats.

3. PROFONDEUR DE L'ANNEAU LIQUIDE :

Le volume ou profondeur de l'anneau liquide est ajustable par déplacement d'ouïes de reprise aménagées dans le plateau fixé sur le bol en tête de zone cylindrique.

La hauteur de l'anneau liquide, qui fixe la plage d'essorage, est souvent le paramètre déterminant du temps de rétention de la suspension ; ainsi le réglage de cet anneau est déterminant du taux d'hydratation du sédiment.



Un anneau liquide bas favorise la siccité en dégageant une plage d'essorage en zone sèche. Il faut cependant obtenir un sédiment suffisamment consistant, à la sortie de l'anneau liquide, pour vaincre l'effet prolongé de la force de reflux due à la conicité du bol. Pour améliorer la siccité, certains constructeurs proposent même une double conicité en zone d'essorage.

Cependant, la meilleure évaluation de bon fonctionnement d'une décanteuse continue est le calcul du rendement d'extraction ou taux de capture T_c :

$$T_c = 1 - \frac{C_L (C_S - C_A)}{C_A (C_S - C_L)}$$

avec C_A = concentration de la boue à l'alimentation en % MeS;
 C_S = siccité du sédiment en % MS;
 C_L = concentration du liquide clarifié ou centrat en % MeS.

La centrifugeuse doit normalement être réglée pour obtenir un T_c de l'ordre de 0,95 , soit un rendement d'extraction de 95%.

4. CENTRIFUGABILITE DES BOUES:

Si l'on soumet un échantillon de boue résiduaire à une centrifugation en laboratoire, on note dans le godet de centrifugation :

- un liquide surnageant d'aspect trouble et contenant de fins colloïdes en suspension
- un culot de sédiment pouvant se subdiviser en deux zones, l'une concentrée, de matières denses (zone inférieure), l'autre moins concentrée, de matières peu cohérentes donc assez pâteuses.

Si l'on répète la même expérience avec une boue floclée au moyen d'un polyélectrolyte organique, on constate la formation :

- d'un liquide clair surnageant, présentant une très faible teneur en MS;
- d'un culot très homogène présentant une bonne cohésion.

Cette aptitude de la suspension boueuse à pouvoir se séparer par centrifugation en laboratoire en deux phases franches traduit la "centrifugabilité" de la boue que le conditionnement par polymère a pour but d'améliorer.

Exemple de centrifugation en laboratoire de boue urbaine:

La centrifugabilité se caractérise par :

- la clarification du centrat, dépendant du champ centrifuge, du temps de centrifugation et du dosage de polymère. Un centrat de centrifugeuse peut ne jamais être totalement exempt de fins colloïdes (perturbations hydrauliques internes à la machine)
- le volume occupé par le sédiment, car il conditionne le débit massique potentiel de la machine

V. PRESENTATION DU PROCESS

A. CIRCUIT DES BOUES

L'épaississement est effectué sur les boues en excès des files d'eau. Elles sont prélevées dans chacune des tranches de l'épuration biologique sur le circuit de recirculation qui va des clarificateurs aux aérateurs. Elles sont alors envoyées vers une nourrice afin d'y être reprises par 3 pompes à boue, volumétriques permettant le gavage de chaque centrifugeuse. La boue entre alors en tête de centrifugeuse pour y être épaissie, et sort en fin de partie conique pour tomber dans une bêche d'échantillonnage de faible volume (250 L), elle-même placée dans une grande bêche à boues centrifugées mélangées (50 m³) commune aux 3 centrifugeuses. Tout le surplus de boue qui tombe dans la bêche d'échantillonnage passe par surverse dans la grande bêche pour y être homogénéisé par brassage puis refoulé, de façon intermittente, via les digesteurs puis les épaisseurs pour finalement suivre la filière de déshydratation et de conditionnement.

En ce qui concerne le circuit d'échantillonnage, les boues épaissies sont prélevées directement sous la centrifugeuse par la bêche d'échantillonnage pour être pompées à 2 m³/h via les sondes IR de mesure de concentration, puis sont refoulées dans la bêche boue épaissie mélangée.

B. LE CIRCUIT DES CENTRATS

Les centrats, produits par les centrifugeuses sont acheminés vers une bêche de reprise commune aux trois machines pour être pompés de façon intermittente soit vers les aérateurs, soit en tête de station.

La concentration des centrats produits par chaque machine est mesurée sur une boucle d'échantillonnage, par une sonde infrarouge placée à l'intérieur de chaque skid de mesure.

C. LE SKID DE MESURE

1. INTRODUCTION

Le skid de mesure est un brevet de Mr Descamps (Degrémont). Ils sont installés (un par centrifugeuse) dans un local proche des centrifugeuses. L'objet de cet équipement est d'améliorer la précision des mesures réalisées par une sonde de turbidité en atténuant les effets des micro-bulles contenues dans le centrats à la sortie des centrifugeuses. Un automate gère son utilisation avec des lavages périodiques, tandis qu'une OP (interface opérateur) affiche le déroulement du cycle. Un enregistreur m'a permis de suivre en permanence l'évolution de la concentration des centrats. Le coffret électrique est installé sur le skid

2. LE FONCTIONNEMENT DU SKID

a) SCHEMA DE L'INSTALLATION :

b) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Afin d'atténuer l'imprécision des mesures due au moussage et à la présence de micro-bulles dans le centrat à la sortie de la centrifugeuse, un skid de mesure de turbidité a été construit. Le principe fondamental du skid repose sur le fait qu'on laisse « reposer » le centrat afin de diminuer l'effet des micro-bulles car ces micro-bulles sont confondues avec des particules par la sonde.

On utilise pour cela un cylindre conique à la base et l'on introduit le centrat à environ 5 cm du sommet. Par ce biais les micro-bulles ont tendance à remonter à la surface du réservoir en raison de la poussée d'Archimède à laquelle elles sont soumises.

Aussi la force exercée par la poussée d'Archimède est nettement plus importante que celle exercée par la force de pesanteur. Son efficacité est d'autant plus importante que la vitesse d'écoulement est très faible, de l'ordre de 5cm/s, donc le liquide qui entre dans le cylindre met environ 15 à 20 s à le traverser. Les bulles d'air ont donc suffisamment de temps pour parvenir à la surface.

Le centrat est ensuite conduit vers un réservoir rectangulaire où se trouve la sonde mesurant la quantité de particules en suspension ou turbidité. Cette mesure est effectuée à la base du réservoir ainsi les bulles qui pourraient encore être présentes sont éliminées par le même phénomène que dans le cylindro-conique.

Le centrat provenant des réservoirs est ensuite rejeté dans l'égout ainsi que la surverse provenant du cylindre conique. Un rinçage périodique de la sonde et des réservoirs est réalisé par l'automate ainsi que l'élimination des mousses à la surface du cylindre conique.

L'alimentation en centrat est réalisée par une pompe volumétrique à débit variable.

3. LA SONDE DE MESURE

Il s'agit d'une sonde de marque *Ponselle* qui permet la mesure de la concentration de matières en suspension présente dans le centrat, par méthodes infrarouge. Cette sonde est reliée à un boîtier électronique qui affiche en permanence le signal de mesure (4-20 mA). La retransmission du signal de mesure est affichée à la supervision en salle de commande.

VI. LA REGULATION

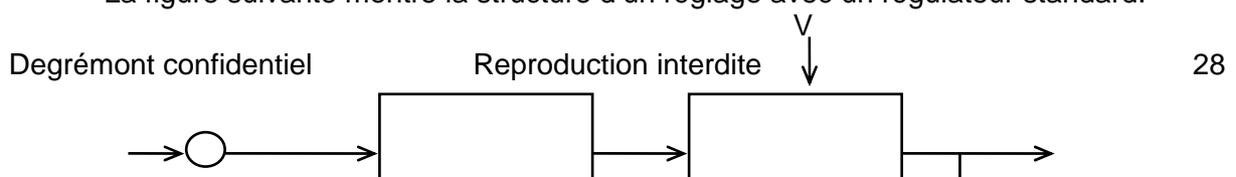
A. LES REGULATIONS CLASSIQUES

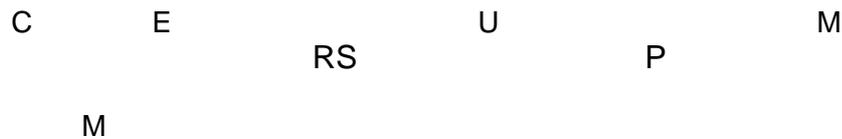
1. LA REGULATION TOR (TOUT OU RIEN) :

Cette régulation très simple peut être utilisée pour un réglage de niveau dans un réservoir d'où l'on soutire un débit variable selon la consommation. Ce mode de régulation utilise une vanne d'arrivée d'eau qui s'ouvre lorsqu'on atteint un niveau bas et se ferme lorsqu'on atteint un niveau haut. Le niveau haut et le niveau bas sont déterminées par une valeur de consigne.

2. LA REGULATION STANDARD :

La figure suivante montre la structure d'un réglage avec un régulateur standard.





RS	: régulateur standard	U	: signal de commande
P	: procédé	M	: grandeur réglée
C	: consigne	E	: écart de réglage (E= M-C)
V	: perturbation		

3. FONCTION DE TRANSFERT D'UN REGULATEUR STANDARD :

Suivant les besoins imposés par le système à régler, le régulateur standard est une combinaison de plusieurs composants :

- action proportionnelle (**P**) : elle consiste à rendre l'intensité de l'action sur la grandeur de réglage proportionnelle à l'écart, à l'instant t, entre la grandeur et sa valeur de consigne.
- action intégrale (**I**) : elle consiste à rendre l'intensité de l'action sur la grandeur de réglage proportionnelle à l'intégrale dans le temps des écarts entre la valeur de la grandeur réglée et sa valeur de consigne.
- action dérivée (**D**) : elle consiste à rendre l'intensité de l'action sur la grandeur de réglage proportionnelle à la dérivée par rapport au temps de l'écart entre la valeur instantanée de la grandeur réglée et sa valeur de consigne.

L'action proportionnelle laisse subsister un certain écart entre la valeur de consigne et la valeur mesurée de la grandeur réglée.

L'action proportionnelle et intégrale ramène lentement la grandeur réglée à sa valeur de consigne.

L'action PID permet d'annuler plus rapidement l'écart créé par la perturbation.

L'objectif d'une régulation PID est d'obtenir

- un signal de commande U constant
- une grandeur réglée = à la consigne et donc un écart de réglage nul

Cette objectif est atteint sur des procédés stables mais cette régulation n'est pas efficace lorsque le procédé est instable.

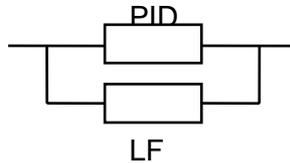
B. LA REGULATION PAR LOGIQUE FLOUE

Plus proche du raisonnement humain, la logique floue, intégrée aux automates traite de façon efficace des données complexes et imprécises. La logique floue s'applique plus particulièrement quand les procédés sont très complexes à modéliser ou quand ils demandent un grand savoir-faire des opérateurs.

Les méthodes de réglage conventionnelles se basent sur une modélisation adéquate du système à régler et un traitement analytique à l'aide de fonctions de transfert ou d'équation d'état. Par contre, le réglage par logique floue donne une approche plutôt pragmatique et permet de retranscrire le savoir-faire et l'expertise de l'opérateur dans son langage, à l'aide des règles floues.

