

**ETUDE POUR LE TRAITEMENT DES MES
DANS LES PLANS D'EAU
RESULTANT DES EXPLOITATIONS DE CARRIERES**

Etude réalisée pour le Comité de la Charte Aquitaine
dans le cadre d'un stage en Maîtrise à l'Institut EGID (Université de Bordeaux III)
août 2002

Nom de l'auteur : **Thomas FELON**

Statut de l'auteur :

Etudiant en Maîtrise à l'EGID

Nom du maître de stage : **Jean HUET**

Profession du maître de stage :

Responsable de l'antenne de Bordeaux

Mots clés : Aquitaine, Argile, Carrière, Coagulant, Coagulation, Décantation, Filtration, Flocculant, Flocculation, Halloysite, Matières En Suspension (MES), Plan d'eau, Sédimentation, Traitement, Turbidité

ENCEM Bordeaux

Association loi de 1901

2, allée d'Orléans - 33000 BORDEAUX

Tél. 05 56 81 90 82 - Fax 05 56 81 22 57 - encem.bordeaux@unicem.fr





REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier Monsieur Jean HUET pour sa disponibilité et ses conseils avisés. Il m'a apporté toute sa sympathie, son expérience et sa confiance.

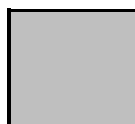
J'associe bien évidemment à mon maître de stage les trois chargés d'études qui travaillent à l'antenne d'ENCEM Bordeaux. Mademoiselle Karine BILLET, Monsieur Pascal MAUFFREY et Monsieur Thierry MERLE m'ont apporté aide et conseils sur le sujet traité et m'ont permis de travailler dans de bonnes conditions.

Je remercie tout particulièrement encore Monsieur Frédéric DUDILOT (secrétaire général de l'UNICEM Aquitaine) ainsi que Monsieur Philippe GOUZE (ingénieur environnement à l'UNICEM Aquitaine et Midi-Pyrénées) qui m'ont fait confiance en me proposant de traiter le sujet sur les MES. Ils m'ont d'autre part soumis certaines idées et m'ont permis de rencontrer les carriers dans les meilleures conditions.

Je remercie également mes professeurs de l'université de Bordeaux III, Monsieur Michel FRANCESCHI et Monsieur Jean-Marie MALEZIEUX, ainsi que Monsieur Jean-Bernard SALINERES (IEEB), qui ont apporté les corrections nécessaires au rapport dans les parties qui concernent leurs spécialités. Ils m'ont régulièrement orienté au cours des recherches bibliographiques et m'ont apporté divers conseils.

Je remercie enfin l'ensemble des carriers qui sont à l'origine de l'étude MES et qui m'ont apporté les informations nécessaires à la réalisation de l'étude :

- Monsieur BOUCHER (SIFRACO),
- Monsieur Bruno BOUQUET (MORILLON CORVOL),
- Monsieur Michel PERROT (GSM),
- Monsieur Michel RIVIERE (LES GRANULATS D'AQUITAINE).



AVANT-PROPOS

Ce rapport s'appuie sur des données bibliographiques. **Toutes les théories énoncées sont donc extraites d'ouvrages spécialisés ou de sites internet.** Dans la mesure où il se serait avéré long et délicat d'obtenir des autorisations écrites de la part de tous les auteurs cités dans la bibliographie, il a été entrepris de recopier textuellement certains écrits afin de respecter les idées des auteurs.

Je tiens de ce fait à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la rédaction des ouvrages cités en bibliographie à la fin du rapport.

L'objet de ce rapport est de rassembler les connaissances et les idées en relation avec les MES dans les plans d'eau des carrières. L'intégration de l'ensemble des paramètres recensés peut ensuite permettre de proposer des procédés de traitement pérennes pour clarifier les eaux turbides.



SOMMAIRE

TABLE DES FIGURES.....	9
INTRODUCTION.....	12
1) PRESENTATION DE L'ETUDE ET OBJECTIFS.....	15
1.1) OBJET DE L'ETUDE.....	16
1.2) IMPACTS DES MES SUR LE MILEU NATUREL.....	17
1.3) OBJECTIFS DES CARRIERS.....	19
2) DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES.....	20
2.1) LES ARGILES.....	21
2.1.1) Minéralogie des argiles.....	21
2.1.2) Les argiles dans les bassins alluvionnaires aquitains.....	28
2.1.3) Synthèse.....	36
2.2) LES PLANS D'EAU.....	37
2.2.1) Généralités.....	37
2.2.2) Les plans d'eau des carrières.....	40
2.2.3) Synthèse.....	43
2.3) LA DECANTATION.....	44
2.3.1) Généralités.....	44
2.3.2) Sédimentation naturelle des argiles dans l'estuaire de la Gironde....	49
2.3.3) Synthèse.....	50
3) INFLUENCE DES PRINCIPAUX FACTEURS SUR LA SEDIMENTATION DES ARGILES DANS LES PLANS D'EAU	51
3.1) ROLE DES COAGULANTS-FLOCCULANTS.....	52
3.1.1) Principe de la coagulation-floculation.....	52
3.1.2) Elimination des MES par coagulation-floculation.....	54
3.2) INFLUENCE DES FACTEURS ABIOTIQUES.....	55
3.2.1) pH.....	55
3.2.2) Température.....	55
3.2.3) Minéralisation.....	56
3.2.4) Oxygène dissous.....	58
3.2.5) MES hydrophobes.....	59
3.2.6) MES hydrophiles.....	60
3.2.7) Vent.....	61
3.3) INFLUENCE DES FACTEURS BIOTIQUES.....	64
3.3.1) Flore.....	64
3.3.2) Faune.....	66
3.4) SYNTHESE.....	67

4) ETUDE DE CAS.....	69
4.1) ARSAC.....	70
4.1.1) Contextes environnementaux.....	70
4.1.2) Traitements proposés et impacts sur le milieu naturel.....	77
4.2) AVENSAN.....	80
4.2.1) Contextes environnementaux.....	80
4.2.2) Traitements proposés et impacts sur le milieu naturel.....	87
4.3) CABANAC.....	90
4.3.1) Contextes environnementaux.....	90
4.3.2) Traitement proposé par ABILOLO et impacts sur le milieu naturel....	96
4.4) MIOS.....	97
4.4.1) Contextes environnementaux.....	97
4.4.2) Traitement proposé par l'IEEB et impacts sur le milieu naturel.....	97
4.5) AUTRES SITES.....	98
5) TRAITEMENTS DES MES	
DANS LES PLANS D'EAU DE CARRIERES.....	99
5.1) PROPOSITIONS DE PROCEDES DE TRAITEMENT	
ENVISAGEABLES.....	100
5.1.1) Traitement des MES par des coagulants-floculants	
et impacts sur le milieu naturel.....	100
5.1.2) Traitement des MES par une eau fortement minéralisée	
et impacts sur le milieu naturel.....	113
5.1.3) Traitement des MES par flottation	
et impacts sur le milieu naturel.....	114
5.1.4) Traitement des MES par filtration-évaporation	
et impacts sur le milieu naturel.....	115
5.1.5) Comparaison des traitements envisageables.....	119
5.2) DEBOUCHES ENVISAGEABLES POUR LES BOUES.....	120
5.3) RECOMMANDATIONS LORSQUE L'ON SOUHAITE TRAITER	
UN PLAN D'EAU TURBIDE.....	121
CONCLUSION.....	125
RESUME NON TECHNIQUE.....	128
GLOSSAIRE.....	133
TABLE DES MATIERES.....	137
BIBLIOGRAPHIE.....	145
CARNET D'ADRESSES DE L'ETUDE.....	149



TABLE DES FIGURES

Figure 1 :	tableau récapitulatif des propriétés principales des argiles.....	27
Figure 2 :	tableau des potentialités relatives en argiles dans les formations de sub-surface du bassin versant de la Garonne.....	32
Figure 3 :	coupe schématique des terrasses dans la basse vallée de la Garonne.....	36
Figure 4 :	tableau récapitulatif des cortèges argileux caractéristiques des formations sub-affleurantes du bassin versant de la Garonne.....	36
Figure 5 :	stratification thermique estivale d'un plan d'eau.....	38
Figure 6 :	hydrodynamisme d'un lac homogène.....	39
Figure 7 :	hydrodynamisme d'un lac stratifié.....	39
Figure 8 :	variation du renouvellement des eaux d'un lac en fonction de l'allongement de la carrière par rapport au sens d'écoulement de la nappe phréatique.....	40
Figure 9 :	tableau récapitulatif de l'effet des facteurs abiotiques sur la concentration en MES dans un plan d'eau.....	43
Figure 10 :	coupe schématique d'une particule de kaolinite dans l'eau.....	44
Figure 11 :	tableau récapitulatif de l'influence des facteurs abiotiques sur la sédimentation des argiles dans les plans d'eau.....	62
Figure 12 :	plan du site d'ARSAC.....	70
Figure 13 :	coupe lithologique du site d'ARSAC.....	71
Figure 14 :	tableau récapitulatif des analyses effectuées sur le plan d'eau d'ARSAC....	73
Figure 15 :	évolution prévisible de la concentration en MES dans le plan d'eau d'ARSAC par dilution.....	76
Figure 16 :	procédés de traitement envisageables sur le site d'ARSAC.....	79
Figure 17 :	plan du site d'AVENSAN.....	81
Figure 18 :	coupe lithologique du site d'AVENSAN.....	81
Figure 19 :	tableau récapitulatif des analyses effectuées sur le plan d'eau d'AVENSAN	83
Figure 20 :	schéma du procédé de traitement actuel sur le plan d'eau d'AVENSAN....	87
Figure 21 :	photo aérienne du site de CABANAC.....	91
Figure 22 :	coupe lithologique du site de CABANAC.....	92

Figure 23 :	schéma du procédé de traitement actuel sur le site de CABANAC.....	96
Figure 24 :	tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des coagulants-floculants présentés dans l'étude.....	105
Figure 25 :	schéma de l'arrivée des eaux turbides dans le bassin de traitement.....	111
Figure 26 :	schéma du procédé de traitement des eaux turbides par coagulation-floculation	112
Figure 27 :	coupe schématique du procédé de traitement par filtration-évaporation.....	116
Figure 28 :	graphique montrant l'évolution du débit d'infiltration des eaux en fonction de la perméabilité des terrains traversés depuis la surface jusqu'à l'aquifère.....	117
Figure 29 :	schéma du procédé de traitement des eaux turbides par filtration-évaporation	118
Figure 30 :	tableau de comparaison des quatre procédés de traitement des eaux turbides envisageables.....	119



INTRODUCTION

Les granulats constituent une ressource quantitativement limitée, indispensable au développement économique (bâtiments, voirie...) et social (logements...) de la société. Le bon fonctionnement de cette industrie est donc souhaitable et doit être considéré comme stratégique dans la notion de développement durable.

Néanmoins, malgré la volonté des carriers de maîtriser les conséquences environnementales de leurs activités, certains impacts inévitables, telle que la modification du paysage, engendrent une image négative des carrières pour le grand public.

Dans ce contexte socio-économico-environnemental contradictoire, l'apparition de plusieurs plans d'eau fortement turbides, suite à l'extraction de matériaux, préoccupe les exploitants. En effet, le réaménagement d'une carrière correspond aujourd'hui à la signature de la société et témoigne de son sérieux et de son respect de l'environnement. Autrement dit, plus la valorisation d'un plan d'eau sera réussie, plus le carrier verra ses demandes d'autorisations d'autres exploitations acceptées avec confiance par la préfecture, les élus et le public.

L'opalescence des lacs de carrières, rencontrée dans diverses communes de la GIRONDE, ne satisfait personne. Les carriers n'ont pas au départ envisagé la possibilité d'observer ce type de phénomène, car il n'était pas clairement identifié jusqu'alors. Plusieurs municipalités ainsi que des administrations souhaiteraient que le problème soit regardé de plus près. Il est dans l'intérêt de la profession d'étudier ce sujet et d'apporter des solutions qui permettraient de valoriser les aménagements et donc, à terme, de maintenir l'activité.

Plusieurs plans d'eau aquitains présentent donc des taux de MES (Matière En Suspension) importants qui, conformes ou non à la réglementation, nuisent à l'image finale du site par l'aspect peu attrayant de l'eau et inquiètent les riverains qui associent la couleur de l'eau à une pollution et craignent des déversements dans les cours d'eau qui constituent des exutoires.

On rencontre ces plans d'eau dans des zones aux contextes variés comme le Médoc (AVENSAN, ARSAC), le sud de BORDEAUX (CABANAC) et le Sud-Ouest de BORDEAUX à proximité du Bassin d'Arcachon (MIOS). Il semble difficile à première vue de corréliser ces sites, mais la couleur blanchâtre de tous ces plans d'eau laisse penser qu'il s'agirait de MES argileuses, et en particulier d'halloysite.

Ces MES sont mises en suspension lors de l'extraction. Elles décantent très lentement voire pas du tout.

Les différents aspects traités dans cette étude sont les suivants:

- Bibliographie nationale et internationale sur le sujet, la bibliographie sur les sites eux-mêmes étant fournie par les exploitants,
 - Caractérisation minéralogique des argiles,
 - Propriétés des plans d'eau fermés,
 - Généralités sur les processus de décantation,
- Influence des différents facteurs sur la sédimentation des argiles dans les plans d'eau,
- Typologie des sites turbides sur la base des critères environnementaux,

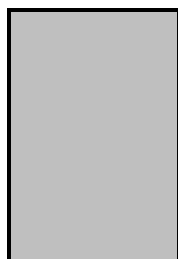
- Identification des argiles en suspension dans les sites étudiés,
- Recensement des traitements des MES (consultation d'entreprises spécialisées),
- Traitements des MES envisageables,
- Recherche de procédés de valorisation des argiles (consultation d'entreprises spécialisées).

Un questionnaire visant à connaître les sites potentiellement concernés par l'étude a été envoyé à tous les adhérents de la charte. Le peu de réponses nous a permis de ne cibler que 4 sites sur lesquels nous allons particulièrement réfléchir. Le but est de proposer des solutions générales afin d'éliminer les MES, qui pourraient par la suite être applicables à de nombreux cas relativement similaires à ceux exposés dans le rapport.

L'objet de cette étude est donc de faire un inventaire et une synthèse des solutions qui peuvent être proposées en ce qui concerne le traitement des MES dans les plans d'eau issus de l'extraction de matériaux.

L'étude s'est déroulée sur trois mois et ne peut évidemment pas être exhaustive. La synthèse bibliographique et par conséquent les principes qui en découlent restent parfois des hypothèses. Il semblerait donc judicieux de réaliser des tests en laboratoire avant toute application in situ. Néanmoins le travail a été soumis à des professeurs d'université et à des professionnels qui ont pu compléter, le cas échéant, certaines données essentielles manquantes.

Ce rapport est donc un guide des éléments essentiels à connaître concernant la décantation des plans d'eau turbides. Il permettra au lecteur de se faire une idée relativement précise des problématiques et des solutions envisageables. L'exploitant devra ensuite choisir la méthode la plus adaptée à son site avec l'appui technique d'un laboratoire compétent en la matière.



1^{ère} PARTIE
PRESENTATION DE L'ETUDE
ET OBJECTIFS

1.1) OBJET DE L'ETUDE

Certaines exploitations de carrières en GIRONDE présentent des plans d'eau fortement turbides, suite à l'extraction des matériaux. Contrairement à ce qui se passe dans la plupart des cas, les matières en suspensions, à l'origine de l'opalescence de l'eau des lacs, ne sédimentent pas naturellement malgré un temps de séjour relativement long dans le plan d'eau considéré.

Les conditions environnementales de ces sites turbides présentent donc des caractéristiques qui s'avèrent négatives pour la décantation naturelle de l'eau. Ces caractéristiques sont :

- soit en relation avec la nature et la concentration des MES,
- soit en relation avec les propriétés physico-chimiques de l'eau,
- soit en relation avec les facteurs externes au plan d'eau mais qui influent sur les propriétés de ce dernier.

On peut également penser que tous ces facteurs sont liés et interagissent, rendant ainsi la décantation des eaux des lacs très lente voire impossible.

La couleur opaque des plans d'eau considérés ne peut évidemment pas être du goût du grand public. Les communes concernées, ainsi que les propriétaires particuliers, s'inquiètent donc pour le réaménagement des sites qui passe bien évidemment par la valorisation des terrains. La présence inattendue de ces MES pourrait fortement compromettre certains aspects de réaménagement espérés initialement par l'ensemble des acteurs des territoires concernés.

1.2) IMPACTS DES MES SUR LE MILEU NATUREL

La nature et l'origine des composés colloïdaux présents dans les eaux naturelles sont très diverses. Ces composés sont essentiellement des minéraux argileux de structure différente, et des macromolécules organiques dont les formes les plus fréquentes sont regroupées en deux familles (les acides humiques et les acides fulviques).

1.2.1) IMPACT DES MES SUR LA COULEUR DE L'EAU

Selon la nature et la concentration des MES, la couleur de l'eau change. Outre le fait qu'elle passe d'un aspect limpide à une opalescence marquée, l'eau peut en effet prendre une teinte grisâtre, verdâtre, jaunâtre, ou encore rougeâtre.

Cette couleur sera d'autant plus pérenne que le renouvellement de l'eau sera lent. C'est la raison pour laquelle les plans d'eau colorés (du fait de leur turbidité relativement prononcée) le restent longtemps dans un processus naturel.

D'autre part, un plan d'eau coloré, s'il se déverse dans les eaux courantes, risque d'engendrer une coloration partielle du réseau hydrographique en aval.

Si la coloration d'un plan d'eau peut ne pas perturber la population locale, une coloration "suspecte" des ruisseaux peut inquiéter les pêcheurs et les associations de protection de l'environnement.

En effet, bien que la couleur ne soit pas à priori un facteur essentiel pour la préservation d'un milieu aquatique, son aspect peu attrayant peut être la traduction d'une source de pollution significative en amont.

1.2.2) IMPACT DES MES SUR LA QUALITE DE LA NAPPE PHREATIQUE

La production de fines lors d'une activité extractive ne devrait pas avoir d'influence sur la chimie des nappes. En effet, outre la dilution des eaux turbides dans la nappe, on peut présager que cette dernière est filtrée de ses particules fines dans les formations réservoirs.

Ces données n'étant toutefois pas démontrées, il serait plus sage de considérer que ce type d'impact est pour l'heure méconnu et à rechercher.

1.2.3) IMPACT DES MES SUR LA BIOCENOSE

Il est admis que la turbidité engendre une baisse de la photosynthèse du fait que la lumière ne peut plus pénétrer intensément le milieu. La baisse du taux d'oxygène dissous qui risque d'en résulter peut provoquer la diminution de la vie aérobie. La biocénose serait alors moins diversifiée et moins abondante.

Il n'est en revanche pas établi clairement que les MES risquent de colmater les branchies de certains poissons. L'idée suscite toutefois certaines interrogations, notamment pour les pêcheurs qui craignent une atteinte aux espèces plus sensibles à toute pollution (salmonidés notamment).

1.2.4) IMPACT DES MES SUR LA SEDIMENTATION

Si les MES sédimentaient dans le plan d'eau, le dépôt vaseux qui en résulterait ne perturberait pas le milieu outre mesure (excepté pour la flore en cas de dépôt important). Ce serait au contraire une chance dans certains cas de clarifier l'eau et donc de la valoriser. Il est toutefois recommandé de surveiller que ces MES ne colmatent pas le substratum ni les berges du plan d'eau. Ceci pourrait en effet avoir pour conséquences de modifier l'hydrodynamisme de la nappe et de nuire à la qualité de l'eau du lac (par diminution de son renouvellement).

D'autre part, si les MES d'origine lacustre sont évacuées (par un trop-plein) vers les eaux courantes, il y a un risque de les voir s'accumuler dans un autre système naturel. Soit on y retrouverait les mêmes suspensions et donc les mêmes problèmes, soit la sédimentation y serait favorisée (du fait de paramètres physico-chimiques, ou hydrodynamiques, ou topographiques différents) et l'accumulation des particules pourrait modifier complètement le système originel (comblement, évolution du benthos...).

Soulignons d'autre part que les sédiments peuvent piéger les métaux lors de leur dépôt. Le risque d'accumulation et de concentration de ces métaux pourrait constituer une zone potentiellement nuisible pour la qualité de l'eau en cas de dissolution soudaine.

1.2.5) SYNTHESE

L'impact des MES présentes dans les plans d'eau ne serait pas significatif vis-à-vis de l'environnement tant que ces dernières resteront dans le plan d'eau et qu'elles n'en colmateront ni le substratum ni les berges.

Il semble donc fortement souhaitable de **ne pas prévoir d'exutoire du plan d'eau turbide vers le réseau hydrographique.**

En cas de crue, il serait préférable que les eaux de débordement soit contenues. On pourrait par exemple **envisager de créer un trop-plein qui se déverserait vers un bassin de décantation** (ce dernier reçoit régulièrement les eaux de lavage).

1.3) OBJECTIFS DES CARRIERES

L'objectif des carrières est de résoudre à moindre coût le problème de non décantation naturelle des plans d'eau issus de l'extraction de matériaux. La pérennisation de l'activité passant par un réaménagement valorisant systématique des carrières, les sociétés concernées se doivent en effet de se pencher sur le problème des argiles qui sédimentent difficilement dans les conditions hydrodynamiques naturelles.

Outre une synthèse bibliographique sur le sujet et une typologie des sites concernés par "les MES", les carrières ont pour objectif :

- d'éviter le rejet de MES dans le réseau hydrographique,
- de déterminer la nature et la concentration des MES dans les plans d'eau turbides,
- de définir les facteurs à l'origine de ces MES,
- d'établir un inventaire de toutes les solutions de traitement existantes,
- de réaliser des tests in situ,
- d'estimer le coût de ces différents traitements,
- de valoriser éventuellement les argiles décantées.

Afin de **déterminer la nature et la concentration des suspensions colloïdales**, les méthodes analytiques connues sont basées sur :

- les propriétés optiques de ces suspensions,
- l'existence d'une charge à la surface des particules,
- l'oxydabilité des composés organiques.

Afin de **définir les facteurs à l'origine des suspensions argileuses**, il convient de rappeler certaines généralités sur les propriétés des argiles, des plans d'eau, et de la décantation (voir 2^{ème} et 3^{ème} partie). Des exemples sur les carrières ou sur la région étudiée permettront de préciser ces facteurs.

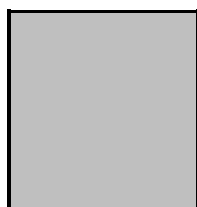
Afin d'**établir un inventaire exhaustif des solutions de traitement existantes**, il convient :

- de se renseigner sur les tests réalisés pour les carrières (au laboratoire et in situ),
- de se renseigner auprès des laboratoires ou des fabricants de coagulants par exemple,
- de proposer des solutions générales ou adaptées pour des contextes particuliers.

L'**estimation du coût des différents traitements** est délicate et très approximative. Elle dépend notamment des informations que veulent bien fournir les sociétés de service et leurs clients.

Afin de **valoriser les argiles décantées**, il convient de consulter les entreprises spécialisées dans ce domaine.

La réalisation des **tests in situ** passerait au préalable par un accord commun entre les carrières suite à une réflexion sur l'ensemble des propositions qui sont présentées dans ce rapport.



2ème PARTIE
DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

2.1) LES ARGILES

Les carriers connaissent les principales caractéristiques des argiles rencontrées dans le Bassin Aquitain. Il semble néanmoins nécessaire de rappeler certaines généralités pour aborder l'étude. En effet, les argiles sont les MES qui ne sédimentent pas naturellement dans certains plans d'eau et il existe une grande variété de familles qui présentent des caractéristiques propres (notamment en terme de sédimentation).

La compréhension de la répartition géographique des argiles en fonction de certains paramètres environnementaux dans le Bassin Aquitain peut permettre d'anticiper d'éventuelles mises en suspension d'argile difficilement décantable lors de l'extraction des matériaux.

2.1.1) MINERALOGIE DES ARGILES

Les minéraux argileux sont des hydrosilicates d'aluminium et de magnésium appartenant à la classe des phyllosilicates, et sont formés par des arrangements bidimensionnels de tétraèdres silicium-oxygène et d'octaèdres aluminium-oxygène. La superposition des **couches octaédriques** (O) et **tétraédriques** (T) s'opère de différentes façons et conduit à la formation d'argiles ayant des structures et des propriétés différentes.

Notons que l'une des propriétés caractéristiques des argiles est le phénomène de substitution isomorphique, c'est-à-dire le remplacement des ions Si^{4+} par des ions Al^{3+} de taille voisine, mais de valence différente. Cette substitution entraîne un déficit de charge. Elle est à l'origine de la **charge de surface**, généralement **négative**, des particules argileuses en suspension dans l'eau.

La liste des familles d'argiles que nous allons décrire n'est pas exhaustive. Elle recense les familles les plus rencontrées dans les bassins alluvionnaires aquitains (partie 2.1.2).

2.1.1.1) FAMILLE DE LA KAOLINITE

La kaolinite appartient à la classe des phyllosilicates et présente un système cristallin triclinique. Le feuillet élémentaire des minéraux de cette famille est constitué par l'association d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (de type TO). L'ensemble du feuillet est électriquement neutre, les valences de chacune des couches s'équilibrant. L'épaisseur élémentaire du feuillet est de 7 Å (soit $7 \cdot 10^{-10}$ m) et la formule de la kaolinite est $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$.

2.1.1.1.1) CONDITIONS DE GISEMENT

Les minéraux de la famille de la kaolinite se forment dans des milieux acides pauvres en cations. Tous les types de sols ayant subi un lessivage intense, tels que les latérites et les podzols, contiennent plus ou moins exclusivement des minéraux de la famille de la kaolinite.

2.1.1.1.2) CARACTERISTIQUES

Dureté : 2 à 2,5.

Densité : 2,4 à 2,64.

Coloration : minéraux généralement blancs, blancs gris ou blancs légèrement jaunâtres.

Faciès : se présentent en masses onctueuses au toucher.

Capacité d'échange en cations : elle est assez faible, elle dépasse rarement 20 méq pour 100 g.

Solubilité : peu attaquables aux acides excepté à l'acide fluorhydrique.

2.1.1.2) FAMILLE DE L'HALLOYSITE

L'halloysite (ou kaolinite hydratée) appartient à la classe des phyllosilicates et présente un système cristallin monoclinique. Elle est constituée par des feuillets identiques à ceux des minéraux de la famille de la kaolinite, mais ils sont séparés par une couche de molécules d'eau. Ces minéraux ont pour formule $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et leur équidistance fondamentale est d'environ 10 Å (TO). Par déshydratation vers 75 ou 80°C, le minéral perd une partie de son eau et se transforme en **métahalloysite**, de formule $\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$ et d'épaisseur environ 7 Å (TO), difficilement discernable de la kaolinite. Toutefois, la transformation ne serait totale que vers 400°C (BRINDLEY, GOODYEAR, 1948).

2.1.1.2.1) CONDITIONS DE GISEMENT

Les conditions de formation de l'halloysite sont voisines de celles des kaolinites. Ce sont des produits d'altération hydrothermale ou atmosphérique des silicates d'aluminium et surtout des feldspaths. Les minéraux de ce groupe sont minuscules et se rencontrent beaucoup plus rarement que les kaolinites. Les gisements de nature sédimentaire comme aux Eyzies (Dordogne) sont exploités en vue d'utilisation industrielle.

2.1.1.2.2) CARACTERISTIQUES

Dureté : 1 à 3.

Densité : 1 à 2,2.

Coloration : l'halloysite a une couleur très blanche, parfois grisâtre, jaunâtre, verdâtre ou rougeâtre.

Faciès : le minéral se présente le plus souvent en masses terreuses.

Capacité d'échange en cations : elle est assez faible, elle dépasse rarement 20-25 méq pour 100 g.

2.1.1.3) FAMILLE DE LA MONTMORILLONITE

La montmorillonite appartient à la classe des phyllosilicates et présente un système cristallin monoclinique. Cette famille est caractérisée par un feuillet qui comporte une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques (TOT), de formule générale $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Les liaisons entre les feuillets sont considérablement affaiblies. Divers cations et un nombre variable de couches de molécules d'eau peuvent donc se placer en position intercalaire. L'épaisseur élémentaire du feuillet n'est donc pas fixe et varie avec le cation associé entre 12.5 et 17.5 Å. Les argiles gonflantes correspondent généralement à cette famille.

2.1.1.3.1) CONDITIONS DE GISEMENT

Il est difficile de préciser les conditions de formation de la montmorillonite. D'après la thèse de G. MILLOT (1949), la montmorillonite caractérise les milieux sédimentaires relativement riches en bases, particulièrement en magnésium, et de pH légèrement ou nettement alcalin. Il faut ajouter que les solutions imprégnant le milieu ne doivent pas être trop riches en potassium, sinon on verrait apparaître les micas.

2.1.1.3.2) CARACTERISTIQUES

Dureté : minéral très tendre, se laisse couper comme le savon.

Densité : 2,04.

Coloration : blanc gris, blanc verdâtre, rose plus ou moins clair ou chamois.

Faciès : la montmorillonite est un minéral onctueux qui se présente généralement en masses compactes, ressemblant à la paraffine ou au savon.

Capacité d'échange en cations : elle varie de 100 à 130 méq pour 100 g d'argile calcinée à 900°C.

Solubilité : le minéral est facilement attaqué; partiellement soluble dans l'acide chlorhydrique, il est totalement décomposé par l'acide sulfurique.

2.1.1.4) FAMILLE DE L'ILLITE

L'illite appartient à la classe des phyllosilicates et présente un système cristallin monoclinique. L'illite dérive directement de la muscovite (ou mica blanc). Par rapport à cette dernière, elle présente toutefois un déficit en ions K^+ qui sont partiellement remplacés par l'eau (JONAS et THOMAS, 1960). La liaison entre feuillets s'en trouve donc affaiblie, ce qui explique l'instabilité relative de ce minéral. Cette famille a pour formule $(\text{Si}_{(4-x)}\text{Al}_x)\text{O}_{10}(\text{Al}_2)(\text{OH})_2(\text{K})_x - x$ voisin de 0.5 – sa structure est de type (TOT), et l'équidistance entre ses feuillets tétraédriques est d'environ 10 Å.

2.1.1.4.1) CONDITIONS DE GISEMENT

L'illite est un minéral assez répandu, notamment dans les sols bruns podzolitiques et dans les sols de prairies. C'est vraisemblablement le minéral argileux le plus fréquent dans les sols des pays tempérés.

2.1.1.4.2) CARACTERISTIQUES

Dureté : 1 à 2.

Densité : 2,6 à 2,9.

Coloration : l'illite est blanc gris légèrement nacré.

Facès : ce sont toujours des paillettes fines.

Capacité d'échange en cations : elle varie de 20 à 30 méq pour 100 g.

Solubilité : l'illite est peu attaquable par les acides.

2.1.1.5) FAMILLE DE LA VERMICULITE

La vermiculite appartient à la classe des phyllosilicates et présente un système cristallin monoclinique. Dans la vermiculite typique, les cations intercalaires sont des ions magnésium. Le nombre de couches d'eau est alors fixé à 2 et à l'inverse de la montmorillonite, l'espacement basal est constant à 14 Å (TOT). Dans quelques cas cependant, divers cations (Ca^{2+} , Ba^{2+} , Li^+ , Na^+) peuvent se substituer au magnésium. L'épaisseur élémentaire des feuillets est alors variable. La formule générale de la vermiculite est $\text{Mg}_{0,7}(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_6\text{SiAl}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4,8\text{H}_2\text{O}$.

2.1.1.5.1) CONDITIONS DE GISEMENT

La vermiculite se présente en général comme un produit d'altération des micas et peut-être des chlorites. La formation par diagenèse de ce minéral est assez simple, il semble qu'il y ait oxydation du fer ferreux, ce qui déséquilibre la charge de la couche octaédrique et provoque par voie de conséquence l'ouverture des feuillets.

2.1.1.5.2) CARACTERISTIQUES

Dureté : 1 à 2.

Densité : 2,24 à 2,30.

Coloration : blanche (sauconite et saponite), verdâtre ou brune pour les variétés ferrifères.

Faciès : ces minéraux constituent en général des masses compactes.

Capacité d'échange en cations : elle paraît se situer autour de 50 à 60 méq pour 100 g.

Solubilité : les variétés ferrifères sont sensibles à toutes les attaques acides.

2.1.1.6) FAMILLE DE LA CHLORITE

La chlorite appartient à la classe des phyllosilicates et présente un système cristallin monoclinique. Minéraux à quatre couches (TOTO), les chlorites présentent une équidistance réticulaire de base de 14 Å. Des chlorites gonflantes ont toutefois été signalées par certains auteurs (HONEYBORNE, 1951). La formule générale est $(\text{Mg,Al,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$.

2.1.1.6.1) CONDITIONS DE GISEMENT

Les chlorites sont des minéraux typiques du métamorphisme. On les trouve fréquemment dans les schistes, mais leur présence a été signalée dans les sédiments récents ainsi que dans les sols. Ces minéraux semblent toutefois moins présents dans les sols que les illites, les kaolinites et les montmorillonites.

2.1.1.6.2) CARACTERISTIQUES

Dureté : 2 à 2,5.

Densité : 2,6 à 2,96.

Coloration : ces minéraux sont d'un vert plus ou moins sombre, parfois blanc.

Faciès : les chlorites se présentent en lames plus ou moins larges.

Capacité d'échange en cations : non altérées, elle est de l'ordre de 10 à 15 méq. pour 100g.

Solubilité : les chlorites sont décomposées par les acides, les variétés ferrifères sont les plus attaquables.

2.1.1.7) MINERAUX ARGILEUX INTERSTRATIFIES

Les minéraux interstratifiés sont constitués par des feuillets élémentaires de natures différentes, en proportions variées et se succèdent plus ou moins régulièrement. Très fréquents dans la nature et en particulier dans les sols, ces minéraux se présentent sous de nombreuses variétés. Cette diversité résulte du nombre élevé de possibilités de combinaisons de trois facteurs régissant la nature des minéraux :

- le nombre de constituants,
- le type d'interstratification,
- la nature des minéraux associés.

2.1.1.7.1) NATURE DES MINERAUX ASSOCIES

Théoriquement, tous les minéraux argileux simples sont susceptibles de s'interstratifier. On considère cependant que les feuillets les plus rencontrés sont l'illite, la montmorillonite, la vermiculite, et la chlorite.

En regroupant deux à deux ces minéraux de base, on est conduit à distinguer six principales espèces d'interstratifiés :

illite-montmorillonite	illite-vermiculite
illite-chlorite	chlorite-montmorillonite
chlorite-vermiculite	montmorillonite-vermiculite

2.1.1.7.2) CONDITIONS DE GISEMENT

La présence de minéraux interstratifiés paraît avoir une signification génétique plus marquée que les espèces pures. Dans la majorité des cas, les interstratifications intéressent des minéraux ayant certains éléments de leurs structures identiques ou presque.

2.1.1.8) SYNTHESE

Le tableau ci-dessous résume les principales propriétés des différentes familles d'argiles (les interstratifiés ne sont pas présentées car leur diversité viendrait compliquer profondément la lecture du tableau).

FAMILLES	DENSITE	COULEUR	C.E.C. (méq pour 100 g)	GISEMENTS
<i>Kaolinite</i>	2,4 à 2,64	blanc, blanc gris, ou blanc jaunâtre	20	milieux acides et podzols
<i>Halloysite</i>	1 à 2,2	très blanc, grisâtre, jaunâtre, verdâtre ou rougeâtre	20 à 25	rare (milieux acides, et podzols)
<i>Montmorillonite</i>	2,04	blanc gris, blanc verdâtre, ou rose	100 à 130	milieux basiques
<i>Illite</i>	2,6 à 2,9	blanc gris	20 à 30	très fréquente en milieu tempéré (podzols et sols de prairies)
<i>Vermiculite</i>	2,24 à 2,3	blanc, verdâtre, ou brun	50 à 60	produit d'altération des micas et chlorites
<i>Chlorite</i>	2,6 à 2,96	vert ou blanc	10 à 15	typique du métamorphisme

Figure 1 : tableau récapitulatif des propriétés des principales des argiles

Notons que la densité des argiles influe directement sur la vitesse de sédimentation. En effet, plus la densité est élevée, plus la vitesse de sédimentation théorique (loi de Stokes, voir partie 2.3.1.1) est importante, et inversement. C'est donc **l'halloysite** qui est **la plus contraignante en terme de temps de décantation**.

La couleur et le type de gisement des différentes familles d'argiles peuvent permettre d'avoir une idée sur la nature de ces dernières dans les plans d'eau avant toute analyse complémentaire.

La C.E.C. (Capacité d'Echange Cationique) représente la facilité avec laquelle une argile peut capter des cations présents dans son environnement. Plus la C.E.C. est importante, plus l'argile concernée captera facilement les cations naturellement présents ou introduits dans le cadre d'un traitement par coagulation-floculation (voir partie 3.1), et inversement. De ce point de vue, ce sont donc **la kaolinite, l'halloysite et l'illite** qui **sont les argiles les moins faciles à flocculer**.

2.1.2) LES ARGILES DANS LES BASSINS ALLUVIONNAIRES AQUITAINS

Cette partie a pour objectif de comprendre la répartition géographique des argiles dans la région Aquitaine. L'intérêt est de connaître dès la phase de prospection les cortèges argileux susceptibles d'être rencontrés lors de l'extraction. Ainsi, le cas échéant, le traitement des MES de la carrière considérée pourrait être pris en compte dès le départ. On pourrait alors envisager le réaménagement de la carrière en fonction du procédé de traitement jugé le plus adéquat.

2.1.2.1) PRESENTATION DES FORMATIONS SUB-AFFLEURANTES

2.1.2.1.1) LE PLIOCÈNE

Le Pliocène en Gironde est représenté par des formations détritiques assez grossières et de couleur vive qui constituent des **lambeaux d'anciennes terrasses alluviales**. Ces lambeaux atteignent une extension notable dans le Blayais et l'Entre-Deux-Mers (LATOUCHE, 1971).

2.1.2.1.2) LES FORMATIONS DU QUATERNAIRE

Les sédiments quaternaires occupent en Aquitaine de très vastes étendues (environ 1/3 de la surface du bassin). Ils recouvrent fréquemment sur une faible épaisseur les terrains tertiaires et leur présence est fondamentale pour l'évolution pédologique locale. Deux types de formations se sont succédées :

- Des **formations graveleuses d'origine fluvatile**. Elles constituent les terrasses, témoins des déplacements des lits des fleuves. Particulièrement étendues dans le Bordelais pour la Garonne, ces terrasses sont dans la majorité constituées de **galets** et de **graviers** associés à de **faibles proportions d'argile**.
- Des **formations sableuses d'origine éolienne**. Elles occupent notamment de très vastes étendues dans les départements de la GIRONDE et des LANDES. Les "sables des Landes" semblent s'être mis en place en plusieurs phases successives au cours du Quaternaire récent (THIBAULT, 1970). Ces sables peuvent atteindre une puissance de plusieurs dizaines de mètres à l'Ouest (C.LATOUCHE, 1971).

2.1.2.2) LES TERRASSES DANS LE BASSIN DE LA GARONNE

Les complexes alluvionnaires occupent une surface de 11 à 12 % dans le bassin de la Garonne. La majeure partie, d'âge ancien, est plus ou moins régulièrement étagée en terrasses dont la mise en place s'est effectuée entre la fin du Pliocène et le Würm.

Du fait des reprises multiples qui ont localement affectées les dépôts, les terrasses, loin de présenter une continuité, doivent être considérées comme polygéniques.

A l'Ouest de la Garonne notamment, divers prolongements des terrasses existent sous le sable des Landes et marquent les différentes étapes de la migration de la "pré-Garonne" (LACON, 1948).

Les formations graveleuses alluvionnaires occupent de très vastes surfaces dans le département de la GIRONDE. Dans l'ensemble, **quatre terrasses anciennes ont été distinguées** (LINDER, 1866 ; BLAYAC, 1913 ; FABRE, 1939 ; DAGUIN et VIGNEAUX, 1953). Trois d'entre elles ont été rapportées au Quaternaire (a1a, a1b, a1c), les dépôts les plus anciens (p) sont considérés comme des lambeaux d'une nappe d'épandage pliocène. Dans l'ensemble, les critères d'individualisation de ces dépôts sont assez incertains et reposent avant tout sur une base altimétrique. Sur le terrain, ces matériaux apparaissent principalement constitués de graviers et leur différenciation s'avère souvent malaisée (LATOUCHE, 1971).

2.1.2.2.1) LES TERRASSES DU PLIOCÈNE

- Le Blayais et la bordure Nord-Occidentale de l'Entre-Deux-Mers

Les dépôts sont régulièrement constitués de graves argileuses rouges. Les éléments détritiques sont abondants, mais leur taille est relativement faible et atteint rarement 5 cm de diamètre. La **kaolinite** est nettement dominante.

- Les graves et argiles rouges de la région bordelaise

Les sédiments du Pliocène n'affleurent qu'en des zones très restreintes et sont constitués en majeure partie de graves rouges semblables à celles décrites ci-dessus. La **kaolinite** est nettement dominante. Toutefois, les niveaux inférieurs qui représentent souvent la base des paléosols contiennent encore **certaines quantités de montmorillonite**.

- Les formations Pliocène du Médoc

Ces formations présentent une grande disparité de faciès. Du point de vue minéralogie des argiles, on y observe parallèlement une très large hétérogénéité :

- les **sédiments graveleux blanchâtres** contiennent de très importantes proportions de minéraux du groupe de la **kaolinite**. A l'inverse de ce qui avait été observé dans les formations précédentes, ces minéraux offrent une assez mauvaise cristallinité.
- les **formations brunes** sont nettement moins riches en kaolinite. L'**illite** est toujours abondante et parfois dominante. La **montmorillonite** et la **vermiculite** complètent le cortège (LATOUCHE, 1971).

2.1.2.2.2) LES TERRASSES QUATERNAIRES ANCIENNES

Terrasses a1a

Une réelle unité se dégage en ce qui concerne les terrasses de l'ensemble Garonne-Gironde : la **kaolinite hydratée** (ou **halloysite**) est souvent cardinale (60 à 90 %), l'**illite** accessoire (10 à 35 %), les autres constituants très épisodiques.

Terrasses a1b

Comme pour les terrasses a1a, on observe une entité bien définie en ce qui concerne les dépôts anciens de la Garonne et de la Gironde. La **kaolinite (hydratée ?)** est souvent cardinale (60 à 80 %), l'**illite** accessoire (15 à 40 %), les autres constituants très épisodiques.

Terrasses a1c

D'après les cartes géologiques, les lambeaux de cette terrasse n'affleurent qu'en des zones très localisées au Nord de BORDEAUX (région de BRUGES à PAREMPUYRE). L'**illite** (35 à 50 %) devient dominante sur la **kaolinite** (20 à 45 %). La **chlorite** et les **interstratifiés chlorite-vermiculite** apparaissent en proportion importante (10 à 30 %)

2.1.2.2.3) ORIGINE DES MATÉRIAUX

Les minéraux des terrasses quaternaires présentent, par rapport à ceux des dépôts pliocènes, des caractéristiques nouvelles puisqu'il s'agit le plus souvent de kaolinite mal cristallisée. On note parallèlement une légère diminution des teneurs en kaolinite. On constate une régression assez régulière des deux paramètres depuis les matériaux pliocènes jusqu'aux dépôts de la terrasse a1b. La terrasse a1c présente un renouvellement complet des phases argileuses caractérisées par la brusque apparition de minéraux fragiles. Ce phénomène pourrait être en relation avec un changement climatique ou un déplacement des aires d'érosion. Parallèlement, l'apparition de **vermiculite résulte de l'installation du régime tempéré atlantique** qui oriente préférentiellement les altérations vers ce minéral (CAMEZ, 1962) très fréquent dans les sols aquitains actuels.

Des **climats très chauds et humides** (au Pliocène et durant les période interglaciaires Günz-Mindel et surtout Mindel-Riis par exemple) sont **générateurs d'argiles fortement alumineuses**. CASTAING (1970) situe à la base du Riis la mise en place de la terrasse a1b. C'est également à partir du Riis que THIBAULT (1970) signale une évolution des climats interglaciaires vers le type tempéré actuel. Or c'est précisément à partir de la terrasse a1c (Riis moyen pour CASTAING) que de nouveaux cortèges argileux apparaissent (LATOUCHE, 1971).

2.1.2.2.4) EVOLUTION LONGITUDINALE DES DÉPÔTS

Les dépôts les plus anciens (**p**, **a1a**, **a1b**) sont caractérisés par la **prédominance de la kaolinite** tant dans les portions amont des vallées de la Garonne, que dans la zone aval à proximité de l'estuaire de la Gironde. D'une manière générale, il apparaît que les teneurs en kaolinite sont plus élevées à l'aval qu'en amont.

Les dépôts **a1c** présentent, à l'inverse des terrasses anciennes, des teneurs en kaolinites plus importantes en amont qu'en aval. La chlorite est représentée à l'amont par son interstratifié illite-chlorite et à l'aval par son interstratifié chlorite-vermiculite (LATOUCHE, 1971).

2.1.2.3) LES ARGILES DANS LES SOLS DU BASSIN AQUITAIN

Les formations géologiques présentent des cortèges argileux caractéristiques qui évoluent au cours des phénomènes de pédogenèse.

La connaissance des argiles contenues dans les sols pourrait paraître superflue pour cette étude. En effet, les terres végétales sont décapées hors eau et entassées sur une hauteur pouvant atteindre plusieurs mètres. On ne voit donc pas comment elles pourraient influencer sur les MES argileuses contenues dans les plans d'eau des gravières.

Toutefois, outre le fait que **les ruissellements sur les amas terreux risquent de rejoindre le plan d'eau et de le "contaminer"**, la connaissance des argiles dans les sols peut nous intéresser à deux niveaux :

- les argiles peuvent provenir de l'altération de la roche mère sous-jacente, qui constitue parfois le gisement convoité, et renseignent donc sur la nature des argiles qui pourraient être mises en suspension lors de l'extraction;
- les argiles du sol peuvent être lessivées et s'accumuler sur un horizon sous-jacent qui pourrait être mis en eau lors de l'extraction et donc générer des MES argileuses.

2.1.2.3.1) PRESENTATION DES CORTEGES ARGILEUX DANS LES SOLS

L'association kaolinite hydratée - interstratifiés vermiculitiques caractérise les **sols issus de matériaux de type granitique**.

L'association illite – chlorite et interstratifiés vermiculitiques se rencontre d'une part dans les schistes et micaschistes très métamorphisés infra-paléozoïques et paléozoïques et, d'autre part, dans les **formations éoliennes du Quaternaire supérieur**.

L'illite plus ou moins dégradée en interstratifiés vermiculitiques ou montmorillonitiques reste cardinale pour tous les dépôts s'échelonnant **entre le Trias et le Crétacé inférieur** inclus.

La montmorillonite et ses interstratifiés caractérisent à la fois les matériaux du **Crétacé supérieur** et le vaste ensemble des molasses dont l'âge va **de l'Eocène au Miocène** inclus.

La kaolinite est présente dans deux types de dépôts : ceux de l'**Eocène inférieur** et ceux du **Plio-Quaternaire**

L'extrême diversité des phases argileuses des formations venant à l'affleurement en Aquitaine est en relation avec plusieurs facteurs :

- La variété des terrains venant à l'affleurement (les roches cristallines acides et basiques sont largement représentées et la quasi-totalité des groupes sédimentaires peut être rencontrée) dont l'âge s'étale sur la totalité de l'échelle stratigraphique;
- La variété des types génétiques des sols (simples ou complexes) dont l'âge est très variable.

FORMATION	TENEUR EN ARGILE (en %)	COMPOSITION MINERALOGIQUE RELATIVE DES ARGILES (en %)				
		M + IM	I	K	C	V
Bassin Versant de la Garonne	18,7	33	37	15	8	6
Pliocène + Limons	40	0	20	60	10	10
Alluvions	20	20	30	30	10	10
Sables de Landes + Limons	10	0	40	10	30	20

M + IM : Montmorillonite + interstratifiés Montmorillonite-Illite

I : Illite

K : Kaolinite

C : Chlorite

V : Vermiculite

Figure 2 : tableau des potentialités relatives en argiles dans les formations de sub-surface du bassin versant de la Garonne (d'après LATOUCHE, 1971)

2.1.2.3.2) EVOLUTION DES CORTEGES ARGILEUX DANS LES SOLS

La nature et l'évolution des argiles dans les sols homogènes sont très étroitement liées aux caractéristiques des roches mères. Deux raisons essentielles font que celles-ci exercent un contrôle étroit sur les phases argileuses des sols :

- elles sont responsables du stock argileux initial ;
- elles pilotent l'évolution du sol.

Dans **les sols peu évolués de type AC** (rendzine par exemple), il est apparu que l'évolution des minéraux argileux dans les profils était elle-même réduite. Des minéraux fragiles comme la montmorillonite ou même l'attapulgite, quand ils existent dans la roche mère, peuvent être retrouvés dans les horizons de surface.

Dans **les profils plus évolués de type ABC**, le devenir des minéraux argileux devient plus complexe. Dans les sols bruns et les sols faiblement lessivés, les minéraux fragiles comme la montmorillonite disparaissent plus ou moins rapidement à mesure que l'on s'élève dans le profil. Ils sont fréquemment relayés par les édifices interstratifiés et les pourcentages relatifs d'illite subissent une augmentation apparente de la roche mère aux horizons de surface.

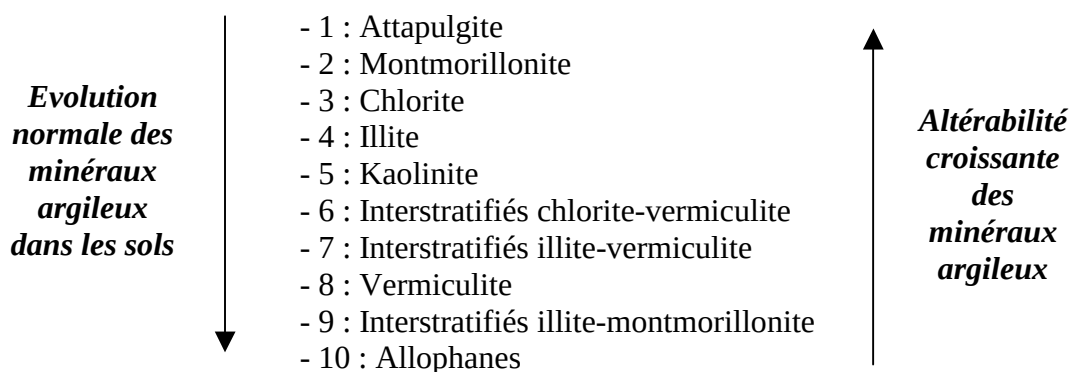
Dans **les sols podzoliques et les podzols** particulièrement fréquents en Aquitaine, les cortèges argileux subissent des transformations profondes de la base au sommet des profils. Non seulement les minéraux fragiles comme la montmorillonite et le chlorite disparaissent rapidement, mais l'illite sensiblement plus stable est elle-même altérée et souvent remplacée par des édifices interstratifiés vermiculitiques, de la vermiculite ou même par des constituants amorphes de type allophane (LATOUCHE, 1964). La kaolinite et, dans la fraction plus grossière, les paillettes de muscovite sont elles-mêmes partiellement altérées.

Les sols aquitains peuvent être divisés en deux grands groupes :

➤ Le **groupe des sols homogènes**, c'est-à-dire issus de l'altération d'une roche mère unique ou dont une même roche mère a fourni la quasi-totalité des éléments. Les minéraux argileux qu'ils contiennent sont de deux types :

- des minéraux directement hérités des roches mères : ces minéraux pourraient donc être qualifiés de "primaires". Ce sont principalement la montmorillonite, l'illite et la kaolinite. Leur répartition dans les sols aquitains est plus ou moins étroitement liée à la nature du substratum géologique (LATOUCHE, 1967).
- des minéraux ou des constituants résultant de la transformation des minéraux préexistants dans les roches mères. Ils pourraient donc être qualifiés de "secondaires". Ce sont principalement la vermiculite, divers édifices interstratifiés, quelques kaolinites secondaires et enfin, dans certains podzols, de notables quantités de constituants amorphes de type allophane (LATOUCHE, 1964).

Dans ces sols homogènes, l'évolution des minéraux est "continue" : elle tend toujours à la **dégradation des minéraux "primaires"** et à leur **remplacement par des minéraux "secondaires"**. Cette évolution est d'autant plus prononcée que les profils sont plus évolués et les minéraux primaires plus fragiles. Ces dernières disparaissent donc suivant leur ordre d'altérabilité :



➤ Le **groupe des sols complexes**. Dans ces sols se surajoutent aux minéraux "primaires" et "secondaires", résultant de l'évolution pédologique normale, **divers minéraux** que nous qualifierons d'**étrangers**. Ils ont été apportés, au sommet des profils, à la faveur de divers épandages éoliens qui ont été particulièrement importants en Aquitaine au Quaternaire. Ils ont pu accessoirement être apportés par alluvionnement et colluvionnement. Parmi ces minéraux, la muscovite, l'illite, la chlorite, et la montmorillonite sont apparues les plus fréquentes.

La juxtaposition de profils homogènes et complexes nous paraît constituer une caractéristique importante des sols aquitains, pour lesquels la mise en place récente d'un important épandage éolien a été l'une des causes essentielles de leur diversité (LATOUCHE, 1971).

2.1.2.4) REPARTITION ET EVOLUTION DES ARGILES FLUVIATILES DANS LE BASSIN AQUITAIN

2.1.2.4.1) CORRESPONDANCE ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DES RIVIÈRES ET LA MINÉRALOGIE DES ARGILES TRANSPORTÉES

Pour la Garonne, il existe une très nette **relation entre le pH des eaux et l'abondance de la montmorillonite dans les alluvions**.

A l'inverse, les eaux acides de la Dordogne véhiculent des argiles fortement kaolinitiques. A l'élévation des pH en aval correspond un renouvellement complet des phases argileuses.

S'il est admis que le pH des eaux est fonction de la nature des minéraux en suspension, ne peut-on pas penser, réciproquement, que le pH de l'eau exerce une influence sur la nature des minéraux en suspension ? Retenons pour l'instant qu'il y a un certain **équilibre entre la chimie des eaux et la minéralogie des alluvions fluviales**, sans pouvoir préciser lequel des deux facteurs influence l'autre (LATOUCHE, 1971).

2.1.2.4.2) REPARTITION DES ARGILES FLUVIATILES RECENTES

Les phases argileuses des alluvions du réseau hydrographique garonnais sont apparues extrêmement variées. Tous les types minéralogiques ont été pratiquement rencontrés, bien que deux minéraux (l'**illite** et la **montmorillonite**) dominant très largement dans l'ensemble. Sur le cours principal de la Garonne, l'évolution des phases argileuses reste toujours très progressive et aucune rupture minéralogique brutale n'a été mise en évidence (LATOUCHE, 1971).

2.1.2.4.3) EVOLUTION DANS LE TEMPS DES CORTÈGES ARGILEUX FLUVIATILES

En ce qui concerne les dépôts successifs de la Garonne, **seuls les matériaux les plus anciens** (p, a1a, a1b) **présentent des phases argileuses kaoliniques**. Dans le bassin de la Dordogne, au contraire, la kaolinite caractérise pour les 2/3 amont du cours, non seulement les dépôts anciens, mais **également les alluvions récentes**.

2.1.2.4.4) EVOLUTION DES ARGILES DANS L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE

Le cheminement en mer des apports fluviaux s'accompagne d'un remplacement progressif de la montmorillonite par l'illite et la chlorite. Dans les deux cas, on est conduit à invoquer les phénomènes de **transformation** (MILLOT, 1964) pour expliquer cette évolution. Par **fixation de potassium et de magnésium**, la montmorillonite (de cristallinité médiocre) évoluerait en illite et chlorite.

De la zone fluviale à la mer, l'**évolution de la relation montmorillonite/illite – salinité** paraît sensiblement linéaire. L'évolution des minéraux montmorillonitiques en illite s'accélère brusquement et ce changement pourrait résulter de la combinaison de plusieurs causes :

- La prolongation du séjour des particules dans l'**eau de mer**, en relation avec l'existence sur le littoral des **courants cycloïdes** décrits par ALLEN et al. (1971).
- L'accroissement du **pouvoir transformant du milieu salin** consécutif à la **régularisation des rapports ioniques**, rapports pratiquement constants en mer mais beaucoup plus variables en estuaire.
- La diminution de l'**effet inhibiteur des matières organiques vis-à-vis des transformations**. La concentration moyenne en carbone organique (VERNETTE, 1971) passe en effet de 2.1 en Garonne et 1.8 en Dordogne à 1.7 en Gironde et 1.1 dans la zone Ouest Gironde.