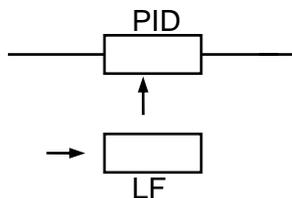
La logique floue peut être utilisée dans différents cas d'application :

- en dérivation d'un PID



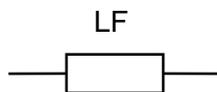
Ce type de régulation ne présente aucun intérêt si le PID existant donnait déjà satisfaction.

- en série



Ce type de régulation est utilisé généralement lorsque le PID ne donne pas pleinement satisfaction. On utilise ainsi la logique floue en complément de la régulation classique afin d'améliorer sa performance. La logique floue peut être ainsi utilisée afin de modifier en fonction des entrées, les réglages de K_p , T_i et T_d .

- seul



Lorsque aucune régulation PID n'a été établie ou que l'unique utilisation de la logique floue suffit.

La logique floue peut être utilisée pour le réglage et la commande de processus industriels liés à l'énergie, aux transports, à la transformation de la matière, à l'électroménager, la robotique...

1. HISTORIQUE :

La logique floue est l'aboutissement de nombreux travaux effectués par la communauté scientifique. Ainsi, au 18^{ème} siècle, Pascal, Bernouilli et Fermat (entre autres) s'intéressent au traitement des données empreintes d'incertitude. La théorie sur les probabilités fournit des avancées, du moins lorsque les données sont objectives (par exemple un lancé de dés). Mais elle ne permet pas de traiter des données subjectives (par exemple, la fiabilité d'une information fournie par un observateur, telles que les notions de "chaud", "grand", "brun").

La théorie des probabilités ne permet donc pas de résoudre le problème posé par les connaissances imprécises ou vagues. A partir des années 30, toutes ces notions reviennent sur le devant de la scène. Di Fenetti et Ramsey abordent la notion de probabilité subjective (Bernouilli avait posé quelques jalons), Russel remarque que la logique formelle est mal adaptée pour formaliser le raisonnement humain. Max Black (un philosophe) a l'idée de formaliser le sens des prédicats vagues (« l'eau est tiède ») à l'aide de fonctions numériques d'appartenance.

Parallèlement, apparaissent les notions de logique « multivaluées ».

Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi A.ZADEH de l'université de Californie. A cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux. En effet, les ordinateurs avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 et 0) ont commencé à se répandre sur une large échelle. Par contre, la logique floue permet de traiter des variables non exactes dont la valeur peut varier entre 0 et 1. Initialement, cette théorie a été appliquée dans des domaines non techniques, comme le commerce, la jurisprudence ou la médecine, pour compléter les systèmes experts et afin de leur donner l'aptitude de prise de décision.

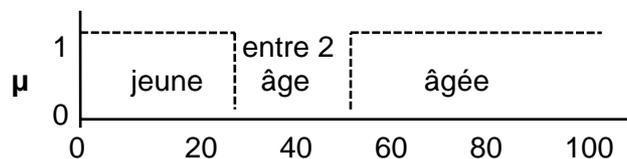
Dès 1975, on trouve les premières applications au niveau des systèmes de réglage. A partir de 1985, les Japonais ont été les premiers à s'intéresser à la logique.

2. PRINCIPLE FONDAMENTAL DE LA LOGIQUE FLOUE :

Afin de montrer le principe fondamental de la logique floue, on présente un exemple simple, celui de la classification des personnes en trois ensembles "jeune", "entre deux âges" et "âgé".

Selon la logique classique (logique de Boole), qui n'admet pour les variables que les deux valeurs 0 et 1, une telle classification pourrait se faire comme le montre la figure 1. Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans sont alors considérées comme appartenant à l'ensemble "jeune" et toutes les personnes âgées de plus de 50 ans comme appartenant à l'ensemble "âgé".

fig. 1 : Classification selon la logique classique

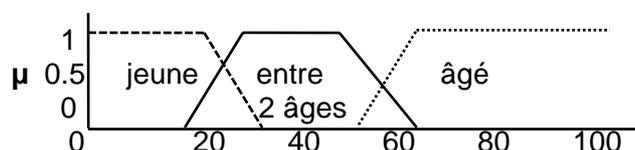


Cependant, une telle logique de classification n'est même pas logique. Pourquoi une personne, lorsqu'elle a une cinquantaine d'années, doit-elle être considérée comme appartenant à l'ensemble "âgé"? En réalité, un tel passage se fait progressivement et individuellement.

La logique floue, dont les variables peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1 (on parle alors de fonction d'appartenance μ), permet de tenir compte de cette réalité. Les limites ne varient pas soudainement, mais progressivement. La figure 2 montre une classification possible pour l'exemple précédent, cette fois-ci, à l'aide de la logique floue.

Ainsi, une personne de 25 ans appartient à l'ensemble "jeune" avec une valeur $\mu=0.75$ de la fonction et à l'ensemble "entre deux âges" avec $\mu=0.25$. Evidemment, la forme des fonctions d'appartenance n'est pas rigide et dépend du contexte envisagé.

fig. 2 : Classification selon la logique floue



3. REGLAGE ET COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE DANS L'APPLICATION INDUSTRIELLE :

Un domaine d'application de la logique floue qui devient de plus en plus important est celui du réglage et de la commande de processus industriels. Les algorithmes de réglage conventionnels sont alors remplacés par une série de règles linguistiques de la forme SI... , ALORS... . Ainsi, on obtient un algorithme et il est possible de prendre en considération l'expérience des opérateurs pour la commande de processus, mal maîtrisables par des méthodes conventionnelles.

On peut mentionner quelques exemples d'application :

- sur une colonne de distillation : résolution d'un problème de maintien du niveau dans un ballon en tête d'une colonne de distillation atmosphérique à la raffinerie de Donges. Son rôle est de stabiliser le débit de sortie de la cavité tampon; on lui demande surtout d'anticiper les perturbations éventuelles, de façon à éviter une intervention humaine. Trois applications de ce contrôleur floue sont maintenant utilisées en raffinerie chez Elf.

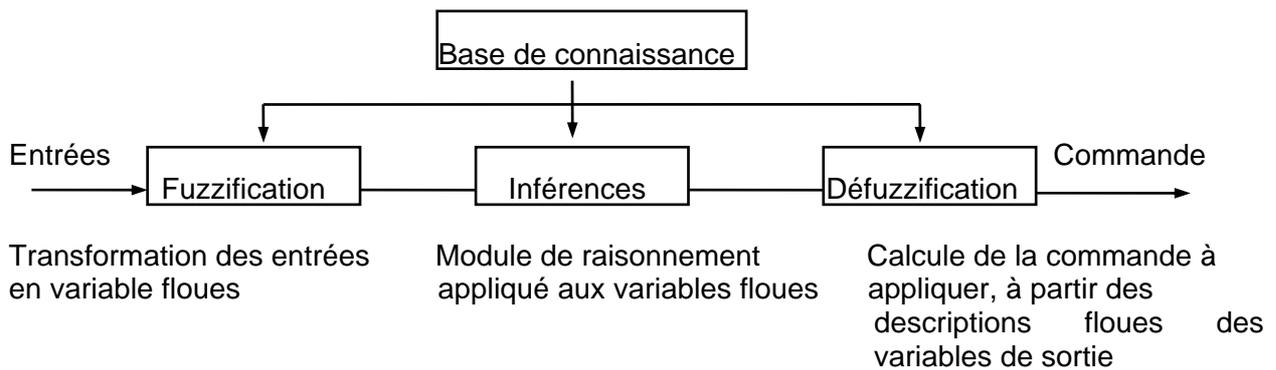
- un aspirateur qui reconnaît le sol : le contrôleur devait reconnaître le sol (moquette, parquet...) et la reconnaissance de l'opérateur (adulte, enfant...) peut également être envisagée. En fonction de l'environnement de travail ainsi reconnu, le contrôleur devait ensuite choisir les réglages les mieux adaptés et les faire évoluer en fonction des perturbations éventuelles.

- dans l'électronique automobile pour un système de commande anti-cliquetis et un régulateur de ralenti.

- un robot qui a le sens de l'équilibre...

Cette énumération est loin d'être exhaustive, mais elle permet de mettre en évidence quelques cas d'application.

4. STRUCTURE D'UN CONTROLEUR FLOU :

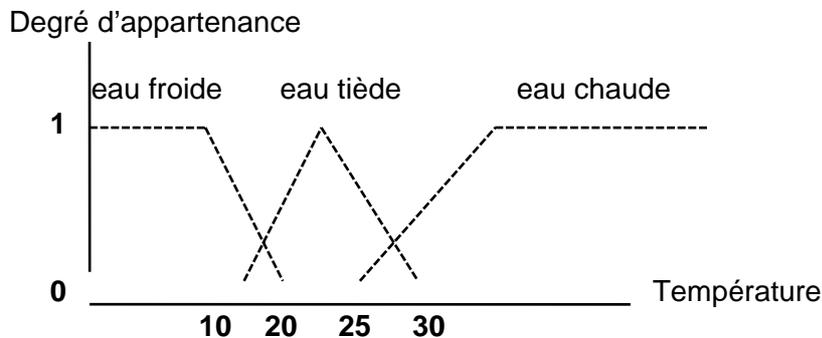


5. FUZZIFICATION :

La Fuzzification consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables, en particulier pour les variables d'entrées. On réalise ainsi le passage de grandeurs physiques (grandeurs déterminées) en variables linguistiques (variables floues) qui peuvent être traitées par les règles d'inférence.

Dans le cas de réglage par logique floue, on utilise en général des formes trapézoïdales et triangulaires pour les fonctions d'appartenance. Bien qu'il n'existe pas de règles précises pour la définition des fonctions d'appartenance, quelques directives générales seront données, afin de faciliter un premier choix.

exemple de fonction d'appartenance :



6. LES INFERENCE :

Les règles d'inférence sont établies à partir de la base de connaissance du procédé et d'expertise et peuvent être traduites sous forme de règles de ce type :

- règle 1 : **SI** X1 est A1 **ET** X2 est B2 **ALORS** Y est C3

L'expression « X1 est A1 **ET** X2 est B2 » est la prémisse de la règle 1 tandis que « Y est C3 » est la conclusion de cette règle

X1, X2 sont des variables d'entrée

Y, est une variable de sortie

A1, B2 sont les familles auxquelles appartiennent respectivement X1, X2

C3 est une famille de variable de sortie

7. DEFUZZIFICATION :

Le calcul de la commande consiste à qualifier la (ou les) sortie floue et à la transformer en grandeur numérique applicable au processus.

8. CONCLUSION SUR LA LOGIQUE FLOUE

La logique floue peut apporter des solutions à des problèmes insolubles comme ceux rencontrés sur des procédés pas, ou difficilement modélisables. C'est notamment le cas sur des procédés dont la structure change avec les conditions de marche et ceux pour lesquels l'expérimentation s'avère très difficile. De plus, l'utilisation de la logique floue permet, selon des chefs d'entreprise, un gain d'exploitation de 20% et un gain de facteur 10 dans la durée de développement, afin de passer de la connaissance experte sous forme de règles à la génération des codes.

La logique floue paraît être un outil facilement assimilable par l'utilisateur et très performant car plus proche du raisonnement humain. Toutefois il ne faut pas se lancer à corps perdu dans ce type de régulation et oublier les régulations PID classiques qui permettent de traiter les boucles classiques de régulation qui fonctionnaient très bien auparavant.

VII. EXPERTISE, ESSAIS ET MODELISATION

A. INTRODUCTION

La raison du choix d'une régulation par logique floue sur une centrifugeuse est que la régulation par PID existante ne donne pas entièrement satisfaction. Cela est dû au fait que ce type de régulation n'agit qu'au dernier moment. Ceci provoque de trop grandes variations de siccité entraînant finalement des dysfonctionnements.

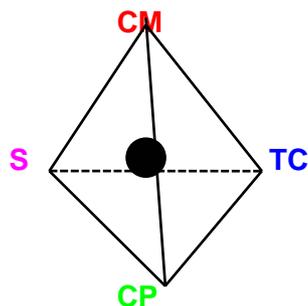
C'est pourquoi R&D s'est tourné vers l'idée de réaliser une centrifugeuse « intelligente », c'est à dire capable de donner une importance variable aux informations que lui transmettent les capteurs et autres sources d'information.

C'est la centrifugeuse N°2 qui a été choisie pour tous les essais, car la plus "disponible".

B. VARIABLES D'ENTREE/SORTIE

L'objectif premier de la régulation déjà mise en place est d'obtenir un centrat clair et une concentration boue centrifugée voisine de 40 g/L; puis un taux de capture élevé, une consommation en polymère la plus faible possible et enfin pouvoir accepter un débit massique de boue à l'entrée, correct.

Comme on peut le voir sur le schéma suivant, l'objectif n'est pas unique et les contraintes sont multiples, ce qui complique considérablement la régulation.



CM : Débit massique de boue
S : Siccité
TC : Taux de Capture
CP : Consommation de polymère en fonction de la CM entrante

Explication :

La régulation actuelle est une régulation du type PID qui par action sur la Vr maintient la concentration de la boue centrifugée, à une consigne prédéfinie par l'opérateur.

La logique floue (LF), en fonction de la turbidité du centrat et de la vitesse différentielle de la centrifugeuse, agit sur les débits de boue et de polymère, par l'intermédiaire d'un variateur de fréquence, afin d'obtenir les résultats escomptés.

Les 4 entrées : **la concentration de la boue centrifugée**
la vitesse relative
le débit de boue
le débit de polymère
la turbidité des centrats

Les 3 sorties : **la variation du débit de boue**
la variation du débit de polymère
la variation de la Vr

C. PHASE 1 : INSTALLATION, FAMILIARISATION AVEC LE PROCESS

1. LE CABLAGE DE L'ENREGISTREUR

La difficulté réside dans le fait que le câblage doit être effectué sans perturber le process ; après quelques essais infructueux, il a été décidé de rajouter des isolements galvaniques juste après l'insertion de l'enregistreur dans la boucle 4-20 mA du régulateur.

Les valeurs de Vr et de couple ont donc été reprises directement au boîtier électrique près des centrifugeuses, plus exactement au niveau de la sortie 4-20 mA du *Microcor* alors que les valeurs de concentration et de débit ont été reprises au niveau de l'armoire électrique du local électrique de commande, des centrifugeuses et des divers équipements connexes.

Il a donc été possible d'enregistrer 6 paramètres (concentration des boues en excès, des centrats et de la boue épaissie, débit d'alimentation en boue, Vitesse relative et couple) et de les acquérir d'une part sur papier et d'autre part sur informatique, permettant ainsi un meilleur suivi.

2. VALIDATION DES MESURES ENREGISTREES

De part la longueur du circuit, des pertes en lignes sont apparues. Afin d'avoir des valeurs les plus proches possibles sur l'enregistreur et sur les divers transmetteurs, il a fallu "tricher" un peu en décalant les échelles 4-20 mA au niveau de l'enregistreur. Cette petite modification n'a pas d'influence sur la prise de mesure étant donné qu'on n'arrive jamais à la pleine échelle.

Après plusieurs essais sur le choix de l'échelle de temps appropriée, il s'avère que la vitesse de défilement du papier de 40 mm/h est la plus pratique pour bien voir des variations sans pour cela être trop rapide et nous distraire de la tendance générale par des artefacts de mesure.

D. PHASE 2 : LES PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT, EXPERTISE AVANT ESSAIS

1. LE DEBIT D'ALIMENTATION

L'exploitation des centrifugeuses est déterminée quotidiennement par les consignes d'exploitation donnée par le responsable d'exploitation au vue notamment des analyses effectuées chaque jour par le laboratoire.

Sur la station, certains éléments du process sont automatisés c'est-à-dire qu'une régulation est en place et que les appareils sont mis en mode Auto. Cependant le mode forcé c'est-à-dire Manuel est utilisé pour d'autres, c'est le cas par exemple du débit d'alimentation des centrifugeuses, paramètre qui, à l'heure actuelle, est déterminé manuellement suivant les consignes de la journée, c'est-à-dire suivant si il faut concentrer ou déconcentrer les bassins d'aération. Il est très généralement compris entre 60 et 70 m³/h par centrifugeuse lorsque les 3 sont en fonctionnement. Il est donc très dépendant de la période de l'année (en Hiver les bassins sont plus concentrés qu'en été). Les plages de débits utilisées vont de 45 à 100 m³/h par centrifugeuse .

2. L'UTILISATION DU POLYMERE

Suivant le débit désiré, les centrifugeuses doivent marcher avec du polymère (polyélectrolyte cationique de marque Degrémont Erpac). En effet, elles sont conçues et garanties par le constructeur, Guinard, pour un débit maximum de 130 m³/h, mais à partir de 66 m³/h, il leur faut du polymère pour permettre des rendements acceptables, c'est-à-dire des taux de capture acceptables. Le polymère est utilisé en moyenne 100 jours par an, à raison de 0,6 g/L pour un débit de 650 L/h par centrifugeuse soit environ 5 tonnes /an. Le polymère utilisé revient à 28,4 F/kg, ceci nous donne donc environ 200 kF/an. Ce chiffre est à comparer avec le coût du polymère utilisé pour le conditionnement avant déshydratation, qui est proche de 7 MF /an.

L'utilité du polymère n'est pas remise en cause, il permet un meilleur épaissement et une meilleure capture des fines, qui ne se retrouveront pas dans les concentrats. Il est cependant intéressant de savoir que le cahier des charges était à l'origine prévu pour des boues en excès comprises entre 5 et 11 g/L, alors qu'aujourd'hui leur concentration est plutôt aux alentours de 3,5 g/L.

3. LA BOUE EN EXCES ENTRANTE

La concentration de boue en excès est relativement constante, elle se situe dans une plage de 3 à 6 g/L et ne bouge pas beaucoup sur 24 h. A l'époque du flottateur (dimensionné à l'origine pour les surverses des épaisseurs), ou l'extraction était séquentielle sur les 4 files (une par jour) les concentrations des bassins étaient beaucoup plus élevées et donc la concentration des boues recirculées aussi. Les boues en excès avait des concentrations comprises entre 5 et 11 g/L.

En ce qui concerne, la qualité de la boue en excès, c'est-à-dire le pourcentage en MV (Matières Volatiles) par rapport aux MS (Matières Sèches), il apparaît que le pourcentage de MV est un facteur assez stable sur l'année et les années antérieures, on ne retiendra donc pas ce paramètre comme facteur influant en épaissement. Cette mesure de MV n'est pas accessible directement par une sonde à mesure directe, elle nécessite tout un protocole de laboratoire, et ne peut être lue qu'après une journée. A Valenton, le pourcentage de MVS se situe aux alentours de 80 %.

4. LA REGULATION EN PLACE

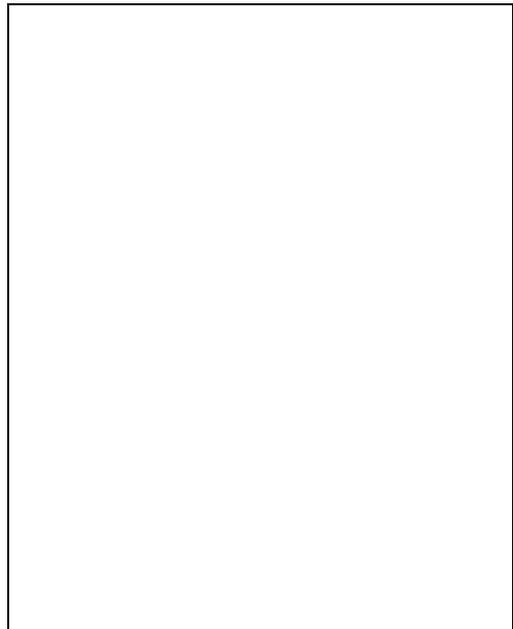
La régulation de la centrifugeuse est effectuée actuellement par un régulateur type PID dont les paramètres de réglage sont les suivants : $K_p = 350$, $T_i = 6$ et $T_d = 0$.

Ils sont modifiables par l'opérateur à l'aide du boîtier *Microcor* placé sur le coffret électrique des centrifugeuses.

Dans ce type de régulation, on ne peut agir qu'a posteriori (ou feed-back control), c'est-à-dire que l'on ne peut agir que par des actions correctives ponctuelles, après que les effets des grandeurs perturbatrices aient produit un écart entre la mesure et la consigne. Aussi est-il important que le temps d'instabilité pendant lequel la centrifugeuse est déviante soit le plus petit possible.

Il est possible de modifier les réglages sur le régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) de la centrifugeuse :

Vue du
régulateur *Microcor* et de l'afficheur *Covirel*



- X_p : l'action proportionnelle permet d'accélérer la réponse du régulateur sur la V_r , ce qui a pour conséquence de réduire l'écart entre la mesure et la consigne, mais un écart résiduel ε subsiste.
- T_i : l'action intégrale permet d'annuler l'écart entre mesure et consigne suite à des perturbations.
- T_d : l'action dérivée permet de compenser les effets du temps mort du procédé, elle a un effet stabilisateur.

5. CONCLUSION SUR L'EXPERTISE AVANT ESSAIS

On note d'une part que la plage de débits utilisée est assez large puisqu'elle va de 40 à 100 m³/h, avec emploi de polymère au delà de 66 m³/h et d'autre part que la boue en excès entrante a une qualité et une concentration stable voisine de 3,5g/L. Le point de fonctionnement de la centrifugeuse est donc différent de celui prévu à l'origine de leur installation où la concentration boue en excès était comprise entre 6 et 11 g/L. Enfin, la régulation actuelle est de type PID et les paramètres du régulateur sont modifiables.

E. PHASE 3 : VALIDATION DES MESURES, DYSFONCTIONNEMENTS OBSERVES ET SOLUTIONS MISES EN ŒUVRE POUR Y REMEDIER

1. MAUVAISE CORRELATION ENTRE CONCENTRATION BOUE CENTRIFUGEE ET BOUE MELANGEE

Les analyses laboratoire montraient des différences significatives entre les valeurs indiquées par la sonde boues mélangées d'une part et les sondes boue centrifugée d'autre part. Ceci indique, soit que les sondes sont décalées et donc que les mesures ne sont pas représentatives des valeurs réelles, soit que les circuits d'échantillonnages ne sont pas fiables.

Dans un premier temps un réajustage de la sonde boue épaissie, aux alentours de 40 g/L avec analyse laboratoire des MS, a été effectué. Ce réajustage permet d'avoir des valeurs relativement exactes aux alentours de 40 g/L, il ne permet cependant pas d'avoir une justesse de la sonde sur toute la gamme (plus on s'éloigne de 40 g/L, plus la valeur mesurée s'écarte de la valeur réelle).