De toute évidence, les modifications du **pH** et de la **teneur en carbonates** par exemple doivent concourir à l'**accélération des processus de transformations sur le littoral** (LATOUCHE, 1971).

2.1.3) SYNTHESE

Il existe de nombreuses familles d'argiles susceptibles d'être retrouvées en suspension dans les lacs de carrières. Toutes ces familles ont des propriétés différentes. Leur identification et leur teneur ne sont pas évidentes à déterminer. L'analyse par **diffraction aux rayons X** est aujourd'hui un travail de spécialiste et peu de laboratoires sont compétents dans le domaine.

La répartition des familles d'argiles, souvent dans des cortèges argileux caractéristiques, peut être globalement résumée comme suit dans les formations du bassin de la Garonne :

FORMATIONS		CORTEGES ARGILEUX
PLIOCENE		<i>Blayais et bordure N-O de l'Entre-Dex-Mers</i> : Graves argileuses rouges, la kaolinite est nettement dominante (bonne cristallinité). <i>Région bordelaise</i> : Graves argileuses rouges, la kaolinite est nettement dominante (bonne cristallinité) et on trouve de la montmorillonite dans le niveau inférieur. <i>Médoc</i> : Les sédiments graveleux blanchâtres présentent une grande proportion de kaolinite (mauvaise cristallinité). Les formations brunes sont moins riches en kaolinite, l'illite est abondante voire dominante, et on trouve de la montmorillonite et de la vermiculite.
ALLUVIONS ANCIENNES QUATERNAIRES	a1a	La kaolinite hydratée (ou halloysite) est dominante (60 à 90 %), l' illite accessoire (10 à 35 %), et les autres argiles épisodiques.
	a1b	La kaolinite (hydratée ?) est dominante (60 à 80 %), l' illite accessoire (15 à 40 %), et les autres argiles épisodiques.
	a1c	L' illite est dominante (35 à 50 %), la kaolinite accessoire (20 à 45 %), la chlorite et les interstratifiés chlorite-vermiculite apparaissent brusquement (10 à 30 %).
ALLUVIONS RECENTES		L' illite et la vermiculite dominent très largement dans l'ensemble des dépôts alluvionnaires de la Garonne. Dans les eaux de l'estuaire, la montmorillonite se transforme en illite et en chlorite .
PODZOLS		Les minéraux fragiles disparaissent et on trouve de la kaolinite , de l' illite , et des interstratifiés de la vermiculite .

Figure 4 : tableau récapitulatif des cortèges argileux caractéristiques des formations sub-affleurantes du bassin versant de la Garonne

En connaissant la répartition géographique de ces formations, on pourrait éventuellement envisager d'établir une carte des argiles dominantes dans le bassin de la Garonne.

Les terrasses a1a et a1b du bassin de la Garonne sont constituées de matériaux susceptibles de donner lieu à des problèmes de turbidité en cas d'extraction en eau.

2.2) LES PLANS D'EAU

Les lacs sont des milieux ouverts, relativement stagnants, qui présentent des propriétés particulières bien différentes de celles des cours d'eau. La connaissance de certaines de ces propriétés pourrait s'avérer décisive dans le choix d'un traitement des MES. En effet, chaque plan d'eau présente un profil et un environnement qui le rendent unique, et c'est presque au cas par cas qu'il faudra envisager des solutions de traitement pérennes.

2.2.1) GENERALITES

2.2.1.1) STRATIFICATION THERMIQUE

Un lac se réchauffe par le haut du fait de l'ensoleillement. Au-dessus de 4°C environ, l'eau est d'autant plus légère qu'elle est plus chaude. L'eau chauffée par le soleil restera donc en surface. Les courants, vagues et phénomènes variés de turbulence provoqueront en fait un certain mélange des couches, sur une certaine épaisseur. Une stratification thermique s'instaurera tout de même, en période de réchauffement, ce qui est un des phénomènes les plus caractéristiques que l'on peut rencontrer en lacs, surtout en zone tempérée.

Il est généralement possible, à partir d'une certaine profondeur (de 6 à 15 m selon les auteurs), de différencier en saison chaude :

- une couche superficielle ou **épilimnion**, chaude, où les courants produits par le vent en surface peuvent librement se mouvoir, où le gradient de température est faible ;
- une couche profonde ou **hypolimnion**, froide, souvent épaisse, généralement assez calme, où la variation de température est à peu près exponentielle ;
- entre ces deux couches existe le **métalimnion** caractérisé par une thermocline accusée, c'est-à-dire par une zone à gradient thermique prononcée.

Cette stratification thermique, souvent très nette à la fin de l'été dans les lacs quelque peu profonds, a pour conséquence **l'installation d'un gradient de densité provoquant une stabilité relative des couches** dont le mélange n'est possible que si certaines forces produisent un certain travail. Or, ces forces ne peuvent provoquer, en fait, que des mouvements horizontaux des masses d'eau et ce ne sera que par contre-coup que des phénomènes permettront un certain mélange vertical, localisé, de ces masses d'eau superposées. Ces **forces** sont principalement **dues aux vents et** aux variations locales d'**apports d'énergie calorifique** (refroidissement nocturne alternant avec réchauffement diurne).

L'influence de ce phénomène sur la décantation des lacs n'est pas aujourd'hui bien connue. D'un côté, il semblerait qu'**une faible profondeur génère des courants de densité sur l'ensemble du plan d'eau** et que ce dernier soit totalement soumis à l'action du vent. D'un autre côté, **une particule aura un temps de chute d'autant plus important que la profondeur du plan d'eau sera grande.**

La stratification thermique (liée à une profondeur relativement importante) **pourrait apparaître plus avantageuse qu'un faible tirant d'eau**. En effet, les particules déposées, formant une boue, sont moins susceptibles d'être remises en suspension.

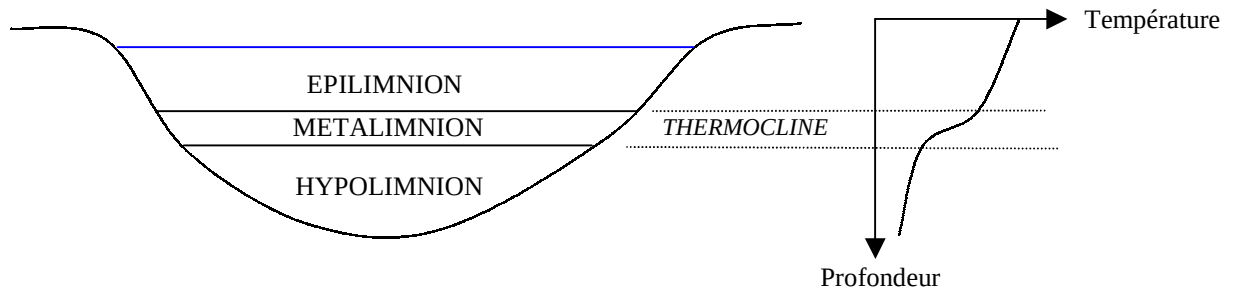


Figure 5 : stratification thermique estivale d'un plan d'eau

2.2.1.2) ACTION DES PRECIPITATIONS

Il peut y avoir une différence nette de température entre eau de pluie et eau lacustre qui se traduit par une différence marquée par leurs densités respectives. Lorsqu'un nuage s'abat sur un lac sous forme de grêle par exemple, il peut provoquer **un refroidissement** net de la surface et être à **l'origine de phénomènes de convection**, voire de courants de densité.

L'eau de pluie est acide et peut donc **abaisser le pH** du milieu lacustre dans lequel elle tombe. De plus, elle contient toujours un certain nombre de gaz et de solides dissous qui, entraînés dans le lac, peuvent modifier momentanément ses qualités en surface.

La pluie agit enfin sur l'eau d'un lac comme **diluant**. Avec l'évaporation, c'est un des constituants majeurs de la **fluctuation du niveau du lac** et peut, le cas échéant, le faire déborder.

2.2.1.3) ACTION DES AGENTS ATMOSPHERIQUES

Les masses d'air, en perpétuel mouvement, agissent directement ou indirectement sur la surface d'un lac de différentes manières. Elles apportent une force vive capable d'**entraîner par friction les eaux superficielles** et peuvent provoquer ainsi la **formation de vagues et de courants**.

L'énergie cinétique que le vent transmet à la masse d'eau lacustre est partiellement utilisée à **homogénéiser les couches d'eau**. Il est estimé que le **vent de vitesse V**, par frottement sur la surface de l'eau des lacs, entraîne des **courants** qui **ont une vitesse de l'ordre de V/100**.

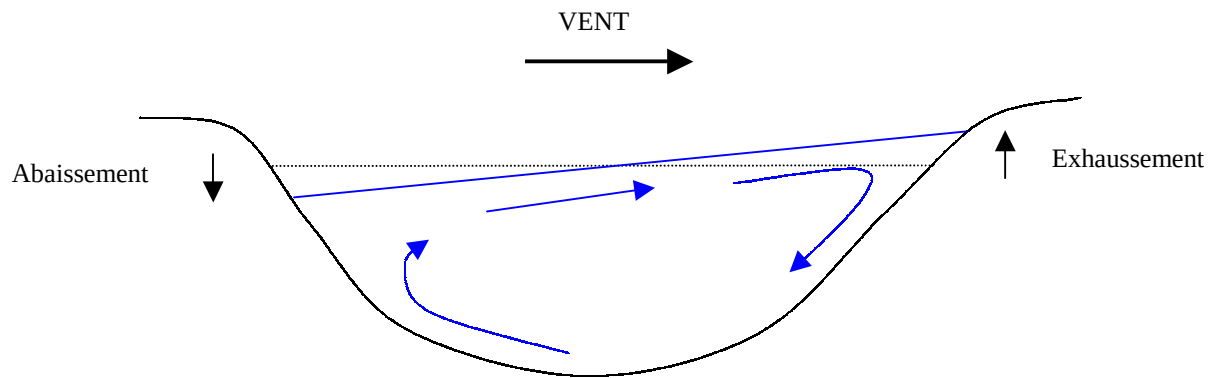


Figure 6 : hydrodynamisme d'un lac homogène

Plus la **profondeur du lac** est faible et/ou plus l'**intensité du vent** est importante, alors plus l'exhaussement est important.

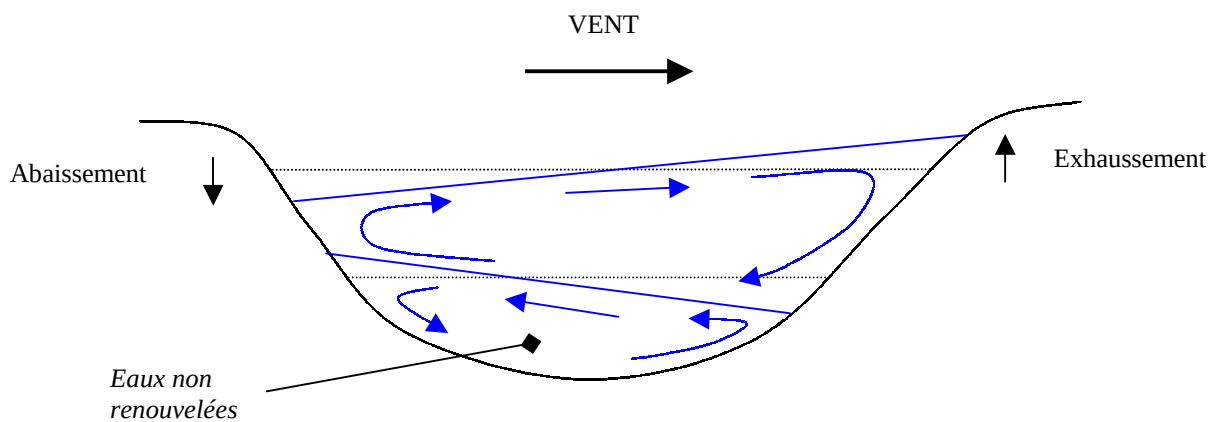


Figure 7 : hydrodynamisme d'un lac stratifié

Sous nos climats, les lacs peuvent se stratifier l'été lorsque leur profondeur atteint 6 à 15 m selon les auteurs.

2.2.2) LES PLANS D'EAU DES CARRIERES

Une carrière est un système ouvert. Il s'agit d'un espace délimité physiquement, qui peut échanger de l'eau, entre autres, avec le milieu extérieur. Notons que les carrières ne sont pas autorisés à rejeter de l'eau chargée en fine à une concentration supérieure à 35 mg/L à l'extérieur du périmètre du site conformément à la réglementation en vigueur.

Les carrières en eau résultent généralement d'une mise à nu de la nappe phréatique par extraction d'un matériau perméable dans lequel circule la nappe. Cette mise à nu de la nappe confère aux carrières deux caractéristiques originales parmi les milieux aquatiques :

- il y a un renouvellement constant de l'eau plus ou moins rapide selon la **vitesse d'écoulement de la nappe**, la **perméabilité du fond et des berges**, et l'orientation de la carrière par rapport au **sens de progression de la nappe**. La hauteur d'eau dans la carrière résulte de la surface piézométrique, qui varie en particulier avec les saisons en relation avec les pluies.
- le niveau d'eau dans la carrière est assez dépendant du **régime hydraulique du réseau hydrographique** proche. En période de crue, il peut y avoir inondation de la carrière et elle peut être mise en **communication directe avec le cours d'eau**. Les échanges physico-chimiques et hydrobiologiques peuvent alors avoir des conséquences importantes sur le milieu naturel. Notons que toutes les carrières ne se situent pas en zone inondable.

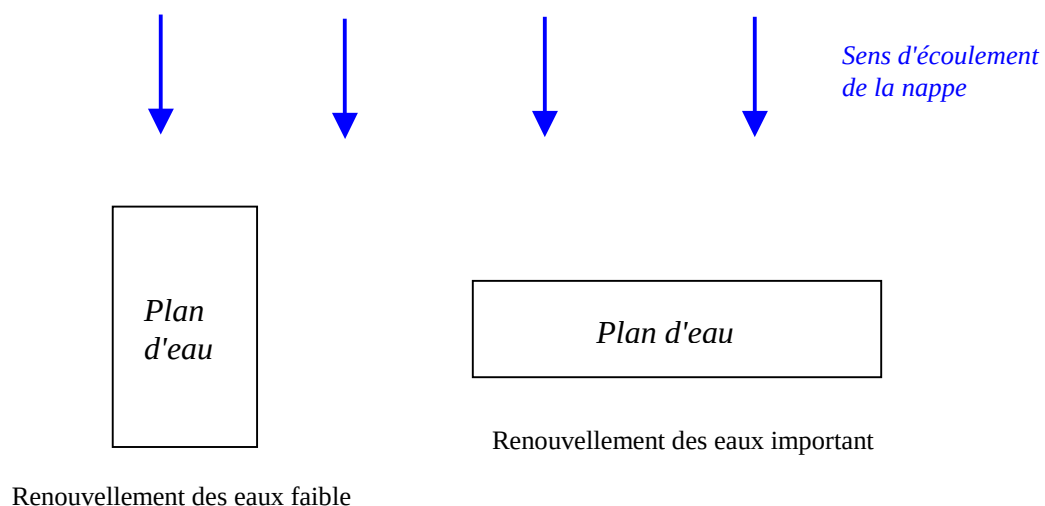


Figure 8 : variations du renouvellement des eaux d'un lac en fonction de l'allongement de la carrière par rapport au sens d'écoulement de la nappe phréatique

2.2.2.1) FACTEURS PRINCIPAUX INFLUENCANT LES CARRIERES EN EAU

Plus le plan d'eau d'une carrière présente une **surface** importante, moins le milieu sera fragile d'un point de vue hydrobiologique.

La **profondeur** joue sur la température, la productivité des eaux et la vitesse de comblement et de vieillissement de l'écosystème.

Une **berge** peu pentue (< 15 %) sera couverte d'une végétation aquatique en quelques mois alors qu'une berge pentue pose des problèmes d'instabilité et donc de lessivage vers le plan d'eau.

La **nature du matériau extrait** joue sur la qualité de l'eau, la vitesse de colmatage, et la colonisation par les espèces animales et végétales.

La **nappe phréatique**, par la qualité de ses eaux, sa vitesse d'écoulement et les variations du niveau piézométrique conditionne le milieu. Les **apports superficiels** jouent également. Ceci conduit à une notion quantitative (fort ou faible renouvellement en eau) et qualitative (eau riche ou pauvre en éléments organiques ou minéraux...) de l'eau.

L'**inondabilité** est un paramètre primordial dans le renouvellement, les échanges et la "contamination" des eaux de surface.

Plus une carrière est **âgée**, plus elle est colmatée par le développement d'organismes sur les berges et plus le vieillissement écologique est prononcé.

Enfin, la **localisation** est un paramètre essentiel à prendre en compte. Le climat qui la caractérise joue un rôle important sur les caractéristiques du milieu.

2.2.2.2) PARAMETRES INFLUENCES EN EAU DE SURFACE

Les propriétés physico-chimiques de l'eau mise à nu par les carrières varient suivant la profondeur.

On appelle épilimnion la zone des eaux proches de la surface (à l'inverse, l'hypolimnion correspond aux eaux profondes). Il est caractérisé par :

- une **diminution de la minéralisation** totale ainsi que des paramètres qui y sont liés tels que la conductivité, l'alcalinité, la concentration en Ca^{2+} ...,
- une **légère élévation du pH** du fait du développement du plancton à la lumière qui réalise la photosynthèse,
- une **augmentation de l'oxygène dissous**,
- une **diminution importante des nitrates**,
- une précipitation de CaCO_3 dans les eaux saturées du fait de l'**augmentation de la température**.

Notons que si la photosynthèse conduit bien à une production d'oxygène, la température tend en sens inverse à diminuer la concentration des gaz dissous. Le **maximum de concentration en oxygène dissous** se situe généralement **au printemps**, lorsque l'ensoleillement est le plus fort et lorsque la température des eaux n'a pas encore beaucoup remonté.

2.2.2.3) PARAMETRES UBIQUISTES

Parmi les caractères ubiquistes, c'est-à-dire pouvant être liés aussi bien aux horizons superficiels qu'aux horizons profonds des plans d'eau, on retiendra les **matières en suspension** (MES) et les paramètres qui y sont liés, **turbidité** et **couleur**, ainsi que les chlorophylles par exemple.

Ces MES peuvent avoir plusieurs origines :

- particules de calcite précipitées et tombant au fond des plans d'eau,
- particules algaires et pigments chlorophylliens,
- fines provenant des berges ou des découvertes par ruissellement,
- fines provenant du gisement,
- particules remuées à partir du fond sous l'action du vent.

Les fines mises en suspension lors de l'exploitation ont généralement le temps de sédimenter ultérieurement. Notons que **dans les excavations peu profondes, un remaniement des dépôts sous l'effet du vent est possible.**

Il semblerait que certaines fines, comme l'halloysite par exemple, présentent des propriétés telles que leur sédimentation ne puisse se réaliser naturellement dans un plan d'eau de plusieurs ha soumis entre autre à l'hydrodynamisme important généré par le vent.

2.2.3) SYNTHESE

Les plans d'eau sont soumis à un ensemble de facteurs intrinsèques (liés au profil), extrinsèques (liés au climat) et anthropiques (liés à l'exploitation de la carrière). Ils influent tous, directement ou indirectement, sur la concentration des MES dans le milieu.

Le tableau ci-après n'est pas exhaustif mais rappelle l'influence des principaux paramètres abiotiques sur la concentration en MES. Certains paramètres non cités ici seront développés dans la partie 3. Ce choix vient du fait qu'ils ne sont pas exclusivement propres aux plans d'eau.

PARAMETRES		VARIATIONS	EFFETS	CONCENTRATION DES MES
profil du plan d'eau	Surface		hydrodynamisme	
	Profondeur	< 6 à 15 m	non stratification thermique	?
		> 6 à 15 m	stratification thermique estivale	?
	Pente berges		stabilité berges	n'augmente pas
climat	Vent		hydrodynamisme	
	Précipitations		pH	variable
			convection	
			dilution	
	Température		vitesse de sédimentation	
activités de la carrière	Enherbement		stabilité des fines déposées	
	Terre de découverte	remises en eau	risque concentration MES minérales et organiques	
	Formation riche en argile			
	Orientation du plan d'eau	perpendiculaire au vent dominant	hydrodynamisme	
		perpendiculaire à l'écoulement de la nappe	dilution	

Figure 9 : tableau récapitulatif de l'effet des facteurs abiotiques sur la concentration en MES dans un plan d'eau

Notons que si l'**hydrodynamisme** est le principal agent à l'origine de la non sédimentation des MES, il permet également l'**oxygénation** du milieu indispensable au développement de la vie. De plus, cette oxygénation favorise la précipitation de la matière organique et permet, comme nous le verrons plus en détail dans la partie 3, d'améliorer le rendement des coagulants-floculants s'il y a lieu.

2.3) LA DECANTATION

2.3.1) GENERALITES

Le transport en suspension, c'est-à-dire le maintien d'une particule en mouvement à une certaine distance au-dessus du fond, **est un phénomène dû à la turbulence de l'écoulement**.

Le transport en suspension est **surtout observé sur les sédiments fins**, car la force requise pour maintenir en suspension les grains augmente très rapidement au-dessus d'une certaine taille. Par contre la majeure partie des sédiments fins (inférieurs à 150 – 200 μm) sont transportés dès leur mise en mouvement (SUNDBORG, 1956 et BAGNOLD, 1966).

2.3.1.1) COMPORTEMENT DES PARTICULES ELEMENTAIRES EN MILIEU CALME

On caractérise fréquemment les particules d'argile par un diamètre équivalent à celui d'une sphère de même densité et présentant la même vitesse de chute. La particule en chute libre dans l'eau reste solidaire du film d'eau qui l'entoure et qui peut atteindre, dans certains cas, une épaisseur voisine de celle de la particule. Par exemple, une particule de kaolinite de 1000 Å d'épaisseur sera entourée d'un film d'eau d'une épaisseur de 400 Å. L'ensemble particule-eau liée a donc une densité inférieure à celle de la particule considérée seule.

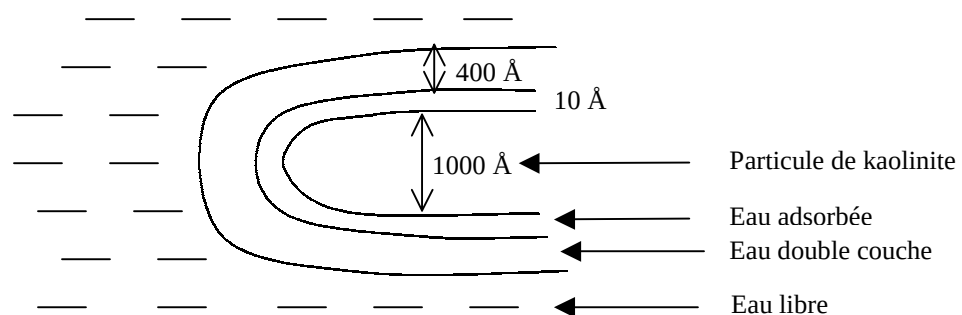


Figure 10 : coupe schématique d'une particule de kaolinite dans l'eau (d'après MIGNIOT, 1968)

L'accumulation des sédiments fins varie entre autres avec la température (BERTHOIS, 1953, 1954; MIGNIOT, 1968). En effet, **l'augmentation de la température de l'eau** abaisse sa viscosité, ce qui **augmente la vitesse de chute des sédiments en suspension**. Par exemple, cette dernière est **doublée lorsqu'on passe de 3,5 °C à 30 °C**.

La loi de STOCKES, qui est valable uniquement en écoulement laminaire, est la suivante :

$$V_s = g d^2 (\rho_s - \rho_l) / 18 \mu$$

V_s : vitesse de sédimentation de la particule (m/s)
g : pesanteur (= 9.81 m/s² en Aquitaine)
d : diamètre de la particule (m)
ρ_s : densité des particules
ρ_l : densité de l'eau
μ : viscosité dynamique de l'eau (10⁻³ Pa.s ou Poiseuille)

2.3.1.2) FLOCULATION - VITESSE DE CHUTE DES FLOCONS

La floculation est un comportement particulier des sédiments argileux en suspension lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau "salée". Ce phénomène est lié à la charge électrique existant à la surface des particules argileuses, qui, en présence d'**un milieu hydrolysant** (l'eau salée par exemple), **provoque une coalescence des particules argileuses entre elles**, pour former des flocons de taille beaucoup plus importante que les particules argileuses d'origine. Cette augmentation de taille accroît la vitesse de chute des grains, et accélère donc la sédimentation.

La faculté de la floculation et l'ampleur de celle-ci dépendent d'un certain nombre de facteurs, les uns étant liés aux caractéristiques de la particule, les autres à celles du milieu aqueux.

D'une manière générale (MIGNIOT, 1968), **la floculation est d'autant plus importante, que l'on augmente :**

- **la concentration en électrolyte,**
- **la valence des ions,**
- **la température,**

et que l'on diminue :

- **la dimension de l'ion hydraté,**
- **la constante diélectrique du milieu,**
- **le pouvoir d'absorption des anions.**

MIGNIOT (1968) trouve également que **la floculation des particules augmente les vitesses de chutes**, tout en réduisant l'écart de la répartition de ces vitesses au sein d'une population de particules. Ainsi, les vitesses de chute de particules défloculées varient de 10⁻⁵ à 10⁻¹ mm/s, tandis que les particules floculées ont des vitesses de chute allant de 1,5.10⁻¹ à plus de 1 mm/s (pour des conditions optimales de turbidité et salinité).

2.3.1.2.1) INFLUENCE DU DIAMETRE DES PARTICULES

En pratique, une suspension d'éléments péloïtiques minéraux, en milieu flocculant, présentera des vitesses moyennes de chute comprises entre 0,15 et 0,60 mm/s.

D'après MIGNIOT (1968), **la floculation ne serait plus intéressante pour les particules minérales d'un diamètre supérieur à une trentaine de microns**. Cette hypothèse est toutefois considérée comme **contestable** par certains spécialistes.

2.3.1.2.2) INFLUENCE DE LA CONCENTRATION EN PARTICULES SOLIDES DANS LA SUSPENSION

En général, **la vitesse de chute augmente avec la turbidité jusqu'à** une valeur de concentration en MES égale à **15 g/L**. A cette concentration, la vitesse de chute des flocons peut être dix fois supérieure à celle que l'on aurait pu mesurer sur des suspensions à des concentrations de 1 ou 2 g/L.

Pour les turbidités plus élevées, les vitesses de chute décroissent du fait d'un entravement prononcé entre les particules (MIGNIOT, 1968).

2.3.1.2.3) INFLUENCE DU MILIEU AQUEUX

Il suffit de quantités très faibles de sels flocculants pour que la floculation apparaisse.

C'est ainsi que, si l'on introduit dans une suspension de vase à 2 g/L des quantités croissantes de sels marins, on constate que **les vitesses de chute des flocons contenus dans la suspension augmentent progressivement pour atteindre la valeur maximale à partir d'une concentration en sels de 2 ‰**. Cette vitesse se maintient ensuite à une valeur à peu près constante, jusqu'à une salinité de 30 ‰.

Par contre, **si la concentration initiale de la suspension en particules solides est relativement élevée (> 10 g/L), il peut se produire**, pour de fortes salinités, une macrofloculation conduisant à **une diminution des vitesses de chute** (vitesses entravées). La vitesse de chute serait alors légèrement plus importante pour une salinité de 5 ‰ que pour une salinité de 30 ‰ (MIGNIOT, 1968).

D'après ALLEN (1973), **en-dessous d'un seuil de salinité**, allant de 2 à 8 ‰ (en liaison avec la concentration en MES) **les valeurs de vitesse de chute augmentent rapidement avec la salinité**. Au-dessus de ce seuil, la valeur de vitesse de chute est constante.

Notons d'autre part que le **pH** du milieu aqueux a une grande influence sur les suspensions de particules fines.

2.3.1.3) TASSEMENT DES SEDIMENTS PELITIQUES

Décantés par gravité sur les fonds, les flocons de vase naturelle vont s'écraser sous leur propre poids et perdre progressivement une partie de leur eau d'imbibition. Leur réseau va se resserrer fortement, par suite d'une **élimination progressive de l'eau sous l'effet du tassement** qui peut se poursuivre pendant plusieurs années. Au cours de ce tassement, la vase présentera des états physiques très différents suivant sa teneur en eau.