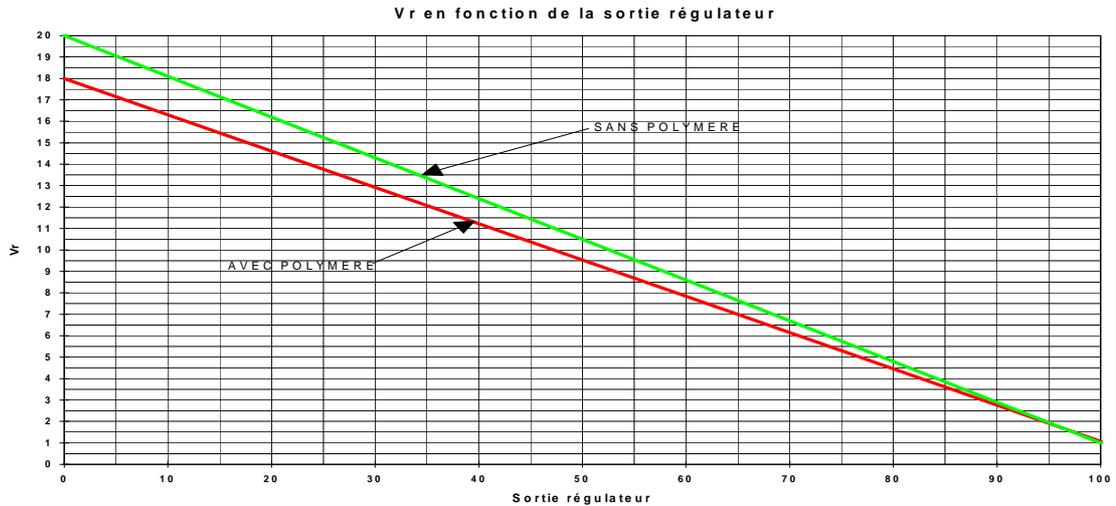
Ainsi, ceci a permis une fiabilité de la mesure accrue autour de 40 g/L et une meilleure stabilité du système.

2. MAUVAISE REGULATION LORSQUE LE COMMUTATEUR A ETE BASCULE EN MANU SUR L'ARMOIRE ELECTRIQUE DE LA CENTRIFUGEUSE

Après plusieurs essais, il est apparu que le fait de mettre le commutateur de la centrifugeuse sur la position Manu entraîne des phénomènes inverses sur la régulation. En effet on observe que le régulateur, régule de façon inverse pendant quelques temps pour ensuite se remettre à réguler normalement. Cependant lorsque le régulateur dévie, la boue trop épaisse qui sort alors de la centrifugeuse colmate les conduites et ne permet plus au système de reconverger, même lorsque le régulateur revient dans un état normal de régulation.

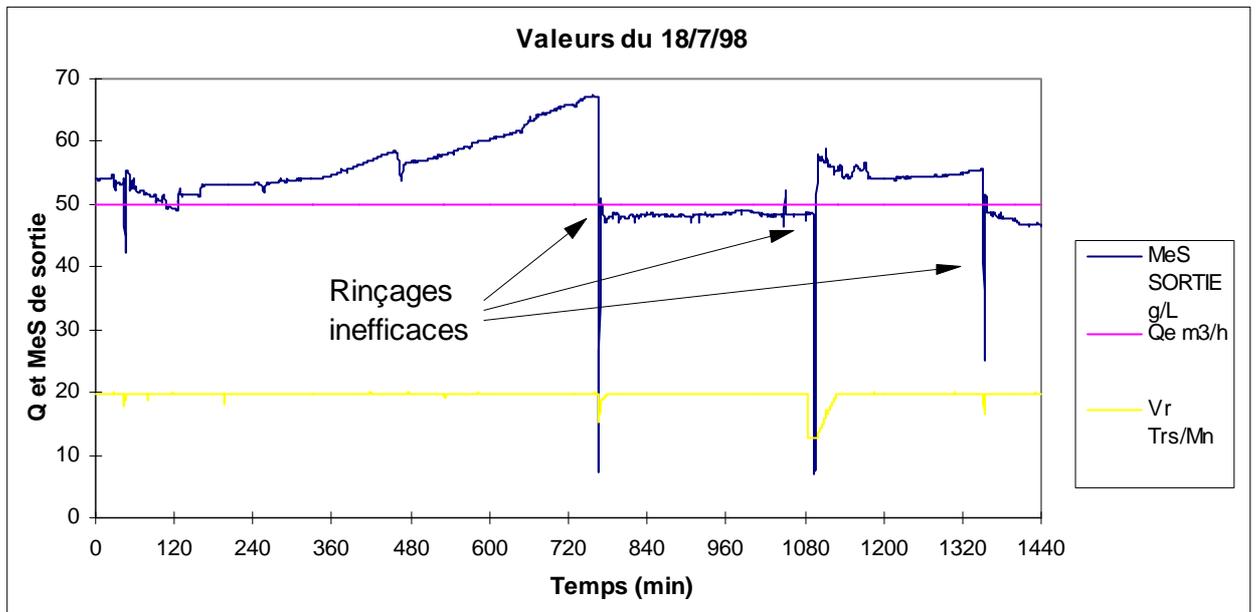
En fait ce phénomène est du à la saturation du régulateur lorsque le commutateur est mis en Manu et donc que la boucle de régulation est ouverte.

Il est par ailleurs possible de diriger la Vr en Manu en se mettant en Manu directement sur le boîtier du régulateur Microcor. La Vr se pilote alors par la consigne de sortie du Microcor, elle même inversement proportionnelle à la Vr (voir courbe de correspondance ci-après). Ce changement nous permet ainsi de changer, en Manu, la Vr, sans pour cela saturer le régulateur lorsqu'il est remis en Auto.



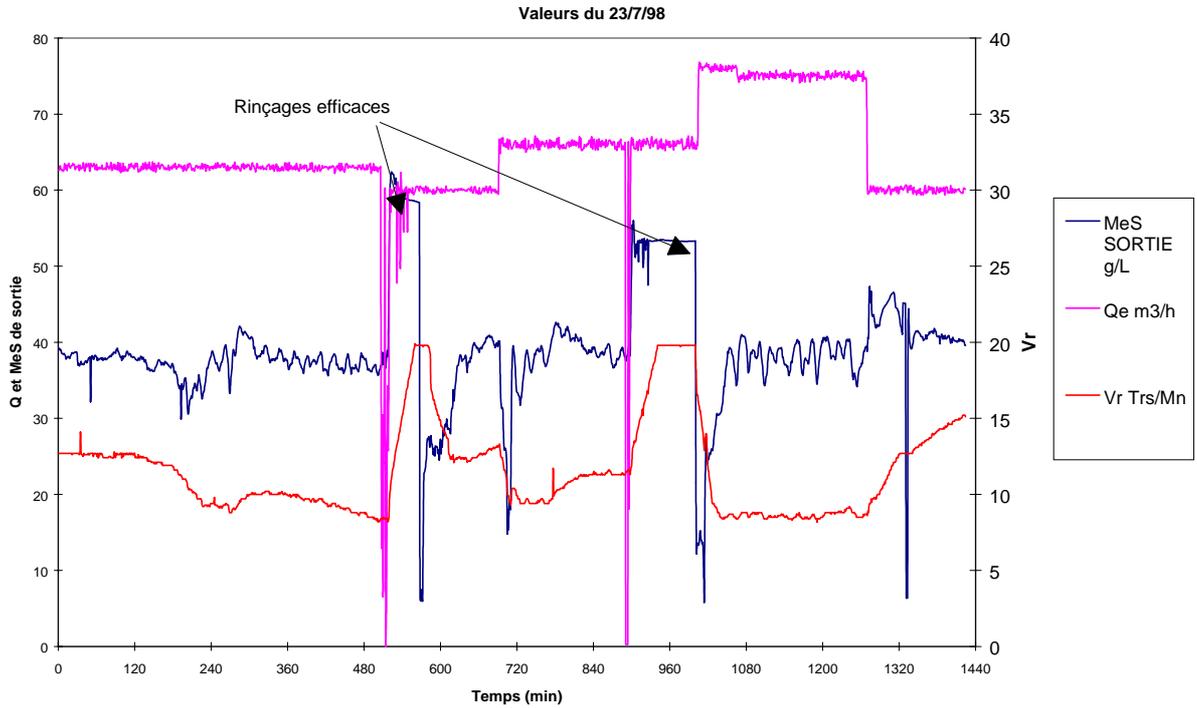
3. MODE DE RINÇAGE DES SONDES INEFFICACE

Toutes les mesures effectuées sur le process centrifugation sont retransmises à la supervision (salle de commande), et sont visualisées sous forme de courbe temps réel. Lorsque l'exploitant s'apercevait que la concentration boue épaissie était trop élevée, il effectuait un rinçage des sondes par le piquage juste en amont de celles-ci avec l'eau industrielle, pensant que quelque chose s'était fixé sur le capteur empêchant ainsi la mesure. Après observation des modes opératoires des rinçages effectués, il s'avère que ceux-ci sont inefficaces puisqu'ils ne rincent que la sonde, supposant ainsi qu'en amont de la pompe la canalisation n'est pas obstruée, ce qui est on le voit à l'expérience est faux.



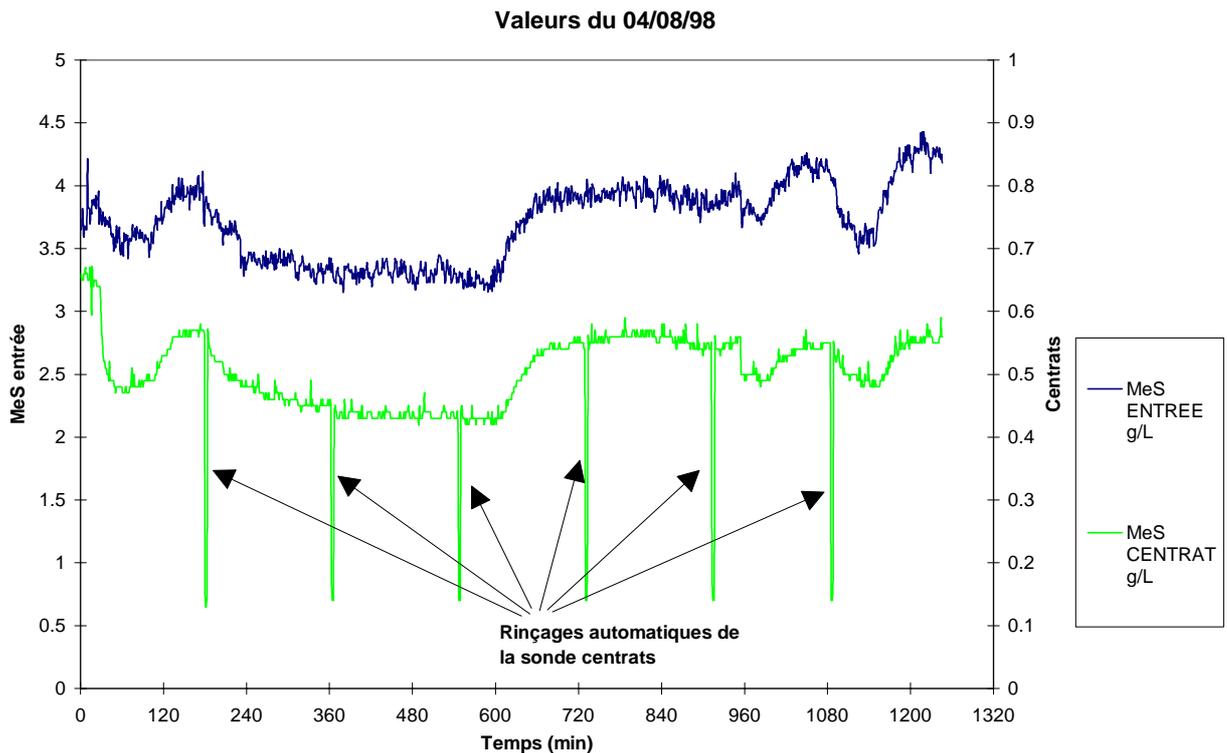
Un nouveau mode opératoire a donc été proposé, il consiste essentiellement à bien rincer la canalisation en amont de la pompe par injection d'eau à contre courant, puis de rincer la sonde, en s'assurant en fin de manipulation que la mesure est cohérente. Le mode opératoire est détaillé en *annexe 3*.

La mise en place de ce nouveau mode de rinçage et la formation des chefs de quart à la manipulation, a permis de fiabiliser la mesure et d'avoir une réponse du régulateur en rapport avec la situation. On peut le voir sur l'enregistrement suivant :



4. CORRELATION MES ENTREE/CENTRATS ET DYSFONCTIONNEMENT ELECTROVANNE DE RABATTAGE MOUSSE,

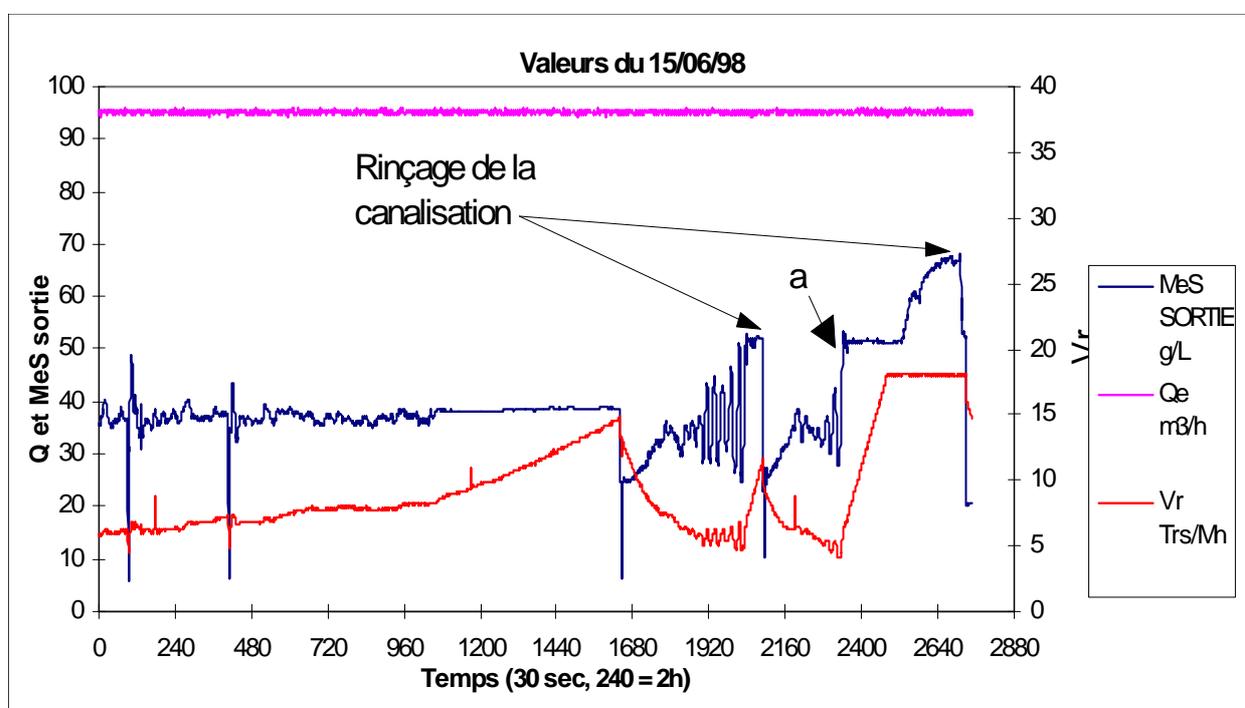
La concentration des centrats est, au vue des enregistrements effectués, bien corrélée à la valeur de concentration de boue entrante, ceci indique donc un Taux de Capture (TC) relativement constant. (voir graphique)



Cependant, j'ai pu noter une augmentation sensible des centrats à partir d'un certains jour. En examinant de façon attentive le skid, il s'est avéré que l'électrovanne de rabattage mousse ne fonctionnait plus normalement entraînant des accumulations anormales de mousse, provoquant un encrassement de la sonde de mesure et donc une surestimation de la valeur renvoyée. Après remplacement de l'électrovanne, tout est revenu à des valeurs normales.

5. DECROCHAGES DES COURBES DE CONCENTRATION

On note des décrochages brusques des courbes de concentration sur la journée (voir flèche (a) sur le graphique page suivante), passant de 35 g/L à 60 g/L par exemple. De plus on remarque que l'augmentation de la Vr induite par cette brusque remontée ne permet pas pour autant de déconcentrer et de revenir à la valeur de consigne.



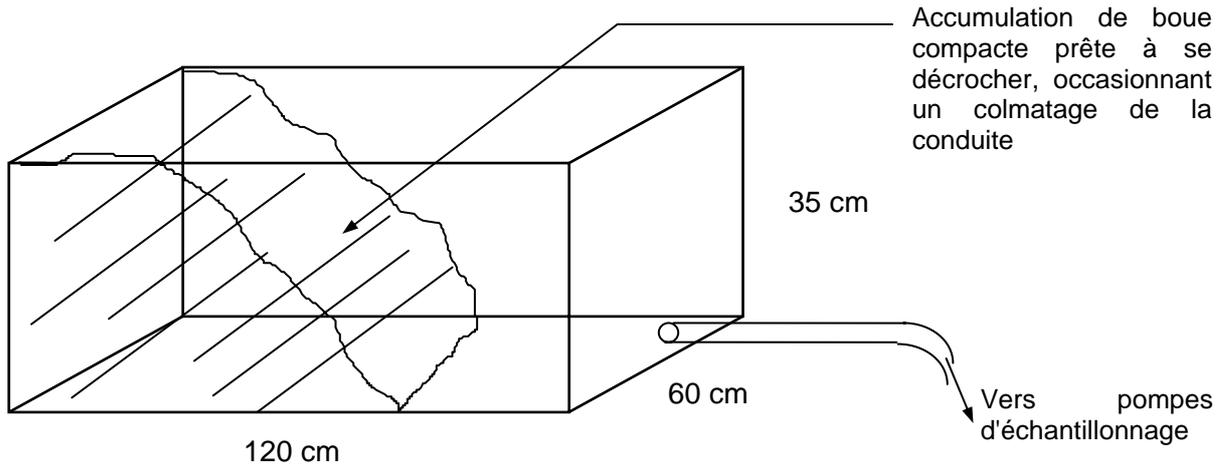
Les plans du circuit d'échantillonnage nous montrent que les conduites ont des pentes très faibles et qu'elles présentent de nombreux coudes générateurs de pertes de charge très importantes dans le circuit. Le diamètre des canalisations n'étant que de 60mm et le fluide étant de la boue épaisse, donc très visqueux, il s'avère que lors des dérives du système, les canalisations se colmatent. Ceci a d'ailleurs pu être vérifié lors de prélèvements à différents piquages sur le circuit. Ces brusques remontées des concentrations sont donc artificielles et donc non représentatives des valeurs réelles.

Le colmatage s'effectue avant la pompe, celle-ci tourne donc à vide et la concentration renvoyée par la sonde est celle de la boue qui petit à petit se décante dans la conduite et donc semble avoir une valeur qui augmente. La mesure est donc à ce point de vue, non fiable.

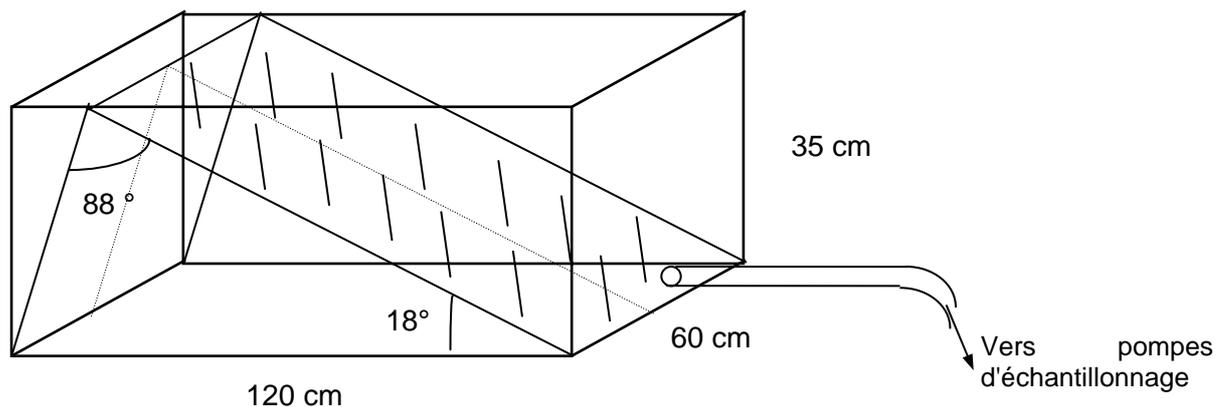
Comme on a pu le voir précédemment l'échantillonnage dépend de la bêche de récupération sous la centrifugeuse. Les plans indiquent que le fond de cette bêche est plat et que l'aspiration se situe sur un côté.

Ainsi, lors des dysfonctionnements de la centrifugeuse, un bloc de boue très compacte s'accumule d'un coté de la bêche et n'arrive pas à s'évacuer en surverse. Lorsque la V_r de la centrifugeuse monte et que la boue produite est liquide, des blocs de boue compacte se décrochent et colmatent la canalisation.

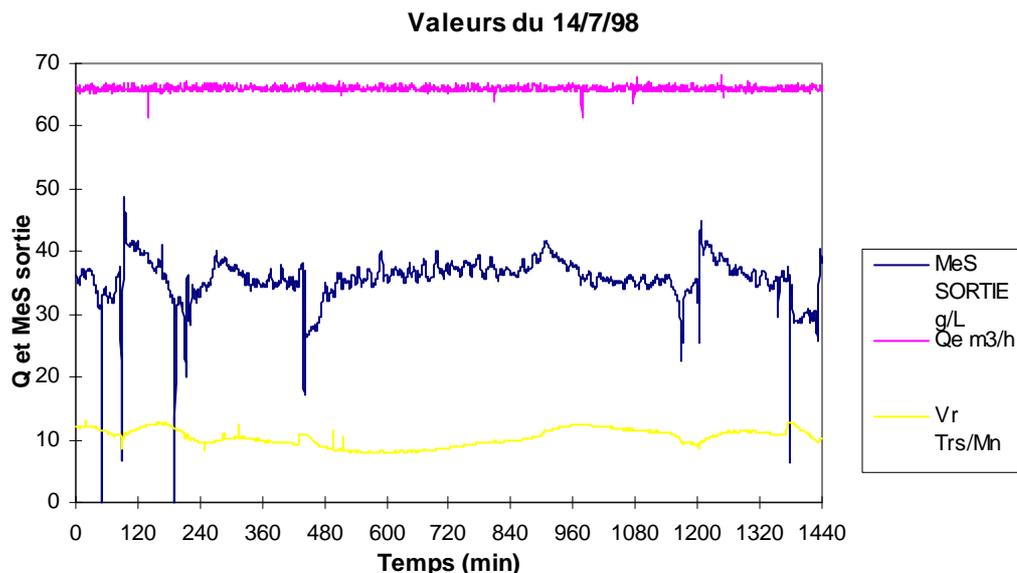
La solution envisagée consiste donc a rendre le fond de cette bêche, inclinée d'un certains angle, afin que le gavage de la conduite s'effectue mieux et surtout afin d'éliminer les volumes morts. L'étape préalable consistait donc à se rendre compte de visu des dimensions exactes de cette bêche. Ainsi après démontage de la goulotte de sortie sous la centrifugeuse on obtient les caractéristiques suivantes pour cette bêche :



Après avoir obtenu ces mesures il a été possible de fabriquer sur mesure une tôle inclinée (faites en 2 parties pour des raisons d'encombrements lors de la mise en place), les caractéristiques de cette tôle sont les suivantes:



Cette modification apportée sur le process a permis de limiter des décrochages de blocs de boues et donc de limiter les décrochages dans les courbes de concentration. On a ainsi obtenu une meilleure fiabilité de la mesure et une stabilité accrue du système; on peut d'ailleurs le voir sur l'enregistrement suivant.