La nature des sédiments aura une grande influence sur le tassement de sédiments péltiques (MIGNIOT, 1968).

Notons que pratiquement toute vase relativement consolidée au-dessus de 800 à 1000 g/L sera presque inérodable par les courants. Ceci est très important, car **le dépôt des sédiments fins a ainsi parfois tendance à revêtir un caractère définitif dès lors qu'ils sont quelque peu consolidés.** (ALLEN, 1973).

De nombreuses recherches (HJULSTROM, 1935; SUNDBORG, 1956; BAGNOLD, 1966) ont montré que **la vitesse requise pour assurer le transport d'un sédiment déjà en suspension était inférieure à celle nécessaire pour effectuer sa mise en suspension**, c'est-à-dire pour l'éroder. Donc, en dessous d'une vitesse critique, la turbulence ne peut plus assurer la diffusion verticale (mise en suspension) des sédiments, et il y aura chute des particules en suspension et accumulation au fond.

2.3.1.4) COMPORTEMENT DES DEPOTS DE SEDIMENTS PELITIQUES SOUS DIFFERENTES ACTIONS HYDRODYNAMIQUES

Le pourcentage des matières organiques contenu dans une vase aura une influence non négligeable sur ses propriétés dynamiques.

2.3.1.4.1) EROSION DES SEDIMENTS PELITIQUES PAR DES COURANTS EN REGIME UNIFORME

Plus la hauteur de la lame d'eau au-dessus des sédiments est importante, plus la vitesse critique d'érosion de ces sédiments est grande. Autrement dit **plus un plan d'eau est profond, moins les sédiments** qui se sont déposés **ont la possibilité d'être remis en suspension.**

D'autre part, une fois remise en suspension par le courant et diluée dans l'eau, **il suffit de vitesses très faibles pour maintenir la vase en suspension.**

Le milieu aqueux a une très grande influence sur les conditions d'érosion des vases. A concentration en particules solides identique, et pour un même sédiment, il faut par exemple **une vitesse du courant environ 1,7 fois plus grande pour éroder une vase déposée en eau de mer** (salinité importante) **qu'une vase déposée en eau douce** (salinité faible).

Il semble que **la teneur en eau de la vase** qui englobe les particules **joue également un rôle primordial sur son érosion** (MIGNIOT, 1968).

2.3.1.4.2) ACTION DE LA HOULE ET DU VENT SUR DES DEPOTS DE VASE

Suivant les caractéristiques du matériau et de la houle, **des masses importantes de vase** pourront être **déplacées**, ou **remises en suspension** dans les eaux.

La vitesse de chute des flocons de sédiments pélitiques pourra être fortement modifiée par l'action de la houle. Extrêmement fragiles, ces flocons de vase se "désagrègent" en éléments plus petits, entraînant une **diminution de la vitesse de chute moyenne des flocons** qui pourra être cinq fois plus faible sous la houle que celle mesurée en eau calme.

Le brassage des dépôts aura pour effet, d'une part, de **diminuer considérablement les possibilités de tassement de la vase**, et de **"fluidifier" des dépôts plus anciens** d'autre part.

2.3.2) EXEMPLE DE SÉDIMENTATION NATURELLE DES ARGILES DANS L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE

Les processus de transport en suspension sont particulièrement importants dans les estuaires, car les sédiments qui s'y accumulent sont vaseux pour la plupart. Depuis de nombreuses années, une suite d'études hydrologiques et sédimentologiques a permis d'élaborer un schéma général de la dispersion et l'accumulation des sédiments fins dans les estuaires. Plusieurs phénomènes naturels complexes s'y produisent, et leur description pourrait nous permettre de mieux comprendre les processus de sédimentation dans les plans d'eau issus des gravières.

Une augmentation naturelle de la sédimentation par **l'accroissement de la vitesse de chute des particules est probablement généralisée dans tout l'estuaire de la Gironde soumis à l'intrusion saline**. Il semblerait que même une faible salinité puisse engendrer la floculation (MIGNIOT, 1968).

2.3.2.1) LE BOUCHON VASEUX

Il existe dans les estuaires une zone à concentration relativement élevée de matières en suspension. Cette zone est généralement localisée dans la partie amont de l'intrusion saline : ce phénomène est appelé "bouchon vaseux".

Les différentes études sur le bouchon vaseux de la Gironde ont montré qu'il serait davantage lié à la circulation résiduelle se produisant dans l'intrusion saline qu'à la floculation. Cette circulation résiduelle produit un véritable piège à sédiments où les vases en suspension apportées par les fleuves ou la mer s'entassent, créant ainsi un maximum de turbidité.

La circulation résiduelle, liée aux **gradients de densité produits par l'intrusion saline**, est responsable de la formation du bouchon vaseux. En effet, **la plus ou moins forte stratification saline** induit des phénomènes advectifs (courants et densité) qui ont tendance à séparer les écoulements. Cette séparation **a tendance à prolonger la durée de l'étalement, caractérisée par une forte décantation des eaux turbides**.

2.3.2.2) POINTS NODAUX

Les sédiments en suspension ont tendance à s'accumuler dans **les zones de convergence des courants résiduels** aux points nodaux (zone de mouvement résiduel nul). **Une topographie étroite et profonde favorise également la formation de points nodaux dans les fosses**.

A la faveur d'une zone à fort gradient vertical de salinité, ou d'un point nodal (topographique ou hydrologique), **il se produit une forte accumulation de vase en suspension** (jusqu'à 60 – 70 g/L).

Les **slikkes** (parties basses d'un marais littoral) constituent également des zones de décantation privilégiée (ALLEN, 1973).

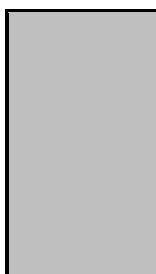
2.3.3) SYNTHESE

La décantation d'une eau est un phénomène complexe lié à de nombreux facteurs.

Il semblerait que la **minéralisation**, la **température** et le **pH** de l'eau constituent **les trois facteurs physico-chimiques les plus importants**.

Le profil du plan d'eau constitue également un élément déterminant. En effet, une **topographie étroite et profonde** favoriserait la sédimentation des MES, à la faveur de la formation d'un point nodal (point de vitesse nulle).

Les facteurs hydrodynamiques jouent également un rôle capital. Ils sont à l'origine de la mise en suspension des particules fines et de leur maintien en suspension. Il convient donc de s'assurer de l'agitation minimale du plan d'eau. Le vent constitue le facteur d'agitation le plus important. **Des petits plans d'eau ou un allongement du profil perpendiculairement à l'orientation préférentielle des vents** permettraient de limiter leur action "négative".



3ème PARTIE

**INFLUENCE DES PRINCIPAUX FACTEURS
SUR LA SEDIMENTATION DES ARGILES
DANS LES PLANS D'EAU**

3.1) ROLE DES COAGULANTS-FLOCULANTS

Les éléments argileux peuvent avoir des dimensions comprises entre quelques microns (1 micron = 0,001 mm) et moins de 0,1 μm , et des **formes** allant des **bâtonnets pour l'halloysite** à des **lamelles hexagonales pour la kaolinite**.

A l'état individuel, ces particules ont des vitesses de chute extrêmement faibles, pouvant atteindre moins de 1 $\mu\text{m/s}$ (MIGNIOT, 1968).

Or il est établi, voir partie 3.2.3, que plus la force ionique d'une eau est importante, plus les particules en suspension se repoussent faiblement. Autrement dit, plus la minéralisation d'une eau est importante, plus les particules peuvent s'agglomérer et donc sédimenter sous l'effet de leurs poids cumulés.

C'est sur ce principe que s'appuient les processus de coagulation-floculation.

3.1.1) PRINCIPES DE LA COAGULATION-FLOCULATION

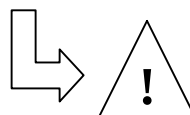
3.1.1.1) ACTIONS DES COAGULANTS

Les coagulants sont des **composés minéraux ou organiques**, à chaîne courte et chargés positivement, qui permettent l'agglomération des particules en suspension. Que ce soient les sels de fer (FeCl_3) ou les sels d'aluminium $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ par exemple, les mécanismes mis en jeu sont toujours les mêmes :

en solution $\text{FeCl}_3 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 3 \text{Cl}^-$

puis

$\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$	$\text{Fe}(\text{OH})^{2+} + \text{H}^+$	} 3 réactions se produisent simultanément dans l'eau
$\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow$	$\text{Fe}(\text{OH})_2^+ + 2\text{H}^+$	
$\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow$	$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$	



**Acidification du milieu aquatique
(le pH baisse)**

Soit il y a **coagulation par adsorption** (fixation en surface). Les cations introduits, tels que $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ et $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ par exemple, sont "facilement" adsorbés par les colloïdes chargés négativement du fait de leur petite taille. Ceci a pour effet de "neutraliser" la charge des colloïdes et de diminuer la répulsion entre les particules que l'on souhaite agglomérer.

Soit il y a **coagulation par balayage**. La formation de précipités, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ par exemple, englobe et piège les particules en suspension lors de leur chute.

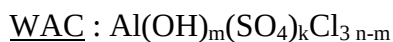
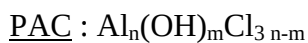
Notons bien que selon le coagulant utilisé, le pH risque de baisser. Des traitements pour augmenter le pH par la suite sont connus (utilisation de carbonate de calcium par exemple) mais le coût de ce traitement secondaire n'est évidemment pas négligeable.

D'autre part, la cinétique de ces réactions est plus lente lorsque la température baisse.

3.1.1.2) ACTIONS DES FLOCULANTS

Les floculants, à l'inverse des coagulants, sont des **polymères** chargés positivement ou négativement et destinés à la séparation solide / liquide. Ils ont pour intérêt d'avoir une efficacité indépendante de la température. Néanmoins ils sont évidemment plus chers.

On utilise par exemple des polymères d'aluminium :



3.1.1.3) MECANISMES DE COAGULATION-FLOCULATION

Les mécanismes mis en jeu lors des processus de coagulation-floculation sont complexes. La compréhension de ces phénomènes nécessite la prise en compte :

- de **la nature et de la composition chimique de l'eau à traiter**. La composition de l'eau joue en effet un rôle fondamental dans les interactions particules-coagulant ;
- des **conditions d'agitations** utilisées lors de la phase de floculation. Selon les conditions d'agitation, les phénomènes d'accroissement ou de cassage des floes seront prépondérants (FRANCESCHI, 1991).

La coagulation correspond à l'étape de prétraitement. Elle consiste à déstabiliser les colloïdes par neutralisation partielle de leur charge. Elle nécessite une forte agitation du milieu pour bien mélanger le coagulant-floculant dans l'eau à traiter. Cette agitation doit toutefois être assez brève.

La floculation correspond à l'agglomération des particules entre elles. Elle nécessite une agitation beaucoup plus faible et un temps de séjour des particules relativement long.

La décantation vient ensuite. Elle nécessite du temps et une cinétique du milieu quasi nulle. Elle obéit en régime laminaire à la loi de Stokes (voir partie 3.2.2).

Remarque : **Le traitement des suspensions** de vases ou de boues **par des sels chimiques** pour modifier leurs propriétés rhéologiques **doit être réalisé avec discernement**. En effet, on a vu que l'accroissement de rigidité des sédiments est surtout rapide entre 0 et 5 ‰ de salinité.

3.1.2) ELIMINATION DES MES PAR COAGULATION-FLOCULATION

3.1.2.1) ELIMINATION DES COMPOSES MINERAUX PAR COAGULATION-FLOCULATION

Il pourrait sembler curieux d'ajouter des sels minéraux, par exemple, pour éliminer des particules minérales, mais c'est sur la notion de charge que s'appuient les processus de coagulation-floculation.

Comme vu précédemment, les cations (chargés positivement) se fixent sur les colloïdes (chargés négativement dans les eaux naturelles). L'agglomération des colloïdes augmente leur taille et leur poids.

Les particules agglomérées (ou flocs) sédimentent ensuite plus facilement, sous réserve que d'autres paramètres tels que l'hydrodynamisme (généré essentiellement par le vent) par exemple ne viennent pas perturber le processus.

En agrégeant les fines, **les floculants augmentent les vitesses de sédimentation et permettent de réduire les surfaces de décantation** : 30 à 100 cm/s en moyenne contre 0,1 à 1 cm/s en moyenne lors d'une décantation naturelle.

Les coagulants-floculants permettent également d'**accélérer les phénomènes de consolidation des boues** (concentration généralement comprise entre 400 et 700 g/L).

3.1.2.2) ELIMINATION DES COMPOSES HUMIQUES PAR COAGULATION-FLOCULATION

EDWARD et AMIRTHARAJAH (1965) notent que les mécanismes d'action des coagulants minéraux sur les composés humiques sont comparables à ceux mis en jeu pour éliminer les colloïdes hydrophobes. Ils notent également que l'ajout d'une faible quantité d'argile permet d'améliorer le rendement d'élimination des substances humiques.

Plusieurs études ont montré que **le meilleur rendement d'élimination des composés humiques** pouvait être **obtenu pour des valeurs de pH comprises entre 5 et 6 pour le sulfate d'aluminium et entre 4 et 5 pour le chlorure ferrique**. Selon EDZWALD (1978) et SEMMENS, FIELD (1980), pour des valeurs de pH allant de 6 à 8, l'élimination se fait par adsorption des composés humiques sur les hydroxydes d'aluminium. A pH plus faible, il se produit une réaction de neutralisation de charges entre les espèces ionisées de l'aluminium et les groupements fonctionnels des composés organiques. Il y a formation de composés aluminium-humates qui précipitent (PACKMAN et col, 1965). Pour ces valeurs de pH, il existe une relation stoechiométrique entre la quantité de colloïdes organiques et la dose de coagulant.

3.2) INFLUENCE DES FACTEURS ABIOTIQUES

3.2.1) pH

3.2.1.1) INFLUENCE DU pH DANS LES PROCESSUS DE SEDIMENTATION NATURELLE

Pour la Garonne, il existe une très nette relation entre le pH des eaux et l'abondance de la montmorillonite dans les alluvions. A l'inverse, les eaux acides de la Dordogne véhiculent des argiles fortement kaolinitiques.

Ces deux exemples traduisent la **relation entre le pH d'une eau et la nature des argiles en suspension**.

Notons que l'alcalinité d'une eau détermine son pouvoir tampon, c'est-à-dire que plus la concentration des ions HCO_3^- sera importante dans une eau, plus le **pH** sera **stable**. Ces ions passent en solution lorsque l'eau dissout des roches carbonatées.

3.2.1.2) INFLUENCE DU pH DANS LES PROCESSUS DE COAGULATION-FLOCULATION

Le rôle du pH est particulièrement important, dans la mesure où **il détermine** à la fois **la charge des colloïdes organiques, de certains colloïdes hydrophobes** (oxydes, groupements SiOH des argiles ou de la silice...) et il est également un facteur prépondérant dans l'hydrolyse des sels de fer ou d'aluminium (FRANCESCHI, 1991).

3.2.2) TEMPÉRATURE

3.2.2.1) INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DANS LES PROCESSUS DE SEDIMENTATION NATURELLE

L'accumulation des sédiments fins varie avec la température (BERTHOIS, 1953, 1954, MIGNIOT, 1968). En effet, **l'augmentation de la température de l'eau décroît sa viscosité, ce qui augmente la vitesse de chute des sédiments en suspension**.

En effet, la loi de STOCKES, qui s'applique à un régime laminaire, est la suivante :

$$V_s = \frac{gd^2(\rho_s - \rho_l)}{18\mu}$$

V_s : vitesse de sédimentation de la particule (m/s)

g : pesanteur (= 9.81 m/s² en Aquitaine)

d : diamètre de la particule (m)

μ : viscosité dynamique de l'eau (10⁻³ Pa.s ou Poiseuille), varie algébriquement inversement à la température

MORRIS (1984) observe que la température joue un rôle d'autant plus important que les eaux sont peu turbides.

3.2.2.2) INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DANS LES PROCESSUS DE COAGULATION-FLOCCULATION

MOHTADI et RAO (1973) notent que **l'abaissement de la température est "négative"** dans le sens où elle entraîne :

- une augmentation de la concentration en sulfate d'aluminium à l'optimum de floculation,
- une décroissance de la taille des floccs,
- un déplacement du pH optimum de floculation vers les pH basiques.

DARME (1981) indique que **la température a un effet inhibiteur sur les mécanismes de coagulation pour des valeurs inférieures à 10°C.**

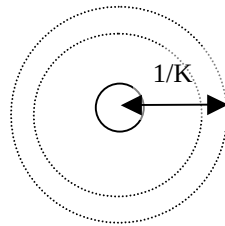
3.2.3) MINERALISATION

Une méthode simple pour mesurer la concentration en sels dissous totaux est de mesurer la conductivité électrique de l'eau. Elle est en effet plus ou moins proportionnelle à la teneur en sels dissous totaux et s'exprime en μS.cm⁻¹.

3.2.3.1) INFLUENCE DE LA MINERALISATION DANS LES PROCESSUS DE SEDIMENTATION NATURELLE

Rappelons qu'en présence d'un **milieu hydrolysant** (l'eau salée par exemple) les particules argileuses s'agglomèrent entre elles pour former des floccs de taille beaucoup plus importante que les particules argileuses d'origine. Cette augmentation de taille accroît la vitesse de chute des grains, et donc accélère la sédimentation.

L'augmentation de la teneur en ions entraîne une diminution des forces de répulsions interparticulaires par compression de la double couche ionique. En effet, l'épaisseur de la double couche est directement reliée à la concentration en ions :



$$1/K = 2,8.10^{-8} / I^{1/2}$$

$$I = 1/2 \times \sum (z_i^2 c_i)$$

1/K : épaisseur de la double couche de la particule colloïdale

I : force ionique

z_i : charge de l'ion i

c_i : concentration de l'ion i

Autrement dit, plus la minéralisation augmente (exemple intrusion d'un milieu salin), plus I (force ionique) augmente, et plus 1/K (épaisseur électrostatique du colloïde) diminue. Ce processus **favorise l'agglomération des colloïdes**, et augmente donc la masse des particules en suspension : **la décantation est favorisée.**

La théorie de la double couche énonce que le phénomène de déstabilisation par compression de la double couche dépend essentiellement de **la valence des ions**. GREGORY (1977) distingue trois types d'ions :

- **les ions indifférents** qui n'influencent que sur l'épaisseur de la double couche. Ce sont en général des ions monovalents tels que Na^+ , K^+ , Cl^- ...
- **les ions déterminant le potentiel qui s'adsorbent sur la surface des particules colloïdales.** Il s'agit, soit d'ions constitutifs du réseau cristallin dans le cas de colloïdes hydrophobes, soit d'ions H^+ ou OH^- . Leur concentration influe entre autres sur le potentiel de surface ;
- **les ions qui s'adsorbent dans la couche de STERN** (cations les plus proches du colloïde constituant une couche fortement adsorbée). Ce sont les produits d'hydrolyse des sels de fer ou d'aluminium ou des ions organiques. On assiste dans ce cas à une variation entre autres du potentiel de surface. Ces espèces sont responsables du phénomène de coagulation-floculation.

En-dessous d'un seuil de salinité, allant de 2 à 8 ‰ (en liaison avec la concentration en MES) **les valeurs de vitesse de chute augmentent rapidement avec la salinité.** Au-dessus de ce seuil, la valeur de vitesse de chute est constante (ALLEN, 1973).

Il semblerait que même une faible salinité puisse engendrer la "floculation" (MIGNIOT, 1968).

3.2.3.2) INFLUENCE DE LA MINERALISATION DANS LES PROCESSUS DE COAGULATION-FLOCCULATION

BAZER-BACHI (1986) a étudié **simultanément l'influence de la température, du pH et de la minéralisation** lors de la coagulation-floculation par le sulfate d'aluminium. Il constate que:

- à forte minéralisation, il y a une dégradation importante de la coagulation quand la température diminue. Cette dégradation est moins importante pour des eaux faiblement minéralisées ou lorsque le pH est basique.
- à forte minéralisation, le taux de sulfate d'aluminium optimal varie peu mais pour une faible minéralisation le taux optimum de sulfate d'aluminium augmente quand la température décroît.

Ces résultats, qui montrent la différence de comportement selon la température et surtout la minéralisation, sont en accord avec ceux de DOLEJS (1981) qui note **l'importance du couple température-alcalinité sur l'élimination des matières humiques**.

Il semblerait selon certains auteurs que ce soient les teneurs en **ions calcium**, en **ions bicarbonates** et en **ions sulfates** qui jouent un rôle prépondérant sur les phénomènes de coagulation-floculation.

3.2.4) OXYGENE DISSOUS

3.2.4.1) INFLUENCE DE L'OXYGENE DISSOUS DANS LES PROCESSUS DE SEDIMENTATION NATURELLE

Les sources d'approvisionnement en oxygène dissous sont essentiellement **l'atmosphère** (source physique) et **la photosynthèse** (source biologique).

Notons que si la photosynthèse conduit bien à une production d'oxygène, **la température tend** en sens inverse **à diminuer la concentration des gaz dissous**. Le maximum de concentration en oxygène dissous se situe généralement au printemps, lorsque l'ensoleillement est le plus fort et lorsque la température des eaux n'a pas encore beaucoup remonté.

Il existe une **relation étroite entre transparence**, stratification thermique, taux de respiration et **valeur de l'oxygénation dans les couches superficielles d'un lac**.

3.2.4.2) INFLUENCE DE L'OXYGENE DISSOUS DANS LES PROCESSUS DE COAGULATION-FLOCCULATION

L'oxygénation **favorise la précipitation de la matière organique** et **permet d'améliorer le rendement des coagulants-floculants** s'il y a lieu. En effet, si la quantité de MES hydrophile diminue, ces MES ne consommeront pas "inutilement" les ajouts apportés.

3.2.5) MES HYDROPHOBES

Les composés argileux représentent la majorité des matières colloïdales hydrophobes dans les eaux naturelles.

3.2.5.1) INFLUENCE DES MES HYDROPHOBES DANS LES PROCESSUS DE SEDIMENTATION NATURELLE

La concentration des argiles en suspension influe directement sur la turbidité du plan d'eau. Or, en général, la vitesse de chute augmente avec la turbidité jusqu'à une concentration en MES d'environ 15 g/L.

C'est-à-dire que **plus la concentration en argile augmente, plus la vitesse de chute augmente**, tant que cette concentration reste inférieure à 15 g/L. En revanche, pour les turbidités plus fortes, les vitesses de chute décroissent.

3.2.5.2) INFLUENCE DES MES HYDROPHOBES DANS LES PROCESSUS DE COAGULATION-FLOCCULATION

KIM et col (1965) ont montré qu'il existe une relation stoechiométrique entre la C.E.C. (Capacité d'Echange Cationique) d'une argile et le taux de sulfate d'aluminium. Cette relation varie quand on passe d'un type d'argile à un autre. On comprend donc **l'importance de connaître la nature des argiles à sédimenter afin d'optimiser les quantités de coagulant-floculant à utiliser** le cas échéant.

BAZER-BACHI (1986) obtient des résultats comparables avec les argiles de types smectites (forte C.E.C.) et illites (faible C.E.C.) Il montre que la relation stoechiométrique turbidité-taux optimum de sulfate d'aluminium est également affectée par la qualité de l'eau brute.

STUM et OMELIA (1968) ont étudié **l'influence de la surface spécifique des particules** de silice sur la coagulation par le chlorure ferrique. Ils ont montré que trois paramètres régissaient le phénomène :

- la dose de coagulant,
- la surface spécifique,
- le pH.

Si la coagulation se fait par un mécanisme de "**balayage**" par des hydroxydes, il n'y a **pas de relation stoechiométrique entre la surface spécifique et la dose de coagulant**.

Si l'on est dans une zone où la coagulation-floculation se fait par "**adsorption-déstabilisation**" on a alors une **relation stoechiométrique entre la surface spécifique et la dose de coagulant**.

KAWAMURA (1976) a également montré l'importance de la nature de la suspension sur la turbidité résiduelle et sur le taux de sulfate d'aluminium à l'optimum de floculation.

3.2.6) MES HYDROPHILES

En milieu aqueux, les colloïdes hydrophiles sont principalement des macromolécules organiques. Ces composés proviennent de la dégradation des humus et de substances organiques diverses.

On peut distinguer deux grands groupes :

- les **substances non humiques**. Ce sont des composés relativement biodégradables tels que les sucres, les protéines, les graisses, les alcools...
- les **composés de nature humique**. Ils proviennent principalement du lessivage des sols par les eaux de ruissellement. En milieu aqueux, on retrouve les acides fulviques et les acides humiques. Ces derniers, de couleur brun clair, sembleraient jouer un rôle important dans la décantation des eaux.

3.2.6.1) INFLUENCE DES MES HYDROPHILES DANS LES PROCESSUS DE SEDIMENTATION NATURELLE

Les matières organiques présentent un **effet inhibiteur vis-à-vis des réactions naturelles**. En effet, elles complexent certes avec certains polluants, mais également avec les cations présents naturellement dans le milieu. Ces cations "consommés" par les MES hydrophiles ne se fixeront donc pas avec les MES argileuses. De ce fait, les facteurs de coagulation naturelle des MES argileuses sont fortement atténués.

3.2.6.2) INFLUENCE DES MES HYDROPHILES DANS LES PROCESSUS DE COAGULATION-FLOCCULATION

Les propriétés chimiques des acides humiques font de ces composés d'excellents complexants des cations métalliques (BUFFLE, 1977; SHOLKOVITZ et col, 1980). Cinq types d'interaction ont été proposés pour décrire le comportement des composés humiques avec les cations minéraux.

Dans le cadre des processus de coagulation-flocculation, certaines réactions peuvent être gênantes en "consommant" une partie des cations métalliques introduits (FRANCESCHI, 1991).

On peut donc fortement penser que **plus la quantité de MES hydrophile est importante** dans le plan d'eau, **plus il faudra ajouter de coagulant-floculant** pour obtenir le même résultat de décantation des argiles en suspension.

A ces problèmes d'ordre purement chimique, on peut ajouter le phénomène lié à la **réduction de la tension superficielle de l'eau** par les substances humiques (BUFFLE et MALLEVIALLE, 1974). Cet abaissement de la tension superficielle **augmente la stabilité de certains colloïdes hydrophobes**.

Enfin, pour les eaux contenant peu d'**acides humiques**, le rôle de ces derniers est de **limiter l'adsorption du coagulant** en bloquant une partie des sites possibles d'adsorption. Cet effet est **d'autant plus net que les argiles ont une faible C.E.C.** (comme la kaolinite par exemple), **et entraîne une baisse du rendement**. Cet effet néfaste de la concentration en acides humiques peut être limité si :

- l'eau à traiter contient des argiles à forte capacité d'échange cationique,
- le pH de l'eau est de l'ordre de 8,4. Les mécanismes d'action du coagulant-floculant sont alors plus liés à l'action des hydroxydes précipités ;
- la température est élevée.

3.2.7) VENT

3.2.7.1) INFLUENCE DU VENT DANS LES PROCESSUS DE SEDIMENTATION NATURELLE

Lorsque la vitesse de l'eau est très faible, il y a décantation des sédiments en suspension, car aucune diffusion turbulente n'existe pour les maintenir en suspension. A l'inverse, il est bien établi que **les forts courants remettent en suspension une certaine quantité de sédiments**.

Le vent peut également créer des vagues (batillage) qui viennent battre les digues et sont susceptibles d'entraîner leur dégradation rapide. Ce phénomène **peut être la source d'un apport permanent de MES dans les plans d'eau**.

Pour les lacs de faible superficie, on peut admettre que la végétation naturelle suffira à stabiliser les talus à condition toutefois que le matériau constitutif des digues ne soit pas trop sableux. De bons résultats peuvent être obtenus dans des conditions économiques acceptables par l'emploi de canons d'engazonnement par exemple.

3.2.7.2) INFLUENCE DU VENT DANS LES PROCESSUS DE COAGULATION-FLOCCULATION

Le processus de coagulation-floculation se déroule généralement en deux phases :

- une phase de mise en contact entre l'eau à traiter et le coagulant. Cette étape se déroule généralement sous forte agitation afin d'obtenir un mélange quasi-immédiat du coagulant. Son but est également de permettre la neutralisation de la charge des particules et d'amorcer le processus de floculation par la formation de microflocs ;
- une phase d'agitation lente qui assure la mise en contact et la croissance des floccs.