Le volume de cette bêche avant intervention était d'environ 250 L, après intervention il diminue de près de 55 % passant à 115 L, on diminue ainsi par la même occasion le temps de séjour de la boue dans cette bêche et donc le temps de réponse.

6. CONCLUSION SUR LA VALIDITE DES MESURES

Avant tout essais en vue d'une mise en place de régulation par logique floue, il a été nécessaire de valider les mesures relatives au process, or en s'intéressant à ces mesures, il est apparu un certains nombre de dysfonctionnements qu'il a d'abord fallu éliminer.

Ainsi, jusqu'à présent les mesures de concentration étaient non représentatives du système, les modifications apportées sur le process ont permis de fiabiliser les mesures, et par voie de conséquence ont amélioré la stabilité du système, limitant par exemple les décrochages pour cause de colmatage.

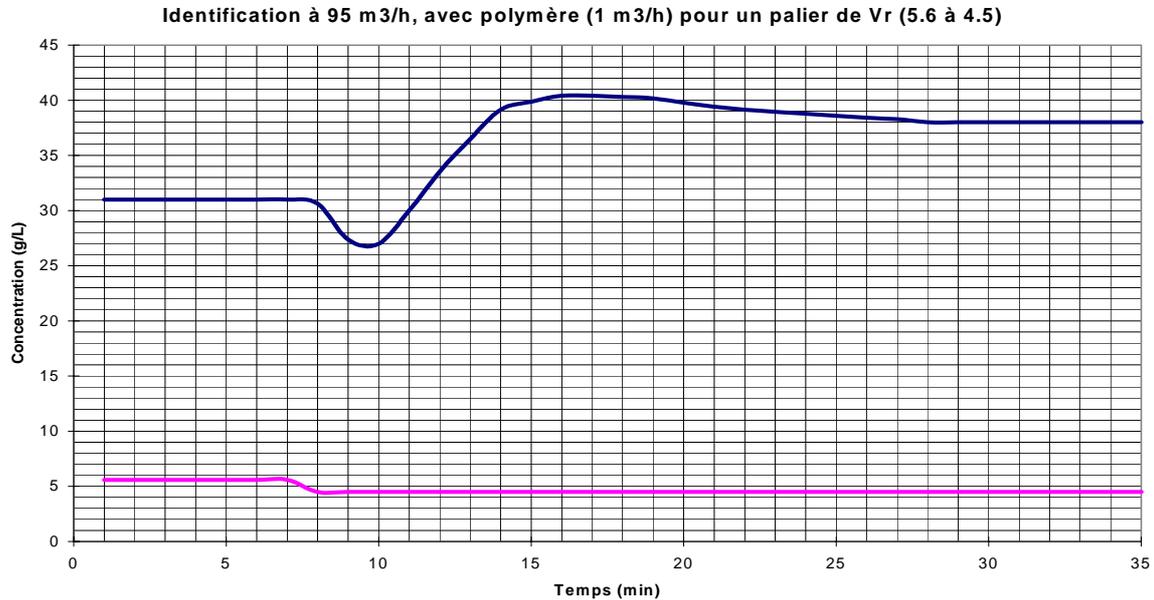
F. PHASE 4 : ESSAIS EN VUE D'UNE MISE EN PLACE DE REGULATION PAR LOGIQUE FLOUE

1. ESSAIS D'IDENTIFICATION, AFIN D'OPTIMISER LES REGLAGES DU PID

Afin de savoir si les réglages du PID étaient corrects, un essais d'identification permettant d'évaluer un retard pur et une constante de temps a été réalisé. L'essais consiste à effectuer des variations de Vr par palier et d'observer l'évolution de la concentration jusqu'à l'obtention de la stabilité. La méthode utilisé, dite de la Fuente est détaillé en annexe.

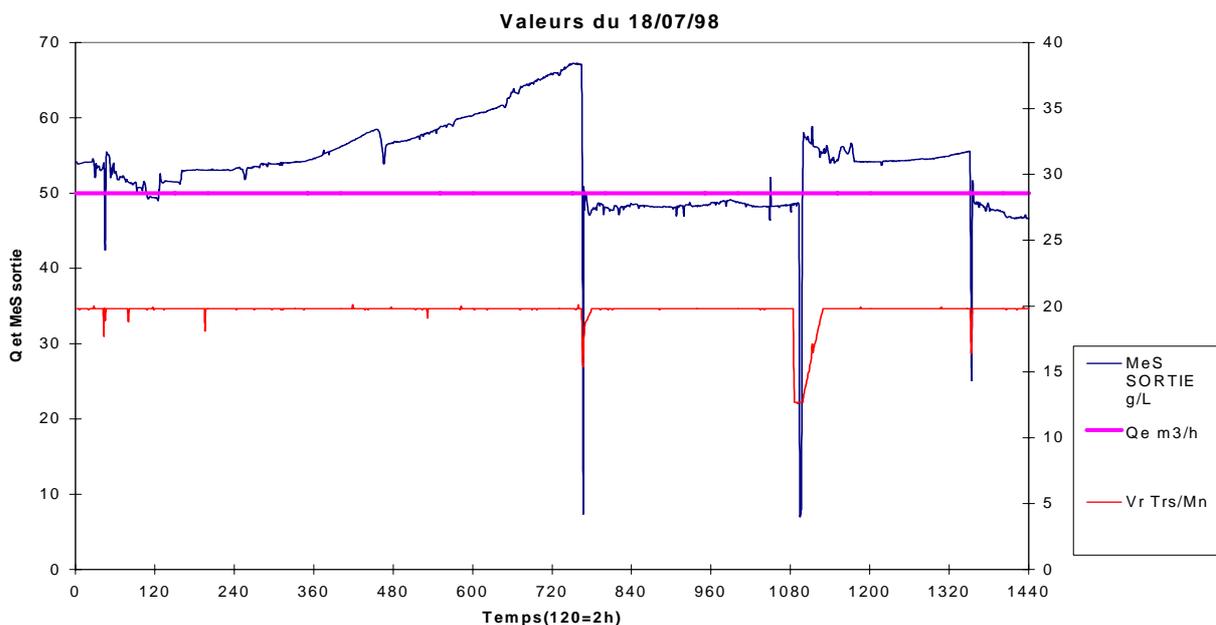
Un fait intéressant est à noter, à savoir, la baisse de la concentration, lors d'une diminution de Vr, pendant quelques minutes pour remonter par la suite et se stabiliser à un plateau. Le phénomène se produit de façon inverse lorsqu'on monte la Vr. Ceci peut éventuellement s'expliquer par une sorte d'engorgement passager de la vis.

Si l'on "néglige le trou" dans la courbe de concentration de boue centrifugée, on peut identifier et calculer une Bande Passante de 351, un Temps d'Intégration de 3 min et un Temps de Dérivée de 3 min. Les réglages actuels sont BP = 350, Ti = 6 min et Td = 0 min. Après avoir réglé le PID avec les nouvelles valeurs trouvées, il apparaît que le système est plus instable, aussi les anciens réglages ont été remis.

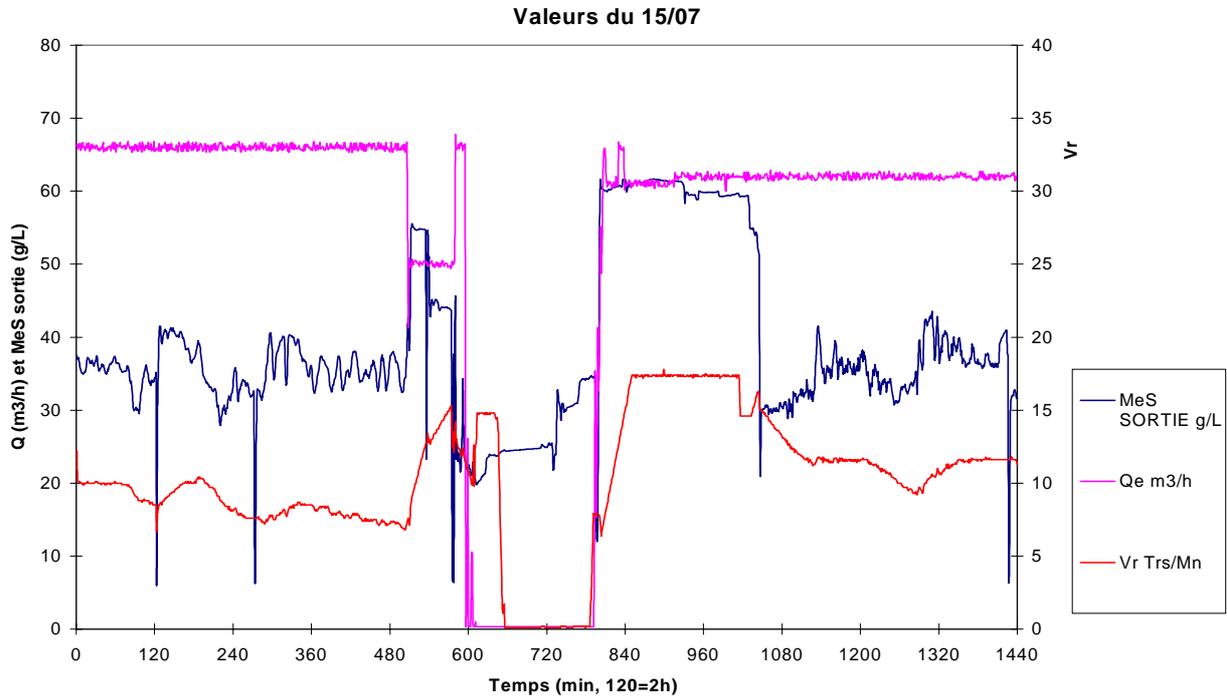


2. ESSAIS DE VARIATION DE DEBIT (REGULATION EN AUTO)

Différents essais sur le débit ont été menés afin de comprendre l'influence d'une variation de celui-ci sur le process, et on note en première approche que des "Problèmes" accrus apparaissent lors des faibles débits, c'est à dire inférieur à 55 m³/h. L'exploitant fait fonctionner habituellement les centrifugeuses à environ 66 m³/h, mais il arrive parfois que ces débits soit baissés à des valeurs voisines de 50 m³/h pour des temps généralement pas très importants. On observe assez généralement des problèmes plus importants de colmatage pendant ces périodes (voir graphique suivant).