Il semble évident que la première étape ne devrait pas poser de problème du fait de l'hydrodynamisme généré par le vent dans les plans d'eau turbides. En revanche, le vent risque de compromettre la phase de croissance des floccs qui nécessite une faible agitation.

3.2.8) SYNTHESE

Les facteurs abiotiques sont des paramètres complexes, difficiles à maîtriser, et dont les effets ne sont pas tous parfaitement connus.

Toutefois, un certain nombre d'observations et d'expériences ont permis d'avancer certaines théories qui peuvent nous aider dans la compréhension et le traitement des MES dans les eaux des lacs de carrières.

Ainsi, bien que les facteurs interagissent entre eux de manière complexe, on peut proposer un bilan simplifié de l'influence des principaux paramètres abiotiques sur la sédimentation des argiles en suspension.

Figure 11 : tableau récapitulatif de l'influence des facteurs abiotiques sur la sédimentation des argiles dans les plans d'eau

On appelle **variations positives** les variations des facteurs dans le **sens préférentiel de la décantation des eaux** des lacs turbides. Ces variations ne sont ici considérées qu'indépendamment les unes des autres. Il faut bien se rendre compte que **tous les facteurs interagissent de manière complexe**.

De manière générale, il semblerait qu'une **élévation** de la **température**, de l'**oxygène dissous** ou de la **minéralisation** soit **favorable à la décantation des eaux**. Notons toutefois, comme exemple de complexité des interactions entre facteurs, que l'augmentation de la température engendre naturellement une baisse de l'oxygène dissous. Une évolution positive d'un paramètre peut donc entraîner une évolution négative d'un autre.

D'autre part, il semblerait qu'une **baisse** de la concentration en **MES hydrophobes et hydrophiles** ainsi qu'une baisse de l'action du **vent** sur le plan d'eau soient également **favorables** à la décantation des eaux.

Il serait intéressant de pouvoir établir un ordre d'influence de tous ces paramètres afin de déterminer sur quels facteurs il est nécessaire d'agir prioritairement. Les recherches et les essais à mener seraient d'une telle ampleur qu'ils nécessiteraient à eux seuls une étude spécifique.

Notons que **le pH optimum n'est pas une constante**. Il dépend du plan d'eau considéré, de ses contextes environnementaux, et du mode de traitement des MES que l'on souhaite appliquer.

Remarque : A notre demande, l'IEEB a réalisé un Jar-Test pour connaître l'influence du pH sur la décantation des eaux.

Un Jar-Test consiste à ajouter différents produits à quantités variables dans des bechers contenant de l'eau turbide à traiter. L'observation de la vitesse de décantation dans chaque becher permet de déterminer le traitement optimal.

Les résultats obtenus sur une eau turbide riche en argiles semblent montrer que le pH seul ne joue pas un rôle spécifique.

3.3) INFLUENCE DES FACTEURS BIOTIQUES

3.3.1) FLORE

3.3.1.1) MAINTIEN DES BERGES

Le développement d'herbiers pourrait être favorable au maintien des berges (il réduit la contamination colloïdale du milieu lors du ruissellement) et dans la stabilisation des boues (il diminue les risques de remise en suspension des particules fines).

Pour les lacs de faible superficie, on peut éventuellement admettre que la végétation naturelle suffit à stabiliser les talus, sources potentielles de MES lorsque les vagues viennent battre les digues ou lors d'un ruissellement intensif. De bons résultats peuvent également être obtenus dans des conditions économiques acceptables par l'emploi de canons d'engazonnement.

3.3.1.2) ABRI DU VENT

La présence d'**arbres** autour du lac peut constituer un **abri par rapport au vent** et donc diminuer l'hydrodynamisme du milieu. Toutefois, l'influence d'un arbre n'étant pas infinie, le lac protégé ne doit pas être trop étendu dans l'axe du vent dominant. Il faut d'autre part s'assurer que les feuilles ne viennent pas s'accumuler dans l'eau et constituer une source importante de matière organique qui risque de consommer les coagulants-floculants du milieu ainsi que l'oxygène dissous.

3.3.1.3) SEDIMENTATION FAVORISEE

Certains végétaux comme les roselières permettent par exemple de fixer les sédiments les plus grossiers. Mais qu'en est-il de la fixation des colloïdes ?

Les végétaux à rhizomes présentent le plus grand intérêt car ils se plantent facilement et sont hélophites (appareil souterrain dans un sol gorgé d'eau, et organes végétatifs et reproducteurs aériens). Parmi ces végétaux, il y a :

- les scirpes. Ils colonisent les milieux avec une tranche d'eau importante mais supportent mal les charges organiques élevées. La période favorable à leur plantation se situe au printemps (vers avril) ;
- les roseaux. Ils s'accommodent parfaitement d'une submersion temporaire mais peuvent aussi se développer dans une tranche d'eau permanente et profonde. La période favorable à leur plantation se situe également au printemps et la densité de plantation doit être de 5 unités au mètre carré ;
- les massettes. Ils colonisent les milieux aquatiques permanents et peu profonds.

Notons que le faucardage doit être réalisé chaque année à l'automne.

3.3.1.4) INFLUENCE SUR LES AUTRES FACTEURS

Les algues microscopiques (ou microphytes) :

- assurent l'**oxygénation du milieu** (par photosynthèse) en période diurne, avec un maximum généralement aux alentours du midi solaire ;
- **assimilent certains composés** azotés ou phosphorés ;
- contribuent aux **variations de pH** (par absorption de gaz carbonique) qu'ils peuvent élever à des valeurs voisines de 9. Le développement du plancton à la lumière, qui réalise la photosynthèse, peut entraîner une légère élévation du pH.

A leur mort, les organismes planctoniques sédimentent et se décomposent dans les zones profondes dont la teneur en oxygène tend à diminuer.

Suivant la turbidité des eaux, qui peut être fortement liée aux microphytes, la lumière pénètre plus ou moins profondément.

Les végétaux macroscopiques (ou macrophytes) comprennent des formes fixées et des formes libres. Il s'agit essentiellement, dans les milieux lacustres, d'algues et de végétaux supérieurs.

Les végétaux supérieurs présentent divers avantages :

- ils augmentent la diversité de l'habitat ;
- ils jouent un rôle très important de support pour d'autres organismes permettant ainsi l'établissement d'une culture fixée très active pour l'épuration ;
- ils permettent le bon développement d'algues périphytiques qui vont oxygéner le milieu et éliminer une part importante des matières en suspension (essentiellement le phytoplancton).

3.3.2) FAUNE

Contrairement à la flore qui constitue un avantage certain pour optimiser les conditions de décantation des plans d'eau turbides, **la faune semble jouer un rôle neutre voire négatif.**

Il serait par exemple préférable d'éviter d'introduire dans le plan d'eau des **organismes fouisseurs** qui risqueraient de **remettre en suspension les particules les plus fines.**

Notons que la tonte de l'herbe et l'élimination des broussailles autour des plans d'eau devraient permettre un accès permanent à l'ensemble des berges. On pourra ainsi déceler la présence éventuelle de **rongeurs**. En effet, la présence de végétation aquatique près des berges favorise l'installation des rongeurs aquatiques tels que le ragondin et le rat musqué.

Le ragondin et le rat musqué nichent à proximité du plan d'eau. Lorsque le terrain est meuble (absence d'enrochement), ils peuvent miner les abords de la berge et donc **potentiellement générer des apports de MES dans le milieu.**

Notons enfin que tous les organismes aérobies respirent, qu'ils soient végétaux ou animaux. Plus le nombre d'organismes présents est grand, plus l'absorption de l'oxygène augmente et donc plus son taux diminue dans l'eau. La respiration conduit également à la libération de CO₂ dans le milieu. Or plus le taux de CO₂ augmente, plus **le pH est susceptible de baisser.**

3.4) SYNTHÈSE

Les paramètres susceptibles d'être intégrés dans un modèle prévisionnel de coagulation-floculation peuvent être divisés en deux groupes :

➤ Les **paramètres relatifs à la qualité de l'eau brute** :

- nature et concentration des argiles en suspension,
- nature et concentration des matières organiques en suspension,
- pH,
- température,
- minéralisation totale, avec un rôle plus ou moins important des ions Ca^{2+} , SO_4^{2-} et HCO_3^- .

➤ Les **paramètres relatifs aux conditions hydrauliques** :

- gradient de vitesse (hydrodynamisme),
- temps d'agitation.

Les **paramètres biotiques** agissent quant à eux indirectement sur les processus de coagulation-floculation à travers leur influence sur les paramètres cités précédemment.

FRANCESCHI (1991) note que la concentration optimale en sulfate d'aluminium (type de coagulant-floculant) augmente si :

- la concentration en acides humiques augmente, car ils consomment le coagulant-floculant;
- la turbidité initiale augmente;
- la concentration en HCO_3^- augmente ($\text{Al}^{3+} + 3 \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{CO}_2$) car les bicarbonates consomment également le coagulant-floculant.

Soulignons toutefois que les ions HCO_3^- permettent la précipitation de l'aluminium et tamponnent le pH du milieu.

Notons également que d'après le même auteur, il semblerait que l'obtention d'une **turbidité résiduelle** faible soit **d'avantage liée à la nature de la suspension colloïdale qu'à la quantité de colloïdes** présents. D'autre part, il semblerait que ce soient les **acides humiques** qui jouent un rôle important parmi les MES hydrophiles.

Notons encore que les paramètres influents sur l'abaissement de la turbidité diffèrent de ceux permettant de minimiser le taux de coagulant-floculant ou d'obtenir une densité optique résiduelle faible. De nombreuses interactions doivent de plus être prises en compte (FRANCESCHI, 1991).

En conséquence, pour obtenir une turbidité faible à partir d'un traitement optimal, il est nécessaire de :

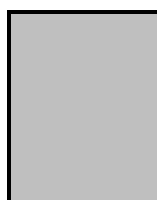
- connaître la **nature de l'argile** en suspension;
- mesurer la **concentration en acides humiques** ou en matières organiques totales.

Si la **température**, le **pH** et la **turbidité** sont en général systématiquement mesurés, il peut également s'avérer important de mesurer les concentrations en ions **Ca²⁺**, **HCO₃⁻** et **SO₄²⁻**.

Afin de minimiser le taux de coagulant-floculant à utiliser, il semblerait intéressant (FRANCESCHI, 1991) de tendre vers :

- une **température** égale à 25°C,
- un **pH** égal à 6,3,
- une **faible turbidité**,
- **peu d'acides humiques**.

Il faudra également s'assurer de la contribution bénéfique de la flore vis-à-vis du traitement ainsi que de **la non remise en suspension de particules fines par la faune**.



4ème PARTIE

ETUDE DE CAS

Les sites étudiés sont les carrières aquitaines qui présentent une forte turbidité dans les plans d'eau suite à l'extraction des matériaux. Les MES ne sédimentent pas, ou très peu, de manière naturelle.

Dans un souci de neutralité, les quatre sites étudiés sont présentés dans cette partie en respectant l'ordre alphabétique du nom des communes concernées.

4.1) ARSAC

La carrière d'ARSAC, exploitée par GSM de 1973 à 1998, a fourni annuellement à l'agglomération bordelaise environ 250 000 tonnes de granulats. La Société GSM souhaite aujourd'hui réaménager le site comme convenu avec la commune d'ARSAC lors de l'élaboration du dossier de demande d'autorisation d'exploitation de la carrière.

Toutefois, le plan d'eau principal présente une eau fortement turbide qui traduit le caractère non décantable de certaines MES. Il semblerait que ces MES soient de nature argileuse et qu'elles ne sédimentent pas naturellement dans les conditions environnementales du site étudié.

Une typologie du site et une série d'analyses in situ et au laboratoire devraient permettre de caractériser plus précisément le problème et de proposer des solutions à moindre coût.

4.1.1) CONTEXTES ENVIRONNEMENTAUX

4.1.1.1) CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

4.1.1.1.1) LOCALISATION

Le site se trouve dans le département de la GIRONDE, sur le territoire de la commune d'ARSAC, aux lieux-dits “Le Font de Canaou-Nord”, “Les Communs du Pys” et “Les Gunères-Sud”.

Située à 20 km au Nord-Ouest de BORDEAUX, la commune d'ARSAC fait partie du canton de CASTELNAU-DE-MÉDOC. Elle appartient à l'entité géographique du Médoc, région délimitée à l'Ouest par l'océan Atlantique et à l'Est par l'estuaire de la Gironde.

4.1.1.1.2) PAYSAGE

Le site se trouve dans la forêt de type landais. Cet ensemble constitue une forme très simple, tant dans son uniformité que dans l'unité de la composition végétale et la très faible densité du bâti. La forêt est uniquement interrompue par les voies de communication et les pare-feux, ainsi que par quelques hameaux et de rares cultures.

4.1.1.1.3) PLANS D'EAU

Le site est constitué de quatre plans d'eau. Le **lac de 60 ha** est allongé dans l'axe Est-Ouest et présente une eau fortement turbide. Il se déverse dans un **petit plan d'eau d'environ 2,7 ha au Nord** dont les eaux sont également opalescentes. Les **deux autres plans d'eau, d'environ 1,5 ha et 2 ha, situés au Nord-Est** du grand lac, présentent une eau claire. Ils ne sont pas en contact hydraulique superficiel avec le grand lac.

4.1.1.2) CONTEXTE PEDOLOGIQUE

La région du Médoc, qui présentait autrefois un paysage dominé par une plaine marécageuse s'étendant à perte de vue, a évolué de façon radicale dès que les techniques d'assainissement ont été maîtrisées.

Autour du site, les sols sableux sont plus ou moins évolués selon le lessivage de la matière organique contenue dans les horizons superficiels :

- Dans les zones suffisamment bien drainées, les sols sont des **podzols hydromorphes à alios**. A l'Est et à l'Ouest du site, la présence entre autres de fougère aigle indique ce type de sol.
- Dans les zones très mal drainées, la différenciation des horizons est réduite, les **sols** sont **humiques à gley**. Au Nord et au centre du site, où les terrains sont engorgés d'eau, on retrouve ce type de sol sur lequel se développe une végétation de lande très humide.

4.1.1.3) CONTEXTE GEOLOGIQUE

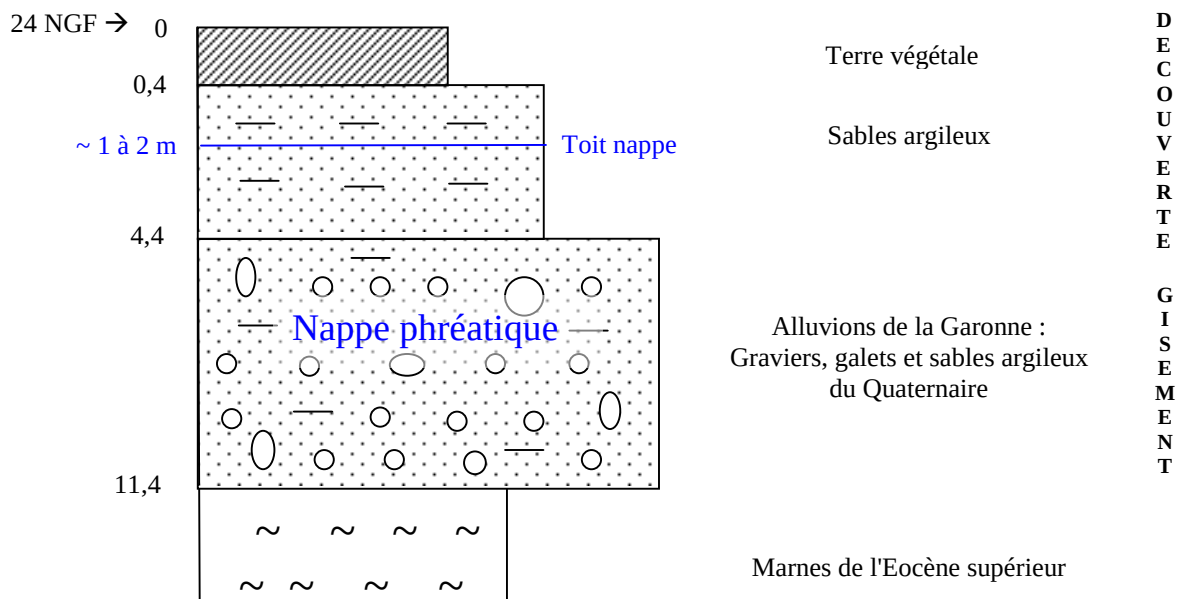


Figure 13 : coupe lithologique du site d'ARSAC

Le gisement exploité à ARSAC correspond à la **terrasse a1a**. Comme nous l'avons vu dans la partie 2.1.2. de l'étude, cette formation du Pléistocène inférieur est **caractérisée par une fraction argileuse dominée par la kaolinite avec des recristallisations de métahalloysite**, associée à des illites et des interstratifiés illite-montmorillonite, d'après la notice de la carte géologique de la feuille de BLAYE-ET-SAINT-LUCE.

4.1.1.4) CONTEXTE CLIMATIQUE

La connaissance des données climatologiques est nécessaire en raison d'une part de l'importance des vents sur les conditions hydrodynamiques des plans d'eau, et d'autre part de la pluviométrie sur les conditions physico-chimiques des eaux de surface (diminution du pH par exemple).

Globalement l'Aquitaine, en raison de sa latitude et de sa proximité de la mer, bénéficie d'un climat océanique tempéré.

Les données climatologiques de la station de BORDEAUX-MERIGNAC, qui se situe à environ 20 km au Sud du site sont les suivantes :

4.1.1.4.1) PRECIPITATIONS EN MM

JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	TOTAL
99,8	86,1	73,8	59,5	69,7	64,5	54,2	64,1	82,3	82,6	95,6	103,9	936

4.1.1.4.2) TEMPERATURES EN °C

JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	MOYENNE
5,7	6,7	8,9	11,2	14,5	17,5	19,6	19,5	17,5	13,5	8,7	6,4	12,5

4.1.1.4.3) VENTS

Les vents dominants soufflent de secteur Ouest avec une vitesse moyenne de 3,9 m/s au printemps.

Les vents de secteur Nord Nord-Est apportent des brouillards en hiver.

4.1.1.5) CONTEXTE HYDROLOGIQUE

4.1.1.5.1) RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET FOSSES DE DRAINAGE

Le territoire d'ARSAC est drainé en direction de l'estuaire par différents cours d'eau. Ces ruisseaux sont alimentés par de nombreux fossés non pérennes, qui ne fonctionnent qu'au cours de périodes pluvieuses importantes. La région médocaine est en effet parcourue par de nombreux fossés de drainage du fait de l'humidité naturelle du secteur et de l'absence de topographie notable.

Le site est bordé au Nord par un fossé longeant la passe communale et au Sud par un fossé longeant la D208.

Le ruisseau le plus proche du site est le ruisseau "La Louise", affluent de l'Estey de Tayac qu'il rejoint au niveau de la commune de SOUSSANS. Il passe environ 30 mètres à l'Ouest de l'extrémité du site.

Le plan d'eau principal se déverse dans un plan d'eau de 2,7 ha situé au Nord du grand lac. Il se déverse à son tour dans le ruisseau de la Parise par l'intermédiaire de fossés. Ce trop plein constitue l'unique **exutoire superficiel du grand plan d'eau turbide**.

4.1.1.5.2) ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

➤ Une analyse a été effectuée sur le **grand plan d'eau turbide** le 18 février 2000 par l'IEEB.

Les résultats sont les suivants :

PARAMETRES	RESULTATS
<i>Coloration</i>	peu marquée (20 unit. HAZEN)
<i>Turbidité (NTU)</i>	> 200
<i>Conductivité (microS/cm)</i>	158
<i>pH</i>	7,4
<i>Nitrates (mg/L)</i>	3,15
<i>Sulfates (mg/L)</i>	17,95
<i>Fer (mg/L)</i>	1
<i>Manganèse (mg/L)</i>	0,012

Figure 14 : tableau récapitulatif des analyses effectuées sur le plan d'eau d'ARSAC

Notons que si la coloration n'est pas préoccupante, la turbidité est en revanche fortement excessive. Précisons qu'elle dépend de la concentration en MES, mais également de la forme et de la couleur des particules en suspension.

Autrement dit, il n'y a pas de relation linéaire entre l'opalescence d'une eau et sa charge en MES.

Le pH est légèrement basique et la minéralisation semble très faible.

➤ Une analyse a été effectuée à l'**exutoire du plan d'eau turbide**, dans le cours d'eau de La Parise, le 6 mai 1999 par l'IEEB.

Le **pH** obtenu est égal à 7,55.

Les résultats fournis nous permettent de constater que le pH est sensiblement le même dans le plan d'eau et dans son exutoire.

Il aurait été intéressant de connaître la turbidité du cours d'eau afin de la comparer à celle du grand plan d'eau, mais la mesure n'a pas été réalisée.

4.1.1.6) CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

L'exploitation des sables et graviers de la moyenne terrasse intéresse **la nappe phréatique contenue dans les alluvions anciennes du Quaternaire**.

Cette nappe, d'une dizaine de mètres d'épaisseur moyenne, renferme une eau acide ou neutre de **minéralisation importante** (faciès chloruré, sulfaté et sodique).

La nappe est fortement drainée par le réseau hydrographique, en direction de la Gironde. Son niveau est proche du sol (1 à 2 m), avec des fluctuations saisonnières faibles (1 m au maximum). Une étude menée par la Société E.R.M. fait apparaître que **l'écoulement de la nappe** au niveau du site est **orienté vers le Nord-Est**.

Elle est essentiellement pompée pour des usages domestiques ou agricoles, avec des débits n'excédant pas 2 à 3 m³/h.

Le facteur principal de vidange de cette nappe semble être **l'évaporation** (50 % de la pluviométrie environ). Le ruissellement est également très important, l'infiltration est donc faible (4 à 5 %).

D'après la carte piézométrique, la vitesse d'écoulement de la nappe est la suivante :

$$V = K.i = 10^{-4} . (10/2500) = 4. 10^{-7} \text{ m/s}$$

K : perméabilité estimée de la formation réservoir (ici des alluvions du Quaternaire) en m/s

i : gradient hydraulique de la nappe

Il en résulte que le débit d'eau entrant et sortant du lac par la nappe est le suivant :

$$Q = S.V = (1100.0,1.9,4).4.10^{-7} = 4,1.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

S : surface poreuse de la section du plan d'eau traversée par l'écoulement de la nappe (la porosité efficace est estimée à 10 %)

V : vitesse d'écoulement de la nappe

4.1.1.7) CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

4.1.1.7.1) PROFIL DU PLAN D'EAU TURBIDE

Le plan d'eau principal s'étend sur une superficie d'environ **60 ha globalement orienté Est-Ouest**. Sa **profondeur moyenne** est de **9,4 m** [épaisseur découverte + gisement (11,4 m) – profondeur moyenne de la nappe sous le sol (2m)].

Les vents dominants soufflent de secteur Ouest avec une vitesse moyenne de 3,9 m/s (14 km/h) au printemps.

Même si aucune étude n'a été menée spécifiquement sur la courantologie dans le lac, l'orientation de celui-ci dans l'axe du vent et sa grande étendue présentent les caractéristiques d'un **plan d'eau fortement perturbé hydrodynamiquement**. Le mouvement de l'eau dû au vent (et peut-être même dû à une stratification thermique ou de densité selon la profondeur) engendre des forces qui assurent le maintien en suspension des particules les plus fines dans les conditions naturelles.

4.1.1.7.2) BILAN DES FLUX

Les lacs sont caractérisés par un renouvellement relativement faible de leurs eaux. Il semble intéressant de quantifier les flux entrants et sortants du lac afin de savoir s'il est raisonnable d'espérer une dilution naturelle des MES dans les eaux de renouvellement.

Volume d'eau dans le lac

La superficie du lac est d'environ 60 ha (600 000 m²) et sa profondeur moyenne est de 9,4 m. Le volume d'eau dans le lac est donc environ égal à **5,6 millions de m³**.

Volume d'eau sortant annuellement du lac

L'eau du lac sort par la nappe phréatique, par évaporation, et par le trop-plein.

Le débit d'eau sortant du lac **par la nappe** est égal à $4,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, soit environ **13 000 m³/an**.

L'**évaporation** est le facteur principal de la vidange de la nappe (50 % de la pluviométrie environ). Si l'on considère que 50 % de la pluviométrie totale (égale à 936 mm par an) est évaporée, cela représente environ **280 000 m³/an** sur le plan d'eau.

Le débit du **trop plein** vers le ruisseau de la Parise est égal à la somme des eaux entrantes moins la somme des eaux sortantes, soit environ **280 000 m³/an**.

Renouvellement de l'eau du lac

Le renouvellement en eau du lac est assuré par les précipitations. Ces dernières font déborder le trop-plein, ce qui dilue les eaux turbides d'environ **5 % annuellement**.

On peut donc estimer que **la concentration en MES peut diminuer naturellement de moitié tous les 20 ans**.

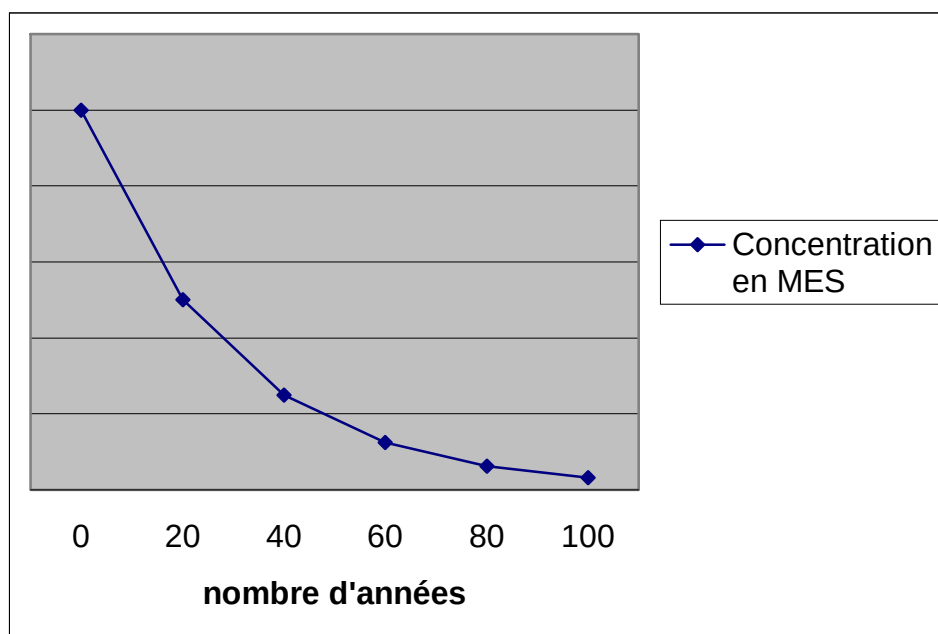


Figure 15 : évolution prévisible de la concentration en MES dans le plan d'eau d'ARSAC par dilution

4.1.2) TRAITEMENTS PROPOSES ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL

4.1.2.1) ETUDES MENEES PAR L'IEEB

La Société GSM se préoccupe de la turbidité de son plan d'eau depuis plusieurs années. Elle a déjà demandé à l'IEEB (Institut Européen de l'Environnement de Bordeaux) de proposer des solutions.

4.1.2.1.1) LA CRAIE DE CHAMPAGNE

L'IEEB a réalisé un test au laboratoire sur des échantillons de 500 ml d'eau provenant du plan d'eau d'ARSAC.

L'essai a consisté à suivre l'évolution de la décantation des particules en suspension en fonction de différents ajouts de **craie de Champagne**. Outre le fait que la craie permet d'augmenter la minéralisation de l'eau et joue donc le rôle de **coagulant-floculant**, elle permet également d'augmenter la cohésion des dépôts en **stimulant l'interface biologique** grâce à son importante surface spécifique et à son pouvoir oxydo-réducteur.

Les résultats démontrent la grande stabilité de la suspension. L'ajout de craie favorise toutefois la décantation dont les effets sont significatifs au bout de 24 heures et se bonifient dans le temps.

Le résultat obtenu avec le plus faible ajout de craie est aussi satisfaisant que pour les dosages plus élevés. Le traitement à la craie peut être conseillé à une dose de **0,2 g/L, voire inférieure en fonction de la hauteur d'eau et de la surface concernées**.

Notons que la minéralisation du milieu va augmenter jusqu'à ce que **l'équilibre physico-chimique** s'établisse. Le surplus de craie ne servira à rien et représentera une perte de matériau. Le **pH** engendré par cette méthode deviendra **basique** voire très basique. Il sera donc à surveiller.

Les résultats semblent donc concluants avec de faibles quantités d'eau turbide. Mais quels seraient-ils in situ dans un plan d'eau aussi grand que celui d'ARSAC, dans des conditions hydrodynamiques et physico-chimiques particulières ?

Le devis proposé par la Société TASO MARIETTA en 2001 pour traiter ainsi le plan d'eau de 60 ha était de l'ordre de **26 000 euros HT**.

Notons qu'un **entretien régulier trimestriel du traitement** améliorerait grandement la qualité du plan d'eau, mais les frais seraient de ce fait plus importants.

4.1.2.1.2) LE CARBONATE DE CALCIUM ET LE GYPSE

L'IEEB propose, pour effectuer la floculation la plus importante, de faire celle-ci avec **moitié de carbonate de calcium** (CaCO_3) et **moitié de gypse** ($\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$). Cela permettrait d'obtenir un plus grand précipité et les particules se solidifieraient plus facilement.

La minéralisation augmenterait jusqu'à l'équilibre physico-chimique du milieu. Notons que la concentration en sulfate est à surveiller et qu'elle pourrait constituer un facteur limitant à cette méthode si on souhaite respecter les normes.

Il pourrait sembler utile de faire une intervention de carbonate de calcium au printemps. En effet, dans ces conditions, un **apport de bactéries** permettrait de développer l'activation de ce plan d'eau et de le rééquilibrer dans son niveau biologique si nécessaire. Cette activité biologique pourrait conduire à une amélioration du milieu et également à une clarté dans les années à venir.

4.1.2.2) PROPOSITION D'UN PROCEDE DE TRAITEMENT ENVISAGEABLE

Le pH du milieu naturel est légèrement basique. De plus, les essais au gypse et au carbonate de calcium ou à la chaux réalisés par l'IEEB semblent satisfaisants sur les eaux turbides d'ARSAC.

Il apparaît donc souhaitable de réaliser un essai in situ de coagulation-floculation avec ces "produits", sachant que l'élévation de pH induit ne devrait pas modifier le pH du cours d'eau outre mesure. L'impact sur le milieu naturel de ce traitement ne devrait donc pas être significatif. Un suivi régulier des ions Ca^{2+} , HCO_3^- et SO_4^{2-} , ainsi qu'un suivi du pH serait toutefois à envisager dans le cours d'eau de La Parise, légèrement en aval de l'exutoire.

Outre le produit à utiliser pour traiter les MES, il convient de chercher à tirer profit de certains avantages que présente le site d'ARSAC. Entre autre, le **trop-plein de 2,7 ha** sert actuellement d'exutoire intermédiaire entre le grand lac turbide et le cours d'eau. On pourrait fort bien envisager de réaliser le **traitement dans ce trop-plein** et de rejeter l'eau clarifiée dans La Parise.

Ceci aurait pour **avantages** d'utiliser un petit bassin (voir partie 5.1.1.2.2) de traitement et de décantation, et d'évacuer dans le réseau hydrographique non pas une eau opalescente mais une eau claire.

Il faudra **toutefois** s'assurer que ce bassin présente le volume nécessaire pour permettre l'accumulation de toutes les MES du plan d'eau de 60 ha. Le volume des MES est égal à [(concentration des MES x volume du plan d'eau) / densité des MES]. Un exemple de ce type de calcul est présenté dans la partie 5.1.1.2.2.2. Si cette condition n'est pas remplie, il faudra envisager de curer au moins une fois tout ou partie des boues sédimentées.

Notons également que le déversement des eaux turbides dans La Parise est de l'ordre de 280 000 m³/an. Un traitement des 60 ha à ce débit serait trop long. **Il faudra** donc envisager de **pomper l'eau turbide vers le petit bassin** puis éventuellement laisser l'eau claire déborder par des buses vers La Parise (ceci permettrait de faire des économies d'énergie).

Notons bien que ce procédé de traitement devrait considérablement **augmenter le débit du ruisseau**. Si l'impact de cette modification du régime hydraulique s'avère trop marqué, il faudra alors rejeter une partie de l'eau claire dans le grand plan d'eau tout en assurant un débit minimum dans La Parise.

Etant donné le volume du plan d'eau à traiter (de l'ordre de 5,6 millions de m³), on pourrait peut-être envisager de mettre en place un deuxième procédé de traitement synchrone au précédent.

La nappe s'écoule du Sud-Ouest vers le Nord-Est, soit à 45 ° par rapport à l'allongement du grand plan d'eau. D'autre part, la topographie du site plonge légèrement également du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

Il semblerait donc intéressant de réaliser **un test d'évaporation-filtration in situ** dans les formations sub-affleurantes au Sud Sud-Ouest du plan d'eau (voir principe partie 5.1.4.1). En effet, l'eau rejetée sur ces terrains s'écoulerait ensuite, que ce soit dans la nappe ou superficiellement, en direction du plan d'eau originel. Ainsi, outre la clarification qui devrait se faire naturellement par évaporation ou filtration, on s'assure de ne pas rejeter d'eau turbide dans la nappe ou dans le réseau hydrographique.

Notons que les terrains au Sud Sud-Ouest du plan d'eau représentent une superficie potentielle importante qui pourrait permettre de clarifier le lac relativement rapidement. Ces terrains doivent être végétalisés et appartenir à la carrière si possible.

Notons également que des curages s'imposeront certainement sur les premiers centimètres des terrains filtres afin d'enlever les fines qui les imperméabilisent progressivement (voir test laboratoire partie 5.1.4.2).

4.2) AVENSAN

La carrière d'AVENSAN, exploitée par Morillon Corvol Sud-Ouest, fournit annuellement environ 200 000 tonnes de granulats. La Société Morillon Corvol envisage aujourd'hui le réaménagement du plan d'eau du Jaugas, comme convenu avec la commune d'AVENSAN lors de l'élaboration du dossier de demande d'autorisation d'exploitation de la carrière.

Toutefois, ce plan d'eau présente une eau fortement turbide qui traduit le caractère non décantable de certaines MES. Des analyses ont montré que ces MES sont de nature argileuse (l'halloysite) et qu'elles ne sédimentent pas naturellement dans les conditions environnementales du site étudié.

Un traitement est en cours sur ce site depuis janvier 2002. Une typologie du site et des essais in situ pourraient éventuellement permettre d'accélérer ce traitement.

4.2.1) CONTEXTES ENVIRONNEMENTAUX

4.2.1.1) CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

4.2.1.1.1) LOCALISATION

Le site se trouve dans le département de la GIRONDE, sur le territoire de la commune d'AVENSAN, aux lieux-dits "Le Jaugas", "Le Landat", "Barrau" et "Monteredon".

Située à 25 km au Nord-Ouest de BORDEAUX, la commune d'AVENSAN fait partie du canton de CASTELNAU-DE-MÉDOC. Elle appartient à l'entité géographique du Médoc, région délimitée à l'Ouest par l'océan Atlantique et à l'Est par l'estuaire de la Gironde.

4.2.1.1.2) PAYSAGE

Le site de l'étude est inscrit dans un paysage artificialisé, dominé par les activités humaines (vignes, cultures, exploitations de carrières). Il est situé dans une zone rurale, où l'habitat est dispersé.

Aux alentours du site, le paysage est essentiellement fermé (bois). Il est plus ouvert au Nord-Ouest (vignes de Château-Citran) et au Nord-Est (vignoble de la commune de SOUSSANS).

4.2.1.1.3) PLANS D'EAU

Le site est composé par un ensemble de plans d'eau nommés par l'exploitant Bronturon Nord, Bronturon Sud, le Jaugas, ou encore la Cabaleyre.

Les plans d'eau de Bronturon présentent une couleur bleue et sont aujourd'hui réaménagés (en zone naturelle au Nord et en zone piscicole au Sud).

Le plan d'eau du Jaugas présente quant à lui un aspect laiteux en raison de la présence d'une argile en suspension dans l'eau : l'**halloysite** (identification réalisée par l'école des mines d'ALES en 1996).

4.2.1.2) CONTEXTE PEDOLOGIQUE

La région du Médoc, qui présentait autrefois un paysage dominé par une plaine marécageuse s'étendant à perte de vue, a évolué de façon radicale dès que les techniques d'assainissement ont été maîtrisées.

Sur site, les sols sableux sont plus ou moins évolués selon le lessivage de la matière organique contenue dans les horizons superficiels :

- Dans les zones suffisamment bien drainées, les sols sont des **podzols hydromorphes** à alios.
- Dans les zones très mal drainées, la différenciation des horizons est réduite, les **sols** sont **humiques à gley**.

4.2.1.3) CONTEXTE GEOLOGIQUE

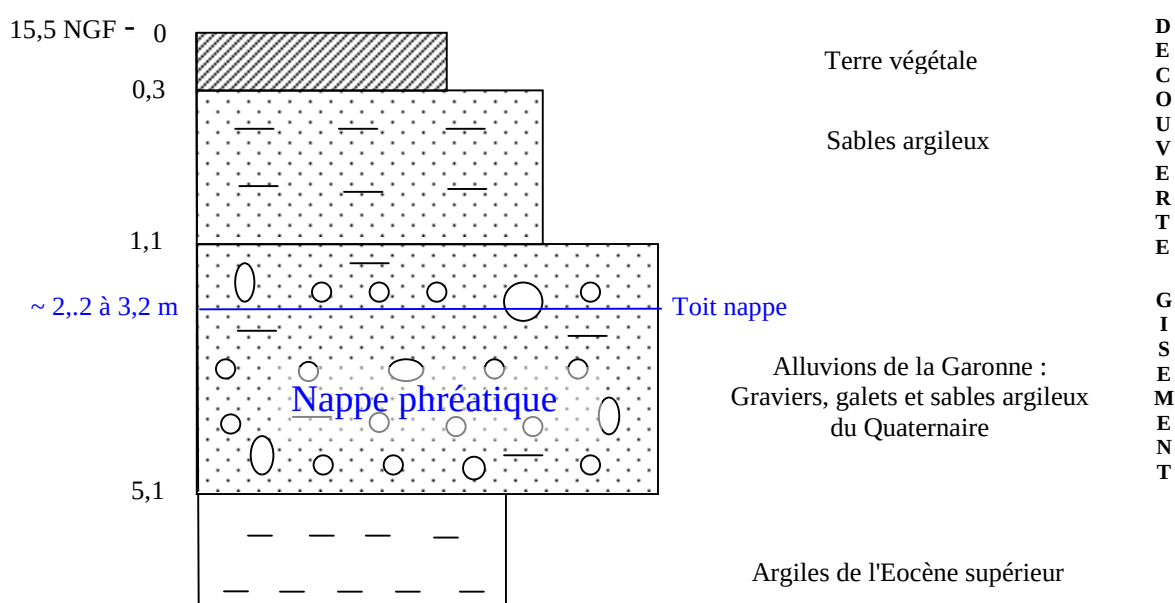


Figure 18 : coupe lithologique du site d'AVENSAN

Le gisement exploité à AVENSAN correspond à la **terrasse a1b**. Comme nous l'avons vu dans la partie 2.1.2. de l'étude, cette formation du Pléistocène inférieur est **caractérisée par une fraction argileuse dominée par la kaolinite (présence de kaolinite hydratée ?)**, associée à des illites et des interstratifiés illite-montmorillonite, d'après la notice de la carte géologique de la feuille de SAINT-LAURANT-ET-BENON.

4.2.1.4) CONTEXTE CLIMATIQUE

La connaissance des données climatologiques est nécessaire en raison d'une part, de l'importance des vents sur les conditions hydrodynamiques des plans d'eau, d'autre part de la pluviométrie sur les conditions physico-chimiques des eaux de surface (diminution du pH par exemple).

Globalement l'Aquitaine, en raison de sa latitude et de sa proximité de la mer, bénéficie d'un climat océanique tempéré.

Les données climatologiques de la station de BORDEAUX-MERIGNAC, qui se situe à environ 20 km au Sud du site sont les suivantes :

4.2.1.4.1) PRECIPITATIONS EN MM

JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	TOTAL
99,8	86,1	73,8	59,5	69,7	64,5	54,2	64,1	82,3	82,6	95,6	103,9	936

4.2.1.4.2) TEMPERATURES EN °C

JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	MOY.
5,7	6,7	8,9	11,2	14,5	17,5	19,6	19,5	17,5	13,5	8,7	6,4	12,5

4.2.1.4.3) VENTS

Les vents dominants soufflent **de secteur Ouest**. Les vents forts (supérieurs à 8 m/s) qui proviennent de cette direction représentent 86 % de ces vents. Les vents moyens (5 à 8 m/s) et faibles (2 à 4 m/s) proviennent également du secteur Ouest.

Les vents de secteur Nord Nord-Est apportent des brouillards en hiver.

4.2.1.5) CONTEXTE HYDROLOGIQUE

4.2.1.5.1) RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET FOSSES DE DRAINAGE

Le territoire d' AVENSAN est drainé en direction de l'estuaire par différents cours d'eau, dont les plus importants sont la Jalle du Dèhès à l'Ouest, la Jalle de Tiquetorte au Nord, les ruisseaux de la Louise et de la Cabaleyre à l'Est. Ces ruisseaux sont alimentés par de nombreux petits ruisseaux non pérennes, qui ne fonctionnent qu'au cours de périodes pluvieuses importantes.

Le site est traversé par un fossé (le fossé de la Franque) qui limite l'emprise dans sa partie Nord-Est. Après avoir traversé la route de la Gravière Bleue au Nord, ce fossé rejoint le ruisseau de Cabaleyre, environ 2 km plus loin.

La Cabaleyre est le ruisseau permanent le plus proche du site et passe environ 400 m à l'Est de la limite d'emprise.

A l'aval du plan d'eau du Jaugas, un **trop-plein** devrait être mis en place afin de réguler son niveau et pour éviter le rejet dans le milieu naturel d'éventuelles eaux turbides lors de la montée des eaux.

4.2.1.5.2) ANALYSES PHISICO-CHIMIQUES

Plusieurs analyses ont été effectuées sur le plan d'eau du Jaugas depuis plusieurs années. Les résultats les plus intéressants et les plus récents sont présentés ci-dessous :

Paramètres	Plan d'eau du Jaugas	
	2000	2001
pH	7,58	8,71
Conductivité (µS/cm)		70
DCO (mg/L)		35
Oxygène dissous (mg/L)		18,6
Sulfates (mg/L)	21,35	
Fer (mg/L)	8,6	

Figure 19 : tableau récapitulatif des analyses effectuées sur le plan d'eau d'AVENSAN

Notons que le **pH** est devenu **très basique** en 2001. Nous avons vu dans les parties précédentes que cette donnée peut être très importante dans le choix d'un traitement adapté.

La conductivité étant **très faible**, la **minéralisation** du plan d'eau l'est certainement également. Il aurait été intéressant de connaître les concentrations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , Cl^{-} ,... afin de confirmer cette tendance. Cela signifierait que **les conditions physico-chimiques de l'eau ne sont pas favorables à une décantation naturelle**.

Le taux de saturation en **oxygène dissous** est en revanche **extrêmement élevé**. Cela signifie généralement que le **taux de matière organique dans l'eau est très faible**. Dans le cas d'un traitement par coagulation-floculation, tout le produit ajouté sera efficacement "consommé" par les MES argileuses. En revanche, il faudra certainement **prévoir d'ajouter des substances organiques dans l'eau après traitement** afin d'y **favoriser le développement des micro-organismes**.

Il aurait été intéressant de connaître la concentration en MES et la turbidité du plan d'eau afin d'essayer de les corrélérer avec les autres paramètres.

4.2.1.5.3) ANALYSE DES MES

L'**halloysite** a été identifiée comme l'argile principale contenue dans les MES. Cette argile a été mise en suspension dans l'eau au cours de l'extraction et confère à l'eau du Jaugas un aspect laiteux.

La particularité de cette argile réside dans la forme (en bâtonnets), la densité (1 à 2,2) et la taille de ses particules. Une faible agitation thermique ou éolienne suffisent à empêcher sa sédimentation.

4.2.1.6) CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

L'exploitation des sables, graviers et galets de la terrasse alluvionnaire intéresse **la nappe phréatique contenue dans les alluvions anciennes du Quaternaire**.

Cette nappe, d'une épaisseur moyenne de 5 mètres, renferme une eau généralement acide, peu minéralisée et riche en fer.

D'après le suivi effectué de 1995 jusqu'à maintenant, la nappe est entre 2,2 et 3,2 m sous la surface du sol.

Le facteur principal de vidange de cette nappe semble être **l'évaporation** (50 % de la pluviométrie environ). Le ruissellement est également très important, l'infiltration est donc faible (4 à 5 %).

D'après la carte piézométrique de la nappe phréatique sur la zone étudiée, son **écoulement général est dirigé vers le Nord**, donc vers le plan d'eau du Bronturon. Or ce lac n'est pas turbide alors qu'il se situe à peine à deux cents mètres du Jaugas fortement turbide.

On peut conclure que **l'eau de la nappe est filtrée par la formation du quaternaire sur les deux cents mètres de terrain entre les deux plans d'eau**.

D'après la carte piézométrique, la vitesse d'écoulement de la nappe est la suivante :

$$V = K.i = 10^{-4} \cdot (2/182) = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$$

K : perméabilité estimée de la formation réservoir (ici des alluvions du Quaternaire) en m/s

i : gradient hydraulique de la nappe

Il en résulte que le débit d'eau entrant et sortant du lac par la nappe est le suivant :

$$Q = S.V = (450.0,1.2,4).1,1.10^{-6} = 1,2.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

S : surface poreuse de la section du plan d'eau du Jaugas traversée par l'écoulement de la nappe (porosité efficace estimée à 10 %)

V : vitesse d'écoulement de la nappe

4.2.1.7) CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

4.2.1.7.1) PROFIL DU PLAN D'EAU TURBIDE

Le plan d'eau s'étend sur une superficie de **19 ha**, sans orientation privilégiée. Sa **profondeur moyenne** est de **2,4 m** [épaisseur découverte + gisement (5,1 m) – profondeur moyenne de la nappe sous le sol (2,7 m)].

Les **vents dominants** soufflent **de secteur Ouest** avec une vitesse allant de 2 m/s (7,2 km/h) à 8 m/s (28,8 km/h).

Même si le lac ne présente pas d'orientation privilégiée, son étendue est telle que le plan d'eau est **fortement perturbé hydrodynamiquement**. Le mouvement de l'eau dû au vent engendre des forces qui assurent le maintien en suspension des particules les plus fines dans les conditions naturelles.

4.2.1.7.2) BILAN DES FLUX

Comme pour ARSAC, il semble intéressant de quantifier les flux entrants (ou sortants) du lac afin de savoir s'il est raisonnable d'espérer une dilution naturelle des MES dans les eaux de renouvellement.

Volume d'eau dans le lac

La superficie du lac est de 19 ha (190 000 m²) et sa profondeur moyenne est de 2,4 m. Le volume d'eau dans le lac est donc environ égal à **456 000 m³**.

Volume d'eau sortant annuellement du lac

L'eau du lac sort soit par la nappe phréatique, soit par évaporation. Le plan d'eau n'a pas d'exutoire.

Le débit d'eau sortant du lac **par la nappe** est égal à $1.2.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ soit environ **3 800 m³/an**.

L'**évaporation** est le facteur principal de la vidange de la nappe (50 % de la pluviométrie environ). Si l'on considère que 50 % de la pluviométrie totale (égale à 936 mm par an) est évaporée, cela représente environ **89 000 m³/an** sur le Jaugas.

Renouvellement de l'eau du lac

Dans la mesure où l'eau qui s'évapore et l'eau qui s'écoule dans la nappe ne sont pas chargées en MES, **le renouvellement en eau du lac ne permet pas de le diluer naturellement**.

Seule la mise en place d'un trop-plein qui se déverserait dans un bassin de traitement pourrait permettre la dilution des eaux turbides.

4.2.2) TRAITEMENTS PROPOSES ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL

4.2.2.1) ETUDE MENEES PAR MORILLON CORVOL ET SOPROMAT

SOPROMAT est un agent du groupe SNF (Société Nouvelle Floerger). La société est sensibilisée au problème des MES dans le plan d'eau du Jaugas à AVENSAN depuis 1997.

Plusieurs essais (Jar Test notamment) ont été réalisés au laboratoire de SOPROMAT sur des échantillons d'eau turbide du plan d'eau concerné.

Ces tests ont conduit à la mise en place d'un processus de clarification en janvier 2002, après extraction et réaménagement du plan d'eau.

Principe du processus

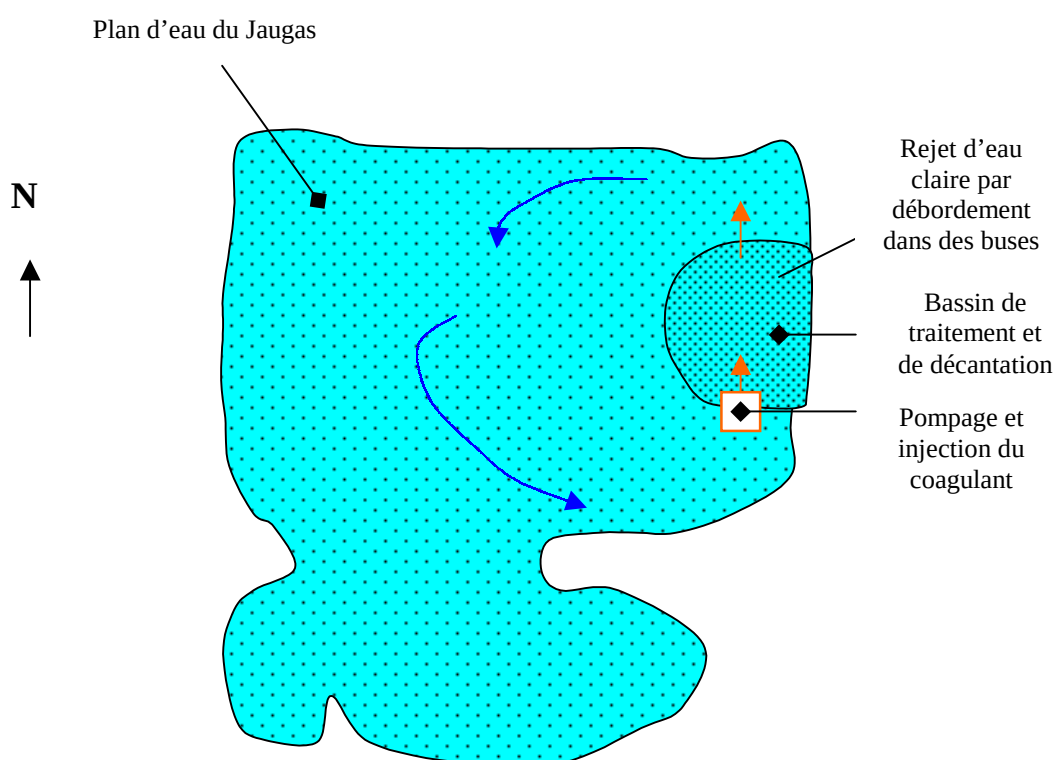


Figure 20 : schéma du procédé de traitement actuel sur le plan d'eau turbide d'AVENSAN

La pompe a un débit de 200 m³/h et tourne 24 h/24 et 7j/7. Des débits plus importants peuvent être utilisés et le seront peut-être d'ici peu.

Coagulation utilisée

Les tests ont révélé que l'utilisation d'un coagulant organique, sans floculant, donne de bons résultats. La concentration et la nature de ce coagulant sont propres au site.

L'incorporation du produit dans l'eau se fait dans de bonnes proportions. Un sous-dosage rendrait le traitement inefficace. Un sur-dosage conduirait à rendre l'eau de sortie trouble, chargée en matière organique.

Notons que cette matière organique injectée dans le bassin de traitement ne présente pas de danger pour l'environnement dans la mesure où la quasi-totalité est piégée dans les floccs qui sédimentent. Pour la faible quantité de coagulant qui serait rejetée dans le plan d'eau, une étude d'impact sur l'environnement a été réalisée par la société pour tous ses produits. Un des intérêts de la matière organique, c'est qu'elle ne modifiera pas le pH si le plan d'eau ne contient pas d'acides humiques.

Résultats du traitement

Le traitement, commencé en janvier 2002, donne des résultats satisfaisants en matière de clarification du plan d'eau.

En quatre mois, la concentration en MES du plan d'eau a été divisée par 6 environ.

D'autre part, la turbidité initiale du plan d'eau est diluée par l'eau claire en sortie du bassin de traitement dont la turbidité est environ 60 fois moindre. Il semblerait que la dilution naturelle par les eaux de la nappe et des précipitations n'ait pas d'effet mesurable sur le site d'AVENSAN car la turbidité est restée la même de 1997 à janvier 2002 (date de début du traitement).

Coût du traitement

Ce coût est en relation avec la nature, la dose et la quantité de coagulant utilisé. Il dépend donc de la nature et de la concentration initiale en MES du plan d'eau.

Il semblerait que l'énergie nécessaire pour faire tourner la pompe, ainsi que son suivi et son entretien, coûtent plus chère que le traitement (produits et main-d'œuvre). La pompe et le type d'énergie utilisés sont régis dans le cas présent par l'exploitant.

Propriétés de la boue formée dans le bassin de traitement

Bien que des coagulants soient ajoutés aux MES initiales pour former les floccs puis la boue, il semblerait que l'halloysite représente une grande proportion de la composition finale de cette boue.

4.2.2.2) PROPOSITION D'UN PROCEDE DE TRAITEMENT ENVISAGEABLE

Dans la mesure où le traitement est efficace, ce dernier n'est pas à remettre en cause. En revanche, il serait préférable d'utiliser une **pompe plus puissante** afin de traiter plus rapidement le plan d'eau. La Société SOPROMAT affirme que l'on peut traiter sans problème avec les mêmes produits et la même efficacité 1000 m³/h d'eau turbide par exemple.

D'autre part, dans le cas où **des essais de perméabilité** seraient concluants, on pourrait envisager d'utiliser le principe d'évaporation-filtration autour du plan d'eau d'AVENSAN (voir partie 5.1.4.1). Si les terrains au Sud du plan d'eau le permettent (c'est-à-dire terrains susceptibles d'être enherbées et "ennoyées"), les eaux infiltrées reviendraient vers le plan d'eau du Jaugas. De ce fait, même un test inefficace n'aurait pas d'impact sur l'environnement.

4.3) CABANAC

La carrière de CABANAC est exploitée depuis 1992 pour ses sables et graviers par la Société Les Granulats d'Aquitaine. L'extension du site a été accordée et devrait permettre de fournir en moyenne 190 000 tonnes de granulats par an.

Les plans d'eau de la carrière présentent une eau fortement turbide qui traduit le caractère non décantable de certaines MES. Il semblerait que ces MES soient de nature argileuse et qu'elles ne sédimentent pas naturellement dans les conditions environnementales du site étudié.

La Société Les Granulats d'Aquitaine s'inquiète au sujet du rejet de ces MES dans le réseau hydrographique en période de crue et souhaiterait que des solutions soient proposées.

Une typologie du site et une série d'analyses in situ et au laboratoire devraient permettre de caractériser plus précisément le problème et de proposer des solutions à moindre coût.

4.3.1) CONTEXTES ENVIRONNEMENTAUX

4.3.1.1) CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

4.3.1.1.1) LOCALISATION

Le site se trouve sur le territoire de la commune de CABANAC, au lieu-dit "Plaisance Nord", à environ 2,5 km à l'Ouest du bourg, et 3,5 km au Nord du bourg de la commune de VILLAGRAINS.

4.3.1.1.2) PAYSAGE

Il est typique des zones de Lande humide couverte par les forêts de pins maritimes.

Les espaces non boisés sont occupés par :

- des exploitations de graves,
- des zones d'habitations,
- des zones cultivées,
- des zones défrichées.

4.3.1.1.3) PLANS D'EAU

Le site est composé d'un ensemble de plans d'eau de petite taille. Tous sont turbides excepté celui qui est le plus au Nord-Est et qui vient d'être exploité.

Le plan d'eau le plus grand, en face des installations de traitement, a une **couleur blanchâtre** certainement due à la présence d'argiles en suspension.