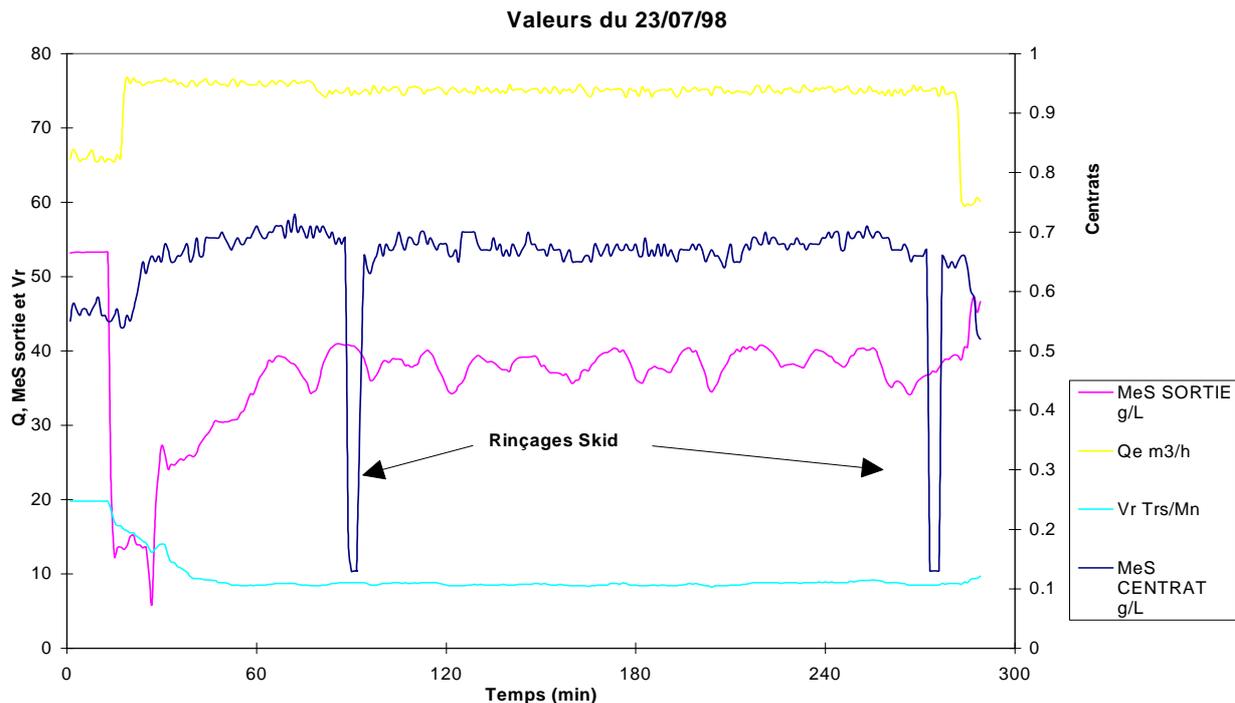


On note par ailleurs que le fait de changer de débit d'alimentation brutalement ou d'arrêter la centrifugeuse pendant quelque temps, entraîne souvent des instabilités du système et des colmatages de la conduite d'aspiration des boues centrifugées, ce phénomène est assez caractéristique et peut se voir sur le graphique suivant.



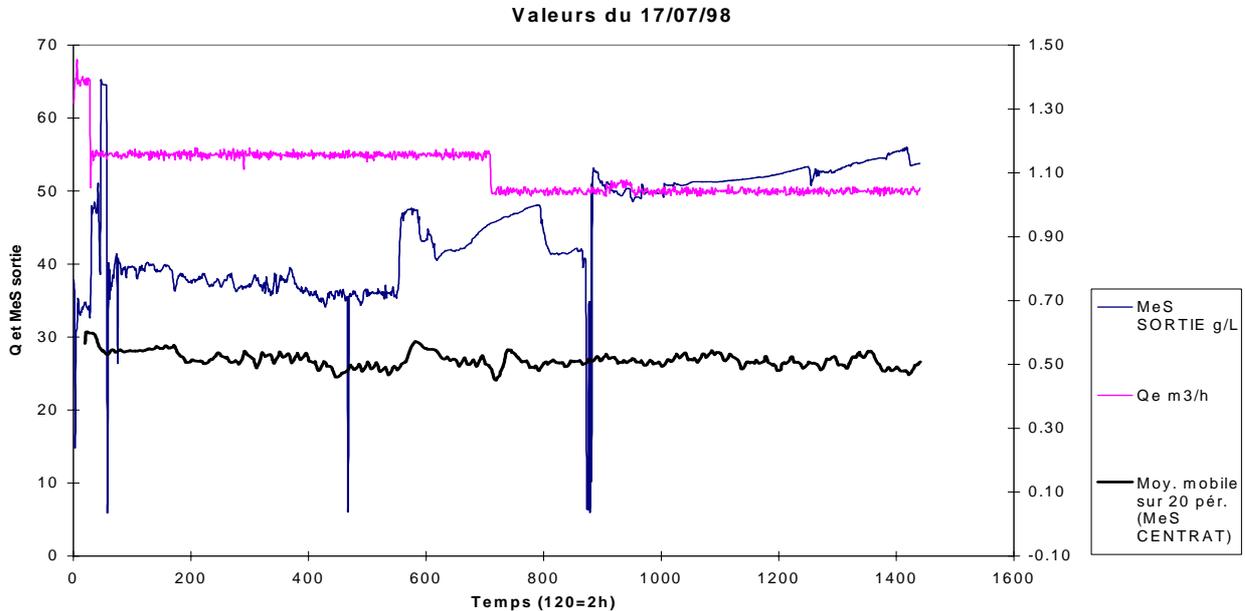
A l'origine, lors de l'installation des centrifugeuses, les données étaient sensiblement différentes puisque la concentration de la boue en excès était généralement supérieure à 6g/L, ainsi leur point de fonctionnement était différent.

Après essais, il apparaît qu'il est possible de tourner à 75m³/h sans polymère, avec des centrats corrects, c'est à dire à une concentration inférieure à 0,7 g/L (voir graphique suivant). Auparavant Guinard préconisait l'emploi de polymère après 66 m³/h.



3. L'EVOLUTION DES CENTRATS EN FONCTION DE L'EVOLUTION DU SYSTEME

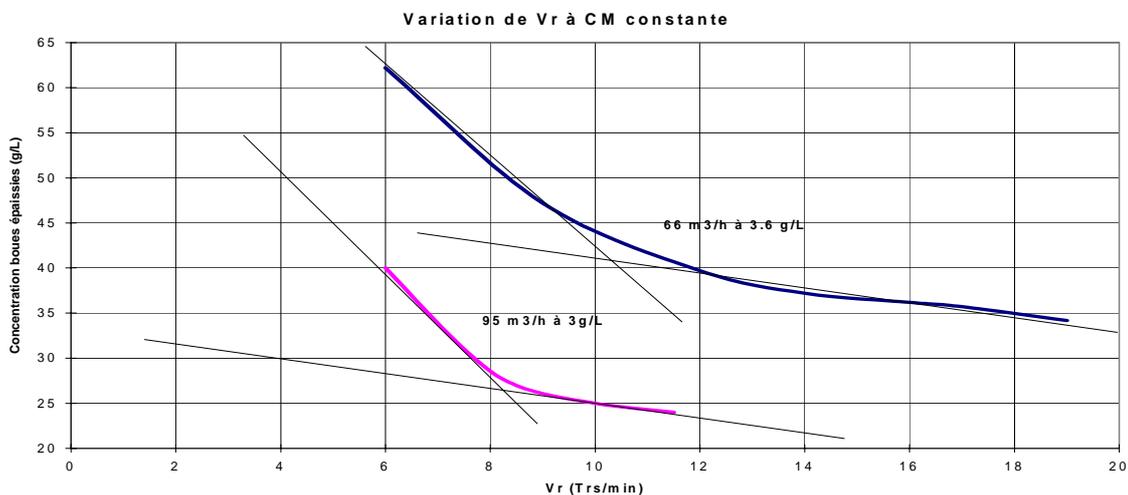
Lorsque le système dérive les centrats ne dérivent pas pour autant d'une façon significative. On peut le voir sur le graphique suivant. Ainsi, les variations de concentration des centrats sont trop faibles, pour être pris en compte pour une éventuelle régulation par Logique Floue. De plus lorsqu'on fonctionne avec polymère ces différences sont encore moins perceptibles, interdisant toute interprétation par un système logique floue.



En fait, pour une même charge massique entrante traitée, on remarque que plus la boue centrifugée est épaissie, plus son débit de sortie diminue, sans pour autant influencer la concentration des centrats. Ceci est vrai tant que le niveau du sédiment reste inférieur à l'anneau liquide, lorsqu'on dépasse cette hauteur critique, la boue commence à passer dans les tubes de reprises de centrats et donc leur concentration augmente.

4. VARIATIONS DE Vr A CM CONSTANTE ET INFLUENCE SUR LA CONCENTRATION DES BOUES CENTRIFUGÉES

Lorsqu'on fait varier, à débit constant, la Vr sur une demi-journée, afin de ne pas avoir de variation de la concentration des boues en excès, c'est-à-dire avoir une charge massique entrante constante, on observe une non linéarité prononcée sur la courbe de concentration (voir graphique). L'essai a été réalisé à différents débits et donne à chaque fois le même type de courbe.



5. MODELISATION DU COMPORTEMENT DE LA CENTRIFUGEUSE SUIVANT LE TYPE DE CHARGE MASSIQUE ENTRANTE

Au vue des nombreux essais réalisés, il apparaît que si l'on s'intéresse au comportement de la centrifugeuse face à la charge massique, on note des différences énormes entre diverses situations. En effet il semble exister 2 types de Charge Massique :

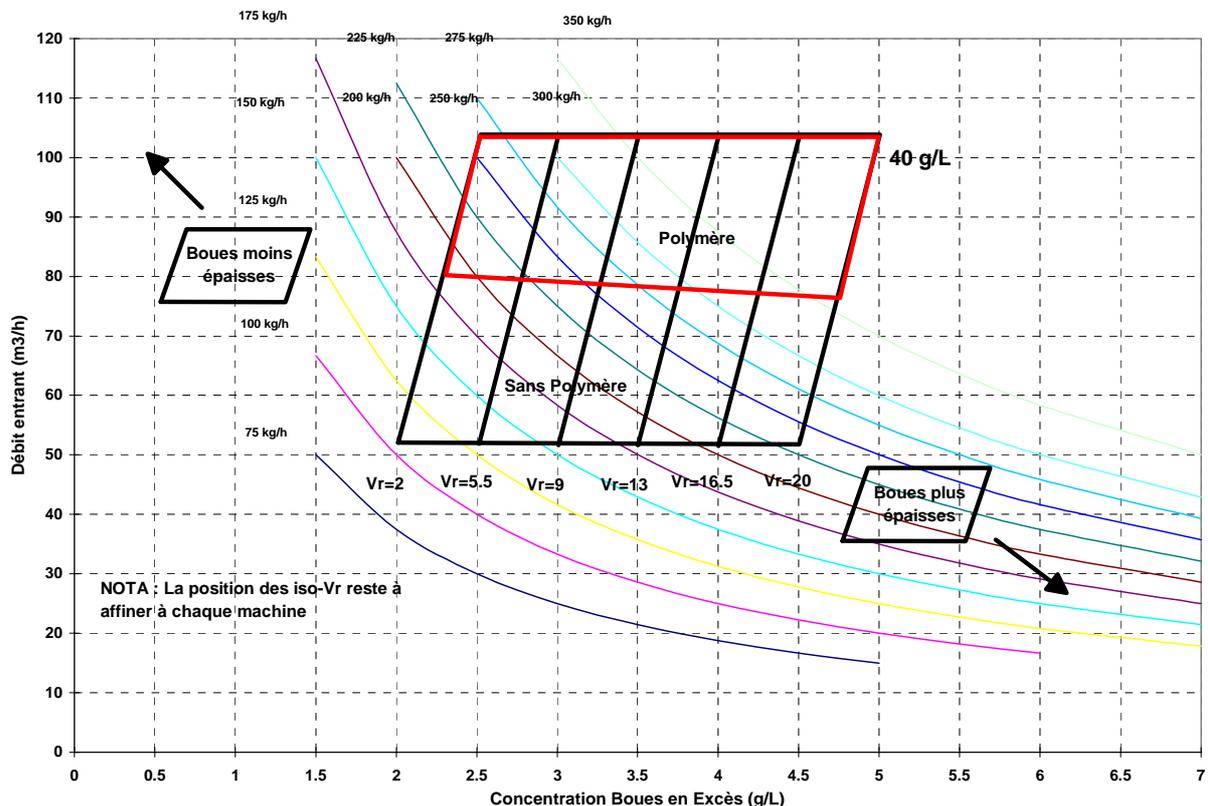
- Une CM orientée par le débit, c'est à dire dont la composante essentielle est le débit,
- Une CM orientée par la concentration boue en excès, c'est à dire dont la composante essentielle est la concentration d'entrée.