Les plans d'eau plus petits au Sud du site présentent une **couleur marronâtre**. Notons qu'ils ont été individualisés à la faveur de la création de bassins d'expérimentation pour traiter les MES. Les digues sont constituées de terres de découverte riches en **alios** et en **matière organique**. On peut donc penser que ces eaux, outre les argiles initiales, sont certainement enrichies en fer et en matière organique en suspension.

4.3.1.2) CONTEXTE PEDOLOGIQUE

Le sol est composé de sables des Landes et d'alios entre autres. Ce dernier, caractéristique des sols podzoliques, contient du fer et peut "contaminer" le milieu aquatique s'il y est introduit.

4.3.1.3) CONTEXTE GEOLOGIQUE

La carrière étudiée se situe sur la carte géologie d'HOSTENS, sur le flanc Nord de l'anticlinal de VILLAGRAINS-LANDIRAS.

La composition des alluvions anciennes quaternaires de la Garonne est très variable. Essentiellement graveleuse à l'Est de la feuille d'HOSTENS, la formation passe latéralement vers l'Ouest à des niveaux où prédominent les intercalations argileuses.

Les galets et graviers sont essentiellement siliceux. La fraction sableuse est formée de grains de quartz subarrondis, dans lesquels on observe un cortège de minéraux lourds. Les argiles ont un **cortège à dominante de kaolinite**.

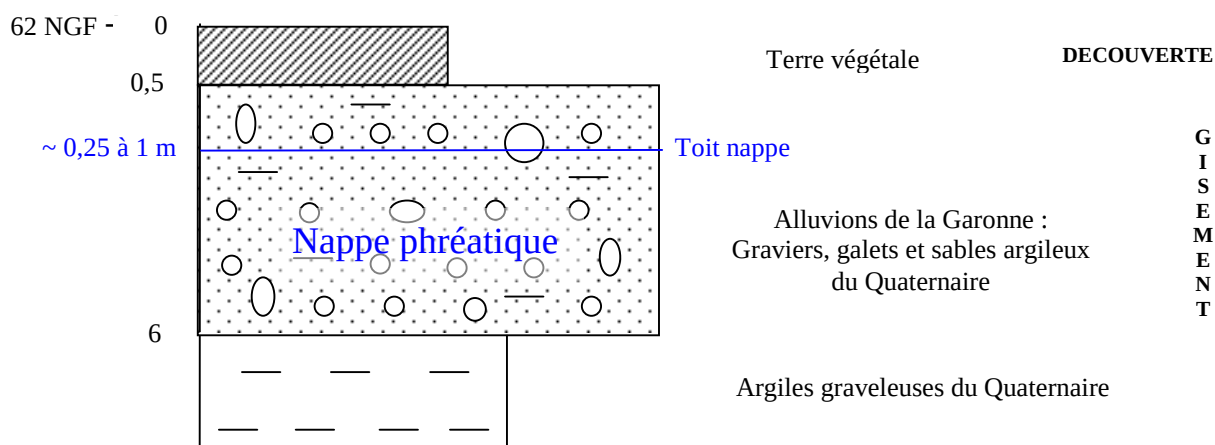


Figure 22 : coupe lithologique du site de CABANAC

Le gisement exploité à CABANAC correspond à une terrasse ancienne de la Garonne. Cette formation est **caractérisée au droit du site par des intercalations argileuses dominées par la kaolinite (présence de kaolinite hydratée ?)**, d'après la notice de la carte géologique de la feuille d'HOSTENS.

4.3.1.4) CONTEXTE CLIMATIQUE

La connaissance des données climatologiques est nécessaire en raison d'une part de l'importance des vents sur les conditions hydrodynamiques des plans d'eau, et d'autre part de la pluviométrie sur les conditions physico-chimiques des eaux de surface (diminution du pH par exemple).

Globalement l'Aquitaine, en raison de sa latitude et de sa proximité de la mer, bénéficie d'un climat océanique tempéré.

4.3.1.4.1) PRECIPITATIONS EN MM

JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	TOTAL
100	85	70	55	80	66	54	65	77	73	93	103	921

Précipitations moyennes mensuelles (période de 1951 à 1980)

4.3.1.4.2) TEMPERATURES EN °C

JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	MOY.
5,7	6,8	7,9	10,2	13,6	16,5	19,4	19,1	16,5	12,5	8,2	6	11,9

Température en °C (période de 1971 à 1980)

4.3.1.4.3) VENTS

Les données obtenues au poste de BORDEAUX-MERIGNAC montrent un secteur dominant d'Ouest pour les vitesses supérieures à 5 m/s. Les vents faibles sont quant à eux régulièrement répartis.

4.3.1.5) CONTEXTE HYDROLOGIQUE

4.3.1.5.1) RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET FOSSES DE DRAINAGE

De nombreux fossés traversent ces zones de landes humides naturellement mal drainées. La craste de Duluc, affluent du Gât-Mort, longe le site au Sud. Un fossé de drainage traverse le site en longeant la voie communale Péguilleyre et alimente la craste de Duluc en limite Sud de la demande.

Les plans d'eau ne possèdent pas de trop plein, mais les débordements engendrés lors des crues entraînent une vidange des lacs turbides vers le réseau hydrographique.

4.3.1.5.2) ANALYSE DES MES

L'exploitant de la gravière de CABANAC a envoyé un échantillon d'eau turbide à l'école des mines d'ALES afin de déterminer la nature des MES argileuses. Les résultats ne nous sont pas parvenus avant la fin de la rédaction du présent rapport.

4.3.1.6) CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

L'exploitation des sables, graviers et galets de la terrasse alluvionnaire intéresse la **nappe phréatique contenue dans les alluvions anciennes du Quaternaire**.

D'après des sondages réalisés en avril 1992, le niveau piézométrique se situerait **entre 0.25 et 1 m sous le niveau du sol**.

Le facteur principal de vidange de cette nappe semble être l'**évaporation** (70 % de la pluviométrie environ). Le ruissellement est quasi-nul, l'infiltration est donc importante (30 % de la pluviométrie environ).

D'après la carte piézométrique de la nappe phréatique sur la zone étudiée, son **écoulement principal est dirigé du NW vers le SE**, donc vers la Garonne. Cette nappe est drainée par le ruisseau du Gât-Mort.

Un échantillon prélevé le 13 mars 1997 indique que la **nappe phréatique est très acide** (pH = 4,95) et qu'elle présente une **teneur en fer très élevée** (5,45 mg/L).

D'après la carte piézométrique, la vitesse d'écoulement de la nappe est la suivante :

$$V = K.i = 10^{-4}.(6/1000) = 6.10^{-7} \text{ m/s}$$

K : perméabilité estimée de la formation réservoir (ici des alluvions du Quaternaire) en m/s

i : gradient hydraulique de la nappe

Il en résulte que le débit d'eau entrant et sortant du lac par la nappe est le suivant :

$$Q = S.V = (250.0,1.5).6.10^{-7} = 7,5.10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

S : surface poreuse de la section de l'ensemble des plans d'eau du site traversée par l'écoulement de la nappe (porosité efficace estimée à 10 %)

V : vitesse d'écoulement de la nappe

4.3.1.7) CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

4.3.1.7.1) PROFIL DU PLAN D'EAU TURBIDE

Les plans d'eau s'étendent sur une superficie d'environ **9 ha** dans l'axe Nord-Sud. Leur **profondeur moyenne** est de **5 m** [épaisseur découverte + gisement (6 m) – profondeur moyenne de la nappe sous le sol (1 m)].

Les vents dominants soufflent depuis le secteur Ouest pour les vitesses supérieures à 5 m/s. Les vents faibles sont quant à eux régulièrement répartis.

Même si le site est composé de plusieurs plans d'eau relativement petits, ils sont tout de même fortement perturbés hydrodynamiquement par le vent. Ce dernier engendre des forces qui assurent le maintien en suspension des particules les plus fines dans les conditions naturelles.

4.3.1.7.2) BILAN DES FLUX

Il semble intéressant de quantifier les flux entrants (ou sortants) du lac afin de savoir s'il est raisonnable d'espérer une dilution naturelle des MES dans les eaux de renouvellement.

Volume d'eau dans le lac

La superficie totale des lacs est d'environ 9 ha (90 000 m²) et leur profondeur moyenne est de 5 m. Le volume d'eau est donc environ égal à **450 000 m³**.

Volume d'eau sortant annuellement du lac

L'eau du lac sort soit par la nappe phréatique, soit par évaporation. Le plan d'eau n'a pas d'exutoire.

Le débit d'eau sortant du lac **par la nappe** est égale à $7,5.10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ soit environ **2 400 m³/an**.

L'**évaporation** est le facteur principal de la vidange de la nappe (70 % de la pluviométrie environ). Cela représente environ **59 000 m³/an**.

Renouvellement de l'eau du lac

Dans la mesure où l'eau qui s'évapore et l'eau qui s'écoule dans la nappe ne sont pas chargées en MES, **le renouvellement en eau du lac ne permet pas de le diluer naturellement**.

Seule la mise en place d'un trop-plein qui se déverserait dans un bassin de traitement pourrait permettre la dilution des eaux turbides.

4.3.2) TRAITEMENT PROPOSE PAR ABIOLO ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL

La Société les Granulats d'Aquitaine se préoccupe de la turbidité de son plan d'eau depuis plusieurs années. Elle a déjà demandé à la Société ABIOLO de proposer des solutions. Cette Société intervient en utilisant un procédé biologique adapté à la situation rencontrée.

Le principe de cette méthode est d'agglomérer les particules fines sous forme de billes suffisamment lourdes pour ne plus être remises en suspension. Cette coagulation-floculation est obtenue à partir d'un produit comprenant entre autres une activité bactérienne.

Les billes obtenues sont ensuite relarguées dans le plan d'eau turbide où elles seraient piégées dans un système biologique développé.

L'eau claire est quant à elle rejetée vers le milieu naturel.

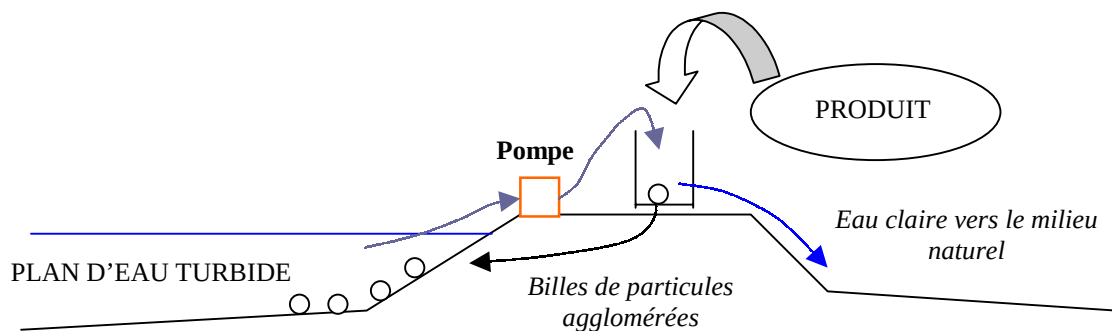


Figure 23 : schéma du procédé de traitement actuel sur le site de CABANAC

Ce principe est mis en oeuvre sur le site de CABANAC depuis peu. Nous n'avons pas eu de renseignement quant au succès éventuel de la clarification du plan d'eau traité.

4.4) MIOS

4.4.1) CONTEXTES ENVIRONNEMENTAUX

La carrière se situe à l'Est du bassin d'Arcachon, dans le département de la GIRONDE. Les eaux de surface sont drainées par le système bassin d'Arcachon-Leyre (ruisseau de Lacanau).

Sur la retombée Nord-Ouest de l'anticlinal VILLAGRAINS-LANDIRAS s'étale un complexe sablo-argileux surmontant les dépôts des dernières venues marines du Miocène.

La carrière exploite ces sables qui peuvent par la suite être utilisés en verrerie, pour des filtrations industrielles ou encore pour des enduits spéciaux.

Les contextes environnementaux du site de MIOS ne pourront être présentés de manière plus avancée faute de documentation suffisante.

4.4.2) TRAITEMENT PROPOSE PAR L'IEEB ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL

L'IEEB a réalisé des tests de traitement des eaux turbides du plan d'eau de MIOS avec du **gypse** (de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) puis d'autres tests avec de la **chaux éteinte** (de formule $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ces derniers reposent sur le principe du Jar-Test qui permet de déterminer la nature et les quantités optimales de produits à utiliser pour traiter les eaux par coagulation-floculation.

Il s'avère que les **résultats obtenus avec la chaux éteinte sont très satisfaisants et meilleurs que ceux obtenus avec le gypse**. De plus, le pH de l'eau traitée est de l'ordre de 8,3 (< 8,5 réglementairement) et ne pose de ce fait pas de problème pour l'environnement.

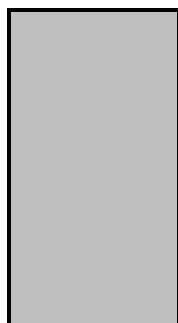
L'IEEB poursuit à ce jour des tests afin de déterminer la stabilité des dépôts de boues obtenues en utilisant de la chaux éteinte.

4.5) AUTRES SITES

Un questionnaire a été envoyé le 17 avril 2002 à tous les adhérents du Comité Régional de la Charte Aquitaine. Il avait pour but de recenser les carrières sur lesquelles des plans d'eau sont restés inhabituellement turbides après la fin des travaux d'extraction.

Les réponses recueillies à ce jour (environ 40 %) ne nous ont pas permis d'identifier d'autres sites concernés par les MES argileuses rémanentes dans les plans d'eau.

Les quatre cas présentés précédemment restent donc les seuls recensés à ce jour par l'UNICEM Aquitaine. Leur présentation et leur étude pourraient permettre à d'autres exploitants de comparer leurs plans d'eau et d'envisager éventuellement de les traiter par une des solutions proposées dans la partie 5.



5ème PARTIE
TRAITEMENT DES MES
DANS LES PLANS D'EAU
DE CARRIERES

5.1) PROPOSITIONS DE PROCÉDES DE TRAITEMENT ENVISAGEABLES

Les propositions qui suivent permettent de faire un inventaire des solutions existantes ou envisageables à l'heure actuelle pour traiter les MES argileuses dans un plan d'eau.

L'objectif de cette partie est de reprendre les solutions de traitement proposées dans la partie 4, mais également de les comparer avec d'autres solutions proposées par des sociétés, des laboratoires ou des organismes rencontrés dans le cadre de l'étude.

L'idée est de décrire les avantages et les inconvénients de chaque proposition afin que les exploitants puissent faire le meilleur choix de traitement le cas échéant pour leur propre plan d'eau.

5.1.1) TRAITEMENTS DES MES PAR DES COAGULANTS-FLOCCULANTS ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL

De nombreux spécialistes s'accordent à dire que la solution la plus pertinente pour clarifier une eau chargée en MES est la coagulation-floculation.

Ce mode de traitement, explicité dans la partie 3, implique la réalisation de tests pour chaque plan d'eau à traiter afin de déterminer les coagulants et les floculants ainsi que les proportions à utiliser.

Le test le plus classique est le Jar-Test. Ce dernier consiste à ajouter différents produits à quantités variables dans des bechers contenant de l'eau turbide à traiter. L'observation de la vitesse de décantation dans chaque becher permet de déterminer le traitement optimal.

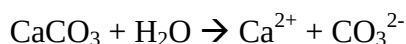
D'autre part, ce mode de traitement implique l'ajout de produits qui peuvent être de nature diverse (minéraux ou organiques). Il est bien évident qu'il faudra s'assurer que ces produits n'induisent pas d'autres problèmes qui pourraient s'avérer autant, sinon plus délicats que celui des MES.

5.1.1.1) EXEMPLES DE COAGULANTS-FLOCCULANTS ET DE LEURS EFFETS SUR LE MILIEU

Il n'y a pas de bons ou de mauvais produits pour clarifier un plan d'eau, il y a toujours au moins un produit adapté. Les argiles diffèrent selon chaque gisement, et leur nature ainsi que leur quantité ont une influence directe sur le produit le plus adapté à utiliser.

5.1.1.1.1) LE CARBONATE DE CALCIUM

Le carbonate de calcium (CaCO_3) se dissout dans l'eau d'autant mieux qu'il se présente sous forme fragmentée voire poudreuse (comme pour tous les minéraux). Il se solubilise jusqu'à obtention de l'équilibre chimique du milieu aquatique, tel que :



Ces réactions montrent bien que la dissolution du CaCO_3 engendre la **minéralisation de l'eau** (Ca^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^-) ainsi qu'une **augmentation du pH** (par libération de OH^-). D'autre part, les ions HCO_3^- permettent de **tamponner le pH** du milieu à un pH **légèrement basique**.

Un essai à la craie de Champagne par l'IEEB sur des eaux issues du plan d'eau turbide d'ARSAC a consisté à suivre l'évolution de la décantation des particules en suspension en fonction de différents ajouts. Outre le fait que **la craie** permette d'augmenter la minéralisation de l'eau et donc de jouer **le rôle de coagulant-floculant**, elle permet également d'**augmenter la cohésion des dépôts** en stimulant l'interface biologique grâce à son importante surface spécifique et à son pouvoir oxydo-réducteur.

Les résultats de l'essai au laboratoire démontrent que l'ajout de craie favorise la décantation, dont les effets sont significatifs au bout de 24 heures et se bonifient dans le temps.

Le résultat obtenu avec le plus faible ajout de craie est aussi satisfaisant que pour les dosages plus élevés. Le traitement à la craie peut être conseillé à une dose de **0,2 g/L, voire inférieure en fonction de la hauteur d'eau et de la surface concernées**.

Notons que la minéralisation du milieu va augmenter jusqu'à ce que l'équilibre physico-chimique s'établisse. Le surplus de craie ne servira à rien et représentera une perte de matériaux. Le **pH** engendré par cette méthode deviendra **basique** voire très basique. Il sera donc **à surveiller**.

Les **résultats** semblent donc **concluants** avec de faibles quantités d'eau turbide et au laboratoire. Mais quels seraient-ils in situ dans un plan d'eau de plusieurs hectares, dans des conditions hydrodynamiques et physico-chimiques particulières ?

5.1.1.1.2) LA CHAUX ETEINTE

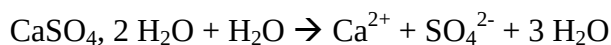
L'utilisation de la chaux éteinte [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] permet d'**augmenter le pouvoir électrolytique de l'eau par libération de cations Ca^{2+}** .

L'avantage de la chaux, par rapport au carbonate de calcium, est qu'elle ne modifie pas le pH et que la forme de lait de chaux permet d'optimiser la solubilité du matériau.

Des tests réalisés au laboratoire par l'IEEB ont donné de **bons résultats** pour la décantation des eaux de MIOS.

5.1.1.1.3) LE GYPSE

Le gypse ($\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$) présente la propriété de se solubiliser facilement tel que :



Cette réaction montre bien que la dissolution du gypse engendre une **augmentation de la minéralisation de l'eau** (Ca^{2+} , SO_4^{2-}). Cela permet d'obtenir un plus grand précipité et les particules se solidifient plus facilement.

Des essais de traitement au gypse réalisés en laboratoire par l'IEEB ont montré de **bons résultats** sans poser le problème d'une modification du pH. La minéralisation augmente jusqu'à l'équilibre physico-chimique du milieu. Notons que la concentration en sulfate est à surveiller et qu'elle pourrait constituer un facteur limitant à cette méthode si on souhaite respecter les normes (< 200 mg/L).

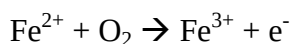
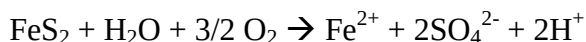
La Société BPB FORMULA utilise un gypse naturel micronisé d'une très grande pureté, nommé AQUABEL. Ce produit est utilisé dans le traitement des étangs et des rivières pour réduire le niveau de vase, clarifier l'eau, et pour équilibrer la composition chimique de l'eau par apport de calcium.

5.1.1.1.4) LA CHAUX ETEINTE + LE GYPSE

Des **tests** sont **actuellement en cours** à l'IEEB. Les résultats attendus devraient permettre de proposer l'utilisation de ce type de coagulant-floculant pour traiter les eaux turbides le plus efficacement et avec le moins d'impacts possibles.

5.1.1.1.5) LA PYRITE

Il a été observé dans certaines carrières que les MES argileuses décantent sans difficulté alors que le pH est très bas ($\text{pH} < 3$). Cet abaissement du pH a été attribué à la présence de pyrite (FeS_2) sur les sites. En effet, la dissociation de la pyrite dans l'eau donne :



On remarque dans ces réactions qu'outre la diminution du pH (par libération de H^+), il se forme également des ions Fe^{2+} , Fe^{3+} et SO_4^{2-} qui vont fortement minéraliser le milieu. On peut donc penser que ce n'est pas le pH mais la minéralisation qui joue un rôle prépondérant dans la sédimentation des particules fines. D'autre part, un milieu acide engendre la dissolution des hydroxydes de fer, ce qui minéralise davantage encore le milieu aqueux.

Il faut toutefois prendre des précautions si l'on souhaite utiliser de la pyrite comme coagulant-floculant. **L'abaissement de pH sera tel qu'il risquerait de rendre le milieu azoïque** (sans vie possible). Il pourrait également y avoir une **remobilisation des métaux lourds** et ces derniers pourraient contaminer la nappe ou les eaux de surface.

Pour utiliser cette méthode, il faudrait donc **prévoir d'utiliser une roche calcaire dans un deuxième temps** (la craie par exemple) afin de lutter contre le pH très acide engendré par la pyrite. Non seulement celle-ci permettrait de réajuster le pH, mais également de minéraliser encore plus le milieu, et de favoriser la prolifération bactérienne le cas échéant. D'autre part, les **ions HCO_3^-** dissous à partir des roches carbonatées permettent de **tamponner le pH** du milieu à un pH légèrement basique et ainsi de **favoriser la précipitation du fer**. En effet ce dernier est peu soluble à un tel pH et sa précipitation sous forme d'hydroxydes de fer peut engendrer une coagulation par balayage.

5.1.1.1.6) LE SULFATE D'ALUMINIUM

Le sulfate d'aluminium $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$ est un produit couramment utilisé pour le traitement des eaux usées dans les stations d'épuration.

Si son **efficacité n'est pas à remettre en cause**, ce produit **risque de poser des problèmes** s'il est utilisé **dans le milieu naturel**. Dans la mesure où l'on n'est pas certain que tout le coagulant-floculant soit piégé dans les boues, il serait particulièrement délicat de rejeter de l'aluminium dans le milieu naturel. Même si ce dernier est un élément qui précipite facilement, des conditions particulières pourraient rapidement entraîner une concentration supérieure à la réglementation ($< 200 \mu\text{g/L}$).

5.1.1.1.7) LE CHLORURE FERRIQUE

Le chlorure ferrique (FeCl_3) est également un produit couramment utilisé pour le traitement des eaux usées dans les stations d'épuration.

De même que pour le sulfate d'aluminium, son **efficacité est certaine mais les impacts du fer sur l'environnement** risquent d'être plus importants que les impacts des MES. La réglementation indique que la concentration en fer normale doit être inférieure à $500 \mu\text{g/L}$ dans le milieu naturel.

5.1.1.1.8) LES COAGULANTS ORGANIQUES

Certaines matières organiques présentent des propriétés qui peuvent favoriser la clarification des eaux turbides. Leurs natures et leurs concentrations sont intimement liées à la nature et la concentration des MES.

L'utilisation d'un coagulant non accompagné d'un floculant semble pouvoir suffire dans certains cas. Ceci présente l'avantage de ne pas avoir à préparer de floculants, qui sont des polymères issus de la chimie fine demandant des conditions très stricts pour être opérationnels. En effet, ces produits, qui se présentent sous la forme de fines granules, doivent être dissous intégralement pour que leur chaîne moléculaire soit totalement active.

Quant au préparateur à floculant, il devra être correctement dimensionné pour répondre à la fois :

- au temps minimal de dissolution totale du produit (environ une heure),
- à la concentration optimale de la solution mère,
- au débit des pompes doseuses s'y rapportant (ne doit pas être inférieur au temps de dissolution en débit maximal).

L'intérêt environnemental de la méthode est de limiter l'influence du produit ajouté. Ce dernier sera essentiellement piégé dans la boue. Les bactéries et les rayons UV devraient entièrement le dégrader un léger excès de coagulant. D'autre part, les plans d'eau issus de l'extraction sont souvent au départ abiotiques et il sera recommandé d'introduire entre autre des substances organiques si l'on souhaite qu'un écosystème se développe rapidement. L'excès de produits ajoutés, lorsqu'il existe et s'ils ne sont pas dégradés, pourra contribuer au développement de la vie dans le plan d'eau.

Ce mode de **traitement** est **actuellement en cours sur le site d'AVENSAN** et il est proposé par la société SOPROMAT. Il semble donner des résultats satisfaisants et une analyse de l'impact sur l'environnement de chaque produit proposé est mise à disposition par la société prestataire de services sous forme de fiches de sécurité.

5.1.1.1.9) SYNTHÈSE

La liste des coagulants-floculants présentée dans cette étude est loin d'être exhaustive. Il s'agit des produits les plus utilisés ou ayant fait l'objet de tests.

Aux dires des spécialistes, **il existe des centaines de produits**. Chacun présente des avantages et des inconvénients, que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou technique.

L'objectif de cette partie n'est pas de déterminer quels sont les produits les plus efficaces, mais simplement de proposer des exemples.

PRODUITS	AVANTAGES	INCONVENIENTS
CARBONATE DE CALCIUM	Minéralisation : Ca^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^-	Augmentation du pH
CaCO_3	Essai à la craie de champagne par l'IEEB donne de bons résultats	
CHAUX ETEINTE	Minéralisation : Ca^{2+}	
Ca(OH)_2	Pas de modification du pH	
	Essai par l'IEEB donne de bons résultats	
GYPSE	Minéralisation : Ca^{2+} , SO_4^{2-}	
$\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	Pas de modification du pH	
	Essai par la Société BPB FORULA donne de bons résultats	
CHAUX ETEINTE + GYPSE	Minéralisation : Ca^{2+} , SO_4^{2-}	
	Pas de modification du pH	
	Minéralisation : Ca^{2+} , SO_4^{2-}	
PYRITE	Minéralisation : Fe^{3+} , SO_4^{2-} , H^+	Diminution du pH
FeS_2		Libération de fer dans le milieu naturel
SULFATE D'ALUMINE	Minéralisation : SO_4^{2-} , Al^{3+}	Libération d'aluminium dans le milieu naturel
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Produit utilisé dans les stations d'épuration	
CHLORURE FERRIQUE	Minéralisation : Cl^- , Fe^{3+}	Libération de fer dans le milieu naturel
FeCl_3	Produit utilisé dans les stations d'épuration	
COAGULANTS ORGANIQUES	Pas d'impact sur l'environnement	
	Traitement par la Société SOPROMAT donne de bons résultats	

Figure 24 : tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des coagulants-floculants présentés dans l'étude

5.1.1.2) LIEUX DE TRAITEMENT

5.1.1.2.1) TRAITEMENT SUR LE PLAN D'EAU

Un traitement basique, à la chaux par exemple, qui consiste à disperser le coagulant-floculant en surface du plan d'eau, peut donner des résultats satisfaisants pour la décantation des MES.

Néanmoins, qu'en est-il de la dose à utiliser et des pertes engendrées du fait de la méconnaissance exacte de l'hydrodynamisme d'un plan d'eau de plusieurs hectares ?

Qu'en est-il de la pérennité de la décantation dans la mesure où les boues sont soumises à l'hydrodynamisme irrégulier, et parfois très important, du plan d'eau du fait du vent, de l'écoulement et du battement de la nappe ?

Imaginons même le cas fortement favorable où les argiles ne sont pas remises en suspension après un laps de temps plus ou moins long. Les argiles décantées ne risquent-elles pas de colmater, même partiellement, le fond et les berges du plan d'eau ? Cela aurait non seulement pour conséquence de bouleverser l'hydrodynamisme de la nappe sur plusieurs hectares, mais également d'isoler hydrodynamiquement les eaux du lac qui peu à peu s'eutrophiseraient.

L'ensemble de ces problèmes nous amène à penser qu'**il est plus sage de créer un bassin de traitement des eaux distinct du plan d'eau turbide.**

5.1.1.2.2) TRAITEMENT DANS UN PETIT BASSIN

5.1.1.2.2.1) AVANTAGES D'UN BASSIN DE TRAITEMENT DES EAUX

Ce type de bassin serait de taille bien inférieure à celle des plans d'eau turbides voués au réaménagement et à la valorisation du site exploité. De ce fait, il serait **plus facile de connaître ses caractéristiques** (hydrodynamisme, répartition des dépôts liés à la décantation, évolution de la profondeur liée au dépôt, physico-chimie de l'eau...).

Du fait de sa petite taille, les particules seront concentrées et s'accumuleront sur de faibles distances. Le **curage éventuel des boues** (pour valoriser les boues ou pour s'assurer que les particules ne soient pas remises en suspension) sera donc **facilité** par la taille de la zone à curer.

Elle permettra également d'envisager plus simplement et à moindre coût :

- **l'enherbement** pour stabiliser les berges, favoriser la sédimentation et permettre le développement rapide de la vie aquatique,
- la **plantation d'arbres** pour stabiliser les berges et limiter au maximum l'action hydrodynamique du vent sur l'eau,
- la **surveillance** et **l'entretien** du plan d'eau.

Enfin il est recommandé de prévoir l'imperméabilisation de ce petit bassin (voir méthode partie 5.1.1.2.2.2). Cette opération permettrait en effet de **s'assurer de la non contamination de la nappe phréatique** par les substances introduites. D'autre part, cela permettrait de **ne pas avoir de perte de coagulant-floculant dans la nappe** du fait de son écoulement continu.

Notons que l'hydrodynamisme de la nappe risque d'être légèrement modifié par la création de ce bassin étanche. Mais le même phénomène se produira, et sur une plus grande distance, si les argiles sédimentent dans le grand plan d'eau turbide. Ceci aurait en effet pour conséquence de le colmater partiellement voire totalement.

5.1.1.2.2.2) DIMENSIONNEMENT ET PROPRIETES DU BASSIN

DIMENSIONNEMENT DU BASSIN

Rien ne s'oppose au surdimensionnement du bassin pour obtenir un traitement efficace. Il doit toutefois être limité pour des raisons économiques.

Paramètres qui influent sur le dimensionnement du bassin

La superficie et la profondeur du bassin dépendent essentiellement de la **taille des particules** que l'on souhaite éliminer et du **débit d'entrée des eaux turbides dans le bassin**. Le **volume de boue** qui est susceptible de se déposer sur le fond du bassin doit également être pris en compte.

Plus une particule est grosse, lourde et dense, plus elle est susceptible de sédimenter rapidement. C'est la raison pour laquelle la coagulation-floculation permet une sédimentation rapide des argiles fines dans un bassin de décantation relativement petit.

Plus le débit d'entrée d'eaux turbides dans le bassin est important, plus il faudra prévoir un bassin étendu afin de permettre aux particules, même grosses, de sédimenter. En effet, il faut d'une part penser qu'un débit puissant ne permettra pas de décantation sur le volume d'eau dont le régime sera turbulent. D'autre part, même si la chute des particules floculées est relativement rapide, il faut leur laisser le temps de tomber jusqu'au fond. Ceci implique un temps minimal de séjour des particules qu'il est nécessaire de calculer.

Plus le volume des MES dans le plan d'eau est important, plus le bassin devra être grand et profond pour permettre leur accumulation.

Exemple de dimensionnement

En ce qui concerne la taille des particules floculées, M. IGONIN de la société SOPROMAT estime qu'elle est en moyenne égale à 500 μm en utilisant des coagulants organiques.

En ce qui concerne le débit d'entrée des eaux turbides, plus il est fort et plus le traitement sera rapide. On peut estimer qu'un débit de 1000 m^3/h sera suffisant et raisonnable dans cette optique.

Pour une taille des particules de 500 μm et pour un débit de 1000 m^3/h , la formule de Stokes donne une vitesse de sédimentation de 150 mm/s et une surface du bassin de décantation théorique (sans tenir compte de la turbulence générée par le débit) de 2 m^2 . Il est évident que cette surface n'est pas suffisante pour accumuler les boues ni pour laisser aux particules un temps de séjour suffisant pour atteindre le fond du bassin.

Dans un tel cas, on voit bien que le facteur principal qui va jouer sur le dimensionnement du bassin, ce sera la quantité de boue qui sera créée. **Il est nécessaire de prévoir en effet un bassin suffisamment grand pour accumuler toutes les MES qui vont sédimenter ainsi que les produits ajoutés et l'eau piégée.**

Il convient donc de calculer en premier lieu le volume des MES du plan d'eau qui est égal à :

$$\boxed{\text{Volume MES} = (\text{Concentration MES} * \text{Volume du plan d'eau}) / \text{densité des MES}}$$

Prenons l'**exemple du site d'AVENSAN** (pour lequel on a le plus de renseignements). Connaissant la concentration initiale en MES, le volume du plan d'eau, et la densité des MES (qui sont en majorité des halloysites), on obtient :

$$\text{Volume MES} = (1 * 456\,000) / 2100 = \mathbf{217\,m^3}$$

Le volume du bassin doit tenir compte de ce volume des MES, mais il doit également tenir compte du volume des produits ajoutés et de l'eau piégée. Notons que le volume des MES sera le principal volume dont il faudra tenir compte. Il est bien évident que le dépôt progressif des MES modifiera les propriétés dynamiques du bassin et il faut prévoir son dimensionnement pour qu'il puisse permettre la décantation sur toute la durée de l'opération.

Pour ce site, une surface de bassin de **500 m²** et une profondeur moyenne de 2 m pourrait par exemple convenir aux 217 m³ minimum exigés et à la zone du bassin où le régime de l'eau est rendu turbulent par le débit d'entrée. Le volume de ce bassin sera de 1000 m³ et le temps de séjour de l'eau sera environ d'une heure. Or la vitesse de sédimentation des particules de 500 µm étant de 150 mm/s, il leur faudra théoriquement moins de 15 s pour atteindre le fond du bassin.

Le bassin proposé serait donc certes surdimensionné, mais le seul inconvénient induit serait le surcoût de création du bassin. Si ce coût est estimé comme étant raisonnable, il apparaît préférable de créer un grand bassin. En effet, plus ce bassin est grand, plus les particules fines auront le temps de sédimenter.

PROPRIETES DU BASSIN

Végétation autour du bassin

Le vent peut créer des vagues (phénomène de batillage) qui viennent battre les digues et sont susceptibles d'entraîner leur dégradation rapide. Ce phénomène peut être la source d'un apport permanent de fines dans les plans d'eau.

Pour les lacs de faible superficie, on peut admettre que la **végétation naturelle** suffit à stabiliser les talus à condition toutefois que le matériau constitutif des digues ne soit pas trop sableux. Cette végétation devra être en place, si possible, avant la mise en eau des bassins. De bons résultats peuvent être obtenus dans des conditions économiques acceptables par l'emploi de **gazon en rouleaux** par exemple.

La plantation d'**arbres**, ou l'implantation du bassin au milieu d'arbres existants, permettrait de limiter voire d'éliminer l'action hydrodynamique du vent sur le plan d'eau. S'il apparaît difficile de mettre en place ce type de protection, de par les conditions environnementales, les coûts ou les délais, **des talus élevés** ou tout autre obstacle au vent pourraient convenir.

Etanchéité du bassin

Lorsque l'étanchéité des bassins est mal réalisée, deux problèmes peuvent se poser :

- le mauvais remplissage du bassin et donc le mauvais fonctionnement de la décantation,
- la contamination de la nappe phréatique par entraînement des produits utilisés.

Le choix du site d'implantation du bassin est très important. En effet, les sols en place doivent être suffisamment étanches et faciles à compacter. Si la perméabilité du terrain est trop forte, des travaux d'étanchéité doivent être réalisés. L'économie du projet peut alors être remise en cause.

Si le terrain naturel est trop perméable même après compactage, il faut apporter une solution extérieure (**tapis en argile compactée** ou **géomembrane** par exemple).

On rencontrera assez fréquemment des terrains humides ou une nappe à faible profondeur. Pour que les engins puissent circuler et le compactage se faire dans des conditions acceptables, il faudrait certainement prévoir de drainer le chantier. Un rabattement de la nappe par des canaux drainants en début de chantier pourrait s'avérer utile.

Pour le compactage des terres, le type d'engin à utiliser dépend de la nature de la formation à compacter.

Colmatage : il faut tenir compte du pouvoir colmatant des eaux dû aux matières colloïdales en suspension. L'expérience montre que les matières qui se déposent au fond des bassins en accroissent l'étanchéité.

Les dépôts jeunes (d'âge inférieur à 2 ans environ) sont très fluides et très perméables. Ils ne peuvent donc en aucun cas participer à l'étanchéité du fond d'un bassin.

En outre, le colmatage ne peut en aucun cas être considéré comme une solution pour l'étanchéité d'un fond de bassin de décantation. Ce phénomène est très lent, difficile à prévoir, d'effet limité et susceptible d'être remis en cause par des processus de décolmatage.

Il est donc indispensable de concevoir des bassins présentant une étanchéité suffisante dès le départ. Le dépôt des MES viendra en plus pour augmenter l'étanchéité du bassin.

Décolmatage : les effets du colmatage peuvent très souvent être annulés par apparition d'un décolmatage. Celui-ci risque de se produire par fluctuation du niveau de la nappe phréatique (effet de sous-pressions), lors du curage ou de la vidange du bassin.

Forme du bassin

La forme des bassins doit être aussi régulière que possible. En effet, les angles des bassins sont le siège d'une accumulation préférentielle de sédiments. Une épaisseur trop importante de dépôts modifie le temps de séjour des effluents et perturbe donc le fonctionnement du bassin.

De plus, il faut éviter que se produisent des cheminements d'eau préférentiels et des courts-circuits. Les emplacements d'entrée et de sortie des effluents doivent être choisis en conséquence (éviter les formes trop allongées, ne pas situer la sortie trop près de l'entrée...).

Il semble qu'une **forme triangulaire** constitue un bon compromis pour la forme du bassin. L'entrée de l'eau dans un angle du triangle permet de favoriser la coagulation dans la mesure où la vitesse est importante (le mélange peut se produire) et le temps de séjour des particules relativement court. Puis l'eau arrive dans un espace plus large offrant un temps de séjour plus long et une vitesse d'écoulement plus faible. La décantation est favorisée dans cet espace, et principalement dans l'angle où il n'y a ni entrée ni sortie d'eau.

Il semblerait raisonnable de prévoir un **approfondissement de ce bassin, de l'entrée vers la sortie**, afin de conserver la surface disponible nécessaire pour la décantation lorsque les particules s'accumulent les unes sur les autres dans le fond.

Entretien du bassin

Les **pent**es des talus doivent être douces, si possible comprises entre 2,5/1 et 5/1. En effet, des pentes telles que 1/1, par exemple, entraînent des problèmes de tenue des digues à long terme. D'autre part, la **végétation doit si possible être maintenue pour la protection des berges**.

Notons qu'il peut s'avérer nécessaire de prévoir une **rampe d'accès au fond des bassins** pour des engins de **curage**.

Il peut s'avérer utile de ceinturer le bassin par des **fossés détournant les écoulements pluviaux** pour éviter l'érosion des talus.

L'entretien des digues portera essentiellement sur la maîtrise de la végétation et la **lutte contre les rongeurs éventuels**.

Notons que le curage partiel d'un bassin n'implique pas nécessairement sa vidange et peut par exemple se réaliser par des équipements couramment utilisés en agriculture (**pompe à lisier**).

Dépôt des MES dans le bassin

L'épaisseur des sédiments déposés dépend de plusieurs paramètres :

- le **débit** et la **teneur en MES** des effluents à l'entrée du bassin,
- la **forme des bassins**,
- l'**environnement** du bassin (arbres...).

5.1.1.3) PROCEDE DE TRAITEMENT ENVISAGEABLE

Le coagulant-floculant à utiliser ainsi que son dosage sont l'affaire de spécialistes et nécessitent des tests en laboratoire propres à chaque site.

Le procédé d'utilisation de ces coagulants-floculants peut en revanche être généralisé. Il repose sur le contrôle de l'influence des principaux paramètres sur les MES.

Ainsi par exemple, la mise en place d'un **coupe-vent** autour d'un bassin de traitement de petite taille permettra de réduire fortement l'hydrodynamisme. Quant à l'**hydrodynamisme** généré dans le bassin par le débit d'entrée d'eau turbide à traiter, il peut être diminué si l'on a un jet d'eau ou si une buse se déverse (une grande partie de l'énergie cinétique se dissiperait verticalement lors du contact avec le bassin).

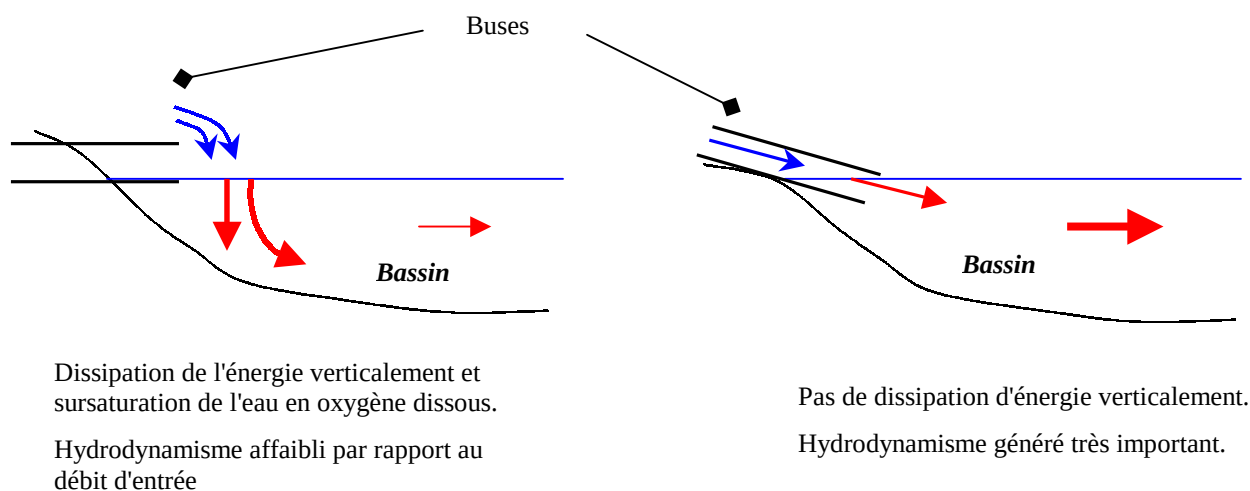


Figure 25 : schéma de l'arrivée des eaux turbides dans le bassin de traitement

Le **dimensionnement du bassin** dépendra de la taille des floccs et du débit d'entrée dans le bassin (voir partie 5.1.1.2.2.2). Les avantages de traiter dans un petit bassin sont explicités dans la partie 5.1.1.2.2.1.

Le fait de prévoir des **berges à 5/1** et de les **enherber** permettrait de limiter l'apport de fines dans le bassin par ruissellement ou par érosion des berges.

L'arrivée d'eau turbide sous forme de jet ou par chute permettrait également de **sursaturer l'eau en oxygène dissous**, ce qui constituerait un paramètre favorable. En effet, cela permettrait de favoriser la précipitation de la matière organique et ainsi d'améliorer le rendement des coagulants-floculants.

L'utilisation d'un **coagulant-floculant** permettrait de minéraliser l'eau et de favoriser la chute des fines agglomérées.

La période durant laquelle le traitement est réalisé est également importante. Le fait de réaliser ce traitement durant les **périodes chaudes** permettrait d'accélérer la vitesse théorique de chute des particules selon la loi de Stokes (voir partie 3.2.2).

Concernant les techniques pour véhiculer l'eau, il semble plus judicieux de ne prévoir qu'une pompe par soucis d'économie d'énergie et donc d'argent. On peut ainsi prévoir d'utiliser cette **pompe en entrée du bassin** dans laquelle les coagulants-floculants seront injectés. **Une buse de débordement** peut ensuite permettre le retour de l'eau claire dans le plan d'eau sans utilisation d'énergie. Ce déversement permet également de réguler la hauteur d'eau dans le bassin et donc le débit de sortie de manière naturelle.

Le schéma ci-contre permet de visualiser ce type de procédé.

5.1.2) TRAITEMENT DES MES PAR UNE EAU FORTEMENT MINERALISEE ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL

L'estuaire de la Gironde est un bel exemple du rôle positif de la salinité d'une eau sur la sédimentation des particules fines (voir partie 2.3.2).

Cet exemple naturel laisse entrevoir la possibilité de décanter les eaux turbides en introduisant comme "coagulant-floculant" de l'eau salée que l'on trouve aisément à proximité de la côte ou de l'estuaire. Rappelons que les eaux profondes sont également fortement minéralisées et pourraient, si les conditions économiques sont raisonnables, présenter des propriétés de coagulation-floculation intéressantes.

Il serait cependant indispensable de **réaliser des tests au préalable** au laboratoire afin de connaître les quantités d'eau minéralisée à introduire pour permettre une clarification satisfaisante. Ces tests permettraient également de connaître l'influence des sels en solution ainsi que leur impact éventuel sur l'environnement.

Il va de soit que cette méthode, pour le moment hypothétique, risque de présenter certaines limites vis-à-vis de la **réglementation**. Il faudra s'assurer que la quantité d'eau minéralisée ajoutée sera telle qu'elle n'impliquera pas une concentration excessive en certains cations, anions voire métaux lourds si l'eau utilisée s'avère chargée.

L'idéal serait de prévoir un apport régulier de l'eau minéralisée. On pourrait par exemple imaginer le même procédé de traitement que précédemment en injectant l'eau salée au niveau de la pompe dans un petit bassin imperméabilisé.

Cette méthode rejoint donc la première (partie 5.1.1).

Son avantage c'est qu'il n'est pas nécessaire d'acheter des produits de traitement.

Ses inconvénients sont de trois ordres :

- l'approvisionnement en eau naturellement salée peut revenir cher et rendre cette méthode économiquement peu intéressante,
- la composition chimique de l'eau est imposée et doit convenir dans sa nature et dans sa concentration aux MES du plan d'eau à traiter,
- l'exploitant devra obtenir une autorisation.

On considèrera donc cette **méthode** comme **potentiellement réalisable mais techniquement, réglementairement et économiquement peu voire pas intéressante**.

5.1.3) TRAITEMENT DES MES PAR FLOTTATION ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL

Ce procédé consiste à insuffler un gaz, par exemple de l'oxygène, dans le plan d'eau turbide. Les bulles se fixent à la surface des particules et abaissent leur densité. On pourrait ainsi récupérer les suspensions légères et peu denses en surface en les raclant.

Afin de minimiser le coût du système d'injection d'air, on peut prévoir comme précédemment d'utiliser cette méthode dans un petit bassin. Ce dernier ne nécessiterait pas d'être étanchéifié dans la mesure où la gaz injecté, souvent de l'oxygène, sera piégé avec les sédiments et ne risquera pas de contaminer le milieu naturel.

La difficulté de l'opération sera technique, dans la mesure où il faudra récupérer les particules en surface avant qu'elles ne soient éventuellement renvoyées vers le plan d'eau via la sortie du bassin.

Si l'on réussit à mettre au point un système de récupération simple et efficace, à un débit suffisant pour traiter le plan d'eau dans des délais raisonnables, alors les **avantages** seront les suivants :

- aucun risque de contamination du milieu naturel,
- récupération de MES presque pures (seules des molécules d'oxygène seront ajoutées). Ce point peut être intéressant dans l'optique éventuelle de la valorisation des argiles récupérées ;
- outre son étanchéification inutile, la forme et la profondeur du bassin, de même que les abris au vent, ne s'avéreront plus indispensables dans la mesure où les particules doivent flotter et non plus sédimenter.

Ce type de procédé est utilisé avec succès dans les stations d'épuration. Il serait intéressant de **réaliser des tests afin de voir l'efficacité de cette méthode.**

Aux dires de certains spécialistes, la méthode risque d'être délicate à mettre en place car elle nécessiterait de nombreux essais du fait que les particules doivent atteindre une densité inférieure à 1. Ces essais seraient certainement coûteux et pas nécessairement concluants.

Des informations plus précises passent donc par des sociétés spécialistes qui engageraient une étude spécifique. Cette méthode n'est certes pas à exclure définitivement, mais s'avère pour l'heure délicate à mettre en place pour éliminer des argiles fines dont la densité moyenne est proche de 2.

5.1.4) TRAITEMENT DES MES PAR FILTRATION ET EVAPORATION - IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL

5.1.4.1) PRINCIPES DE LA METHODE

Il s'agit d'une méthode complètement différente des trois premières, dans la mesure où la création d'un petit bassin n'apparaît pas nécessaire. On pourrait donc éventuellement envisager de l'utiliser en parallèle à la première afin d'accélérer le processus de clarification des eaux turbides.

Cette méthode s'appuie sur le fait que les particules contenues dans un liquide peuvent être retenues dans une **formation perméable, dont le diamètre des pores détermine le seuil de filtration**. Plus les pores seront petits, plus les particules retenues pourront être fines mais plus le colmatage de la formation filtre sera rapide.

L'idée serait de **rejeter l'eau turbide sur le sol** aux alentours du plan d'eau problématique. On pourrait imaginer par exemple **un grand terrain enherbé** sur lequel viendrait s'évaporer la fine pellicule d'eau rejetée par un système de pompes. Une fine couche d'argile, sans impuretés dues aux coagulants-floculants, pourrait alors se déposer et être plus facilement valorisée.

Quant à l'eau qui percolerait dans les formations perméables, il est vraisemblable qu'elle rejoindra la nappe phréatique en étant relativement bien filtrée dans les formations sub-affleurantes.

Le débit d'eau turbide pompée et rejetée serait à déterminer en fonction :

- du climat et notamment de l'évaporation potentielle,
- de la perméabilité des formations superficielles,
- de la transmissivité de l'aquifère.

Les **avantages** de cette méthode, dont les principes théoriques sont connus mais qui n'ont pour l'heure fait l'objet de tests in situ à notre connaissance, sont les suivants :

- pas d'utilisation de produits ni de gaz et donc pas de risques sur le milieu naturel,
- pas de création d'un petit bassin,
- possibilité de traiter sur de grandes étendues et donc d'accélérer la vitesse de clarification du plan d'eau.

Si certains avantages économiques semblent indiscutables, quelques **inconvénients** apparaissent toutefois :

- la formation d'une croûte argileuse à la surface des zones de traitement risque de les imperméabiliser et il faudra certainement prévoir de curer régulièrement les boues séchées,
- le débit de la pompe (ou des pompes) devra être réglé de manière à ce que toute l'eau projetée s'évapore ou s'infiltre. Autrement dit, il faut s'assurer que cette méthode est intéressante d'un point de vue des délais de traitement.

- l'infiltration des eaux risque de lessiver les terrains superficiels et notamment les sols. Il faudra donc s'assurer que cette méthode ne conduira pas à la contamination de la nappe phréatique en lessivant de la matière organique ou du fer par exemple.

Notons que le **coût de fonctionnement des pompes** est la principale contrainte économique à prendre en compte dans cette méthode.

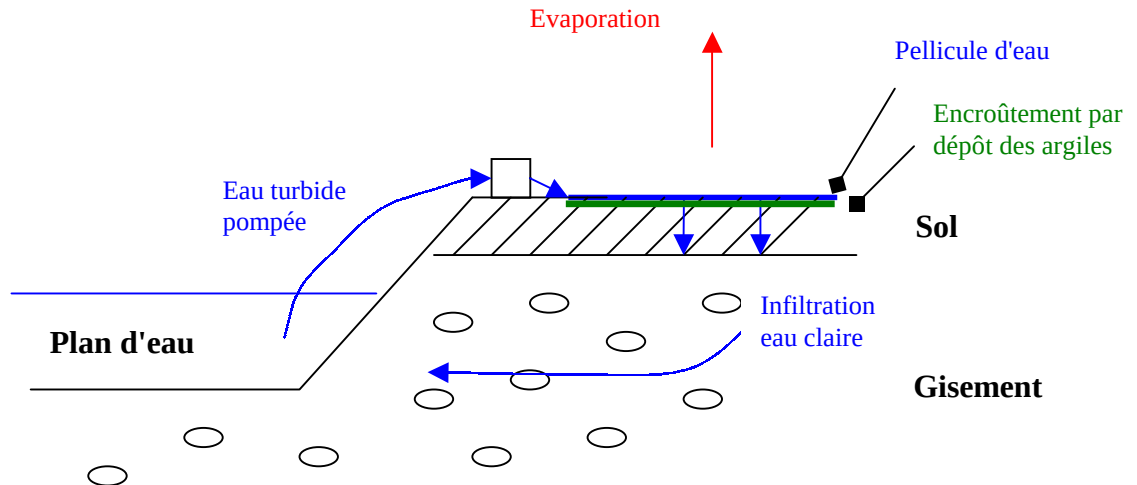


Figure 27 : coupe schématique du procédé de traitement par filtration-évaporation

5.1.4.2) ESSAI REALISE AU LABORATOIRE PAR L'IEEB

Protocole simplifié de l'essai

Une modélisation du phénomène de percolation-filtration a été réalisée au laboratoire par l'IEEB en février-mars 2002.

Cet essai a consisté à faire circuler une eau, **enrichie en particules fines**, à travers une formation sableuse ayant une perméabilité de $4,73.10^{-4}$ m/s.

Résultats de l'essai

Les résultats montrent que l'eau en sortie de la formation sableuse a retrouvé sa clarté originelle. Cela signifie que les particules fines ont été piégées dans la formation sableuse.

D'autre part, on constate en sortie une chute rapide du débit. Ce phénomène est dû au fait que les particules fines se sont déposées dans les pores de la formation sableuse et que cette dernière s'est progressivement colmatée. Un carottage de la formation sableuse a montré que le colmatage s'est fait dès le premier centimètre de sable.

Conclusions de l'essai

La première conclusion c'est que **le principe de filtration est efficace dans une formation sableuse**. L'idée de transposer cet essai in situ sur plusieurs ha peut donc apparaître intéressante.

La deuxième conclusion, c'est que même **un sol fin peut suffire à filtrer l'eau turbide**. La méthode serait donc réalisable dès lors que la nappe phréatique ne serait pas mise à nu.

Notons enfin que le colmatage de la formation filtre risque de diminuer rapidement la rapidité du traitement. Il faudra donc envisager de **curer régulièrement les premiers centimètres de matériaux déposés**.

5.1.4.3) PROCEDE DE TRAITEMENT ENVISAGEABLE

Un traitement envisageable serait de profiter du contexte environnemental que propose le site problématique vis à vis des MES.

Il s'agirait de filtrer les eaux turbides à travers les premiers centimètres d'un sol enherbé et relativement perméable.

Notons que la limite de ce procédé correspond essentiellement à :

- la vitesse d'infiltration des eaux depuis la surface jusqu'à la formation réservoir,
- l'espace favorable disponible pour épandre les eaux.

La vitesse d'infiltration des eaux dans le sol ne dépend pas uniquement de la nature du matériau filtrant, si ce dernier n'est pas en contact direct avec la formation réservoir. En effet, il est possible qu'un niveau très peu perméable (exemple des argiles, des marnes ou de l'altos) s'intercale entre les deux. Dans ce cas, il empêchera l'eau de s'infiltrer rapidement. De ce fait, il faudra réguler le débit de traitement de l'eau pour ne pas inonder les abords du site.

Il faut donc chercher à connaître la perméabilité la plus faible entre la surface et l'aquifère. De ce fait, on peut en déduire le débit théorique d'infiltration des eaux pompées.

Notons que ces débits sont les débits d'infiltration maximums dans la mesure où le dépôt des argiles va imperméabiliser progressivement le milieu (*voir figure 28 ci-contre*).

Il serait intéressant de faire des tests in situ pour connaître l'évolution de la perméabilité des sols en fonction de l'avancement du traitement de filtration et de l'évaporation. De ce fait, on pourrait réguler le débit des pompes et curer régulièrement les sols de manière optimale.

Il faudra également ajouter à ce débit calculé la quantité d'eau évaporée par heure et par ha. Cette **évaporation potentielle** varie en fonction du climat. A CABANAC, par exemple, cette évaporation est d'environ 806 mm par an, soit environ **0,9 m³/h/ha** (650 m³/mois/ha en moyenne). Il semble que ce débit soit négligeable par rapport au traitement par filtration.

Nous voyons bien qu'outre la perméabilité des formations superficielles, **la surface sur laquelle le traitement est réalisé est importante**. Ainsi il sera nécessaire de calculer