Lorsqu'on a une concentration boue en excès faible mais un débit fort, la poussée hydraulique est forte, ceci a tendance a expulser la boue très rapidement hors de la centrifugeuse, c'est-à-dire que le temps de séjour dans la centrifugeuse, de cette boue, a tendance a être faible. Or si l'on veut concentrer suffisamment, il faut retenir la boue en diminuant la Vr.

En revanche, lorsque le débit est faible mais que la concentration boue en excès est forte, la poussée hydraulique est beaucoup plus faible et n'imprime donc pas un mouvement trop rapide à la boue ayant tendance à l'expulser en sortie de centrifugeuse. Cependant, la plus forte concentration d'entrée nécessite d'expulser rapidement cette boue sinon son temps de séjour dans la centrifugeuse est trop long et donc sa concentration trop élevée en sortie. Il faut alors monter la Vr.

Ceci nous permet de modéliser une aire de fonctionnement de la centrifugeuse à 40 g/L, (voir graphique suivant) c'est-à-dire une aire dans laquelle il est possible d'obtenir 40 g/L si peu qu'on change la Vr en fonction du type de charge massique entrante. Il existe bien évidemment deux aires différentes suivant si on marche avec ou sans polymère.

Aire de fonctionnement théorique d'une centrifugeuse Guinard (D7L) en épaisseur



Il s'agit là d'un outil d'exploitation qui permet à l'exploitant de ne pas dépasser les limites de fonctionnement de la centrifugeuse, en sachant donc à quel débit d'alimentation il doit se trouver lorsque la V_r est au taquet et que le système n'arrive pas à converger vers 40g/L, dans certains cas il suffit de modifier le débit pour revenir dans le parallélogramme de fonctionnement optimal.

6. CONCLUSION SUR LA MISE EN PLACE DE LA LOGIQUE FLOUE

Finalement, il s'avère qu'une régulation par logique floue est impossible et ceci pour au moins deux raisons, d'une part une non linéarité de la V_r sur une plage de concentration donnée et d'autre part le manque de réactivité des centrats face aux dérives du système. Ces deux paramètres étaient justement des entrées pour la logique floue, ils ne sont pas assez représentatifs de l'évolution du système, ils ne sera donc pas possible de les prendre en compte pour réguler.

VIII. CONCLUSION

Les différents essais réalisés sur site ont donc permis de comprendre le fonctionnement d'une centrifugeuse à boue en épaissement et de modéliser son comportement.

A l'origine, l'objectif du stage était d'étudier la faisabilité d'une mise en place d'une régulation par logique floue, puis l'objectif a changé, au fur et à mesure de l'avancement de l'étude, s'orientant vers une optimisation du fonctionnement en place.

Au cours de ces essais j'ai eu l'occasion de donner des directives afin de modifier une partie du process; celles-ci ont d'ailleurs été mises en œuvre très rapidement sur les deux autres centrifugeuses que je n'étudiaient pas, après avoir vu les résultats positifs sur la centrifugeuse N°2. J'ai également été amené à modifier un mode opératoire et à former les chefs de quart à la manipulation, celle-ci a été appliquée avec succès par l'exploitant

La preuve est faite qu'une régulation par logique floue n'est pas envisageable sur le site de Valenton en l'état actuelle des choses, mais, il ne semble pourtant pas exclu d'envisager des régulations par logique floue sur d'autres sites. En effet la possibilité ou non de réguler par logique floue est très liée au process, lui même très lié aux débits et au type de boue entrante (MV, septicité...), à la concentration de celles-ci, au type de centrifugeuse utilisé et bien évidemment à la conformation du circuit de mesure de la boue épaissie.

Compte tenu des contraintes de l'exploitation (optimisation des concentrations des bassins d'aération, concentration boue centrifugée limitée...), la modélisation faite sur la centrifugeuse a permis de remettre un abaque à l'exploitant lui donnant la possibilité de mieux définir ses consignes de fonctionnement.

Finalement, ce stage, dans une très grande station d'épuration, pour le département Recherche et Développement de Degrémont, m'aura beaucoup appris, tant sur un plan purement technique, mais aussi sur le plan de la rigueur d'observation, sur la méthode d'approche d'un problème, sur le travail en autonomie et sur les relations humaines dans l'entreprise.

IX. BIBLIOGRAPHIE

1. Mémento technique de l'eau - Degrémont
2. Office international de l'eau
3. Documentation Guinard
4. Industrie et Nuisances
5. Ponselle Mesure
6. ABB
7. Fuzzy Logic
8. Régulation

X. REMERCIEMENTS

Jacques AUDIBERT : pour m'avoir proposé un stage intéressant par sa diversité, un stage qui m'a permis de plonger au cœur d'une station d'épuration, un stage qui finalement m'a fait véritablement découvrir le métier du traiteur d'eau. Pour m'avoir à maintes reprises éclairé et guidé de ses conseils judicieux, empreints d'une longue expérience dans le métier.

Patrick DESCAMPS : pour m'avoir suivi tout au long de cette étude en m'apportant de précieux conseils techniques.

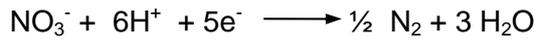
Ariel MORYOUSSEF : (Directeur) Pour m'avoir accueilli au sein de l'usine de Valenton et surtout pour s'être constamment intéressée à mes travaux.

Anne DU PLESSIS : (Responsable d'exploitation) Pour m'avoir fait confiance sur les essais alors que le process est en production, pour m'avoir fait découvrir, indépendamment du process centrifugeuse, toute la station dans ces moindres recoins, pour m'avoir communiqué une part de son expérience dans l'exploitation d'une station au quotidien, bref pour m'avoir fait aimer son métier.

Claire TROUSSELLE (Directeur adjoint) et Jean-Pierre ALUZE (responsable maintenance) pour m'avoir aidé à répondre à certaines questions dans leur domaine. Emmanuel COUPIN et Christophe PLARD : (Service Assurance Qualité) pour m'avoir prêté des documents utiles à la rédaction de mon rapport.

Gilles FROMONOT : (Responsable technique d'exploitation) pour avoir supporté toutes mes questions diverses et pour sa précieuse aide dans la mise en place de la tôle inclinée.

Thierry ROOM et Anthony SENOT pour leur aide dans l'étalonnage des sondes, Jean-Michel AYASSAMY pour son aide lors du câblage de l'enregistreur, Raymond VARIN et Jean-Pierre PATRAT pour la fabrication de la tôle, le personnel d'exploitation dans son ensemble et les chefs de quart (Antonio, Patrice, Majihd, Maurice, Luidji, Jean-Michel); Vanessa MARMET au laboratoire pour m'avoir familiarisé avec certains modes opératoires; Frédéric LAVRAT pour m'avoir prêté un camescope, Christophe BOULLE pour quelques conseils informatiques et bien sur, tout les autres que j'oublie, et pourtant qui ont tous été très sympathiques à mon égard s'intéressant souvent à mes travaux.



Le donneur d'électrons sera de préférence du carbone organique ou, en l'absence de celui-ci, la masse bactérienne elle-même.

Quatre paramètres essentiels jouent sur la vitesse de dénitrification:

- la température
- l'oxygène dissous
- le pH organique
- la source de carbone

La présence d'oxygène inhibe la dénitrification c'est pourquoi la dénitrification a lieu en milieu anoxique. Ceci afin que les bactéries de la dénitrification tirent leur énergie de celle libérée lors du transfert des électrons des composés organiques vers O_2 , NO_2^- et NO_3^- .

F: masse du filtre seul
V: volume de boue filtrée

2. *RESIDU SEC OU MATIERES SECHES (MS) :*

La teneur en matières sèches inclut à la fois les matières en suspension et les sels dissous. C' est le résidu sec appelé parfois extrait sec , utilisé aussi pour déterminer la siccité de la boue (exprimée en %).

a) *RESIDU SEC A 105 °C*

La teneur en matières sèches est exprimée en g/L .

La méthode de mesure consiste à mettre à l'étuve à 105°C ,jusqu'à obtention d'une masse constante, un échantillon de boue (25 à100 mL selon la concentration de la boue).

Soit M1 la masse de l'échantillon humide et M2 sa masse après séchage:

$$\text{Siccité} = \frac{M2 * 100}{M1} \%$$

Une solution plus rapide consiste a utiliser une thermobalance (MA 30) qui donne une bonne précision de mesure.

b) *RESIDU SEC A 550°C ET MATIERES VOLATILES (MV) :*

Le résidu est porté pendant 2 heures à 550°C dans un four préalablement chauffé et thermostaté.

La teneur en matières volatiles gazéifiées à 550°C ne doit pas être confondue avec la teneur en matières organiques. Toutefois pour la majorité des boues ,la détermination des MV est une évaluation approchée de la matière organique.

C. ANNEXE 3 : MODE OPERATOIRE DE RINÇAGE DU CIRCUIT DE MESURE

- mettre la régulation de la centrif sur Manu, c'est à dire mettre le **régulateur** sur **Manu** et non **le commutateur Auto/GTC/Manu** sur Manu. En effet le fait de mettre sur Manu sature le régulateur et lorsque il est remis en Auto, il régule mal pendant un certains temps, qui peut être assez long.
- mettre la **pompe d'échantillonnage (4.3 P 3.1,2,3) sur arrêt** afin que lorsque le lavage à contre courant est effectué, tout le flux d'eau soit dirigé vers la bêche de reprise. Le lavage s'effectue donc en plusieurs temps:
- **fermer la vanne en aval de la pompe,**
- **injecter de l'eau à contre courant par le piquage amont** (avant la pompe) **pendant 2 min**. On notera que l'absence d'écoulement en aval de la pompe est signe que le joint de la pompe est efficace.
- **puis, en rouvrant la vanne, injecter de l'eau par le piquage aval** (entre la pompe et la sonde) **pendant 2 min**, la concentration doit descendre à une valeur très faible.
- **baisser de quelques tours, sur le régulateur, la Vr, qui du fait du colmatage est montée très haut**. Ainsi, on revient plus vite à un état stable et le régulateur mettra moins de temps à retrouver la valeur de consigne.
- lorsque toutes ces opérations sont effectuées, il suffit de **remettre les pompes en marche, puis le régulateur sur Auto**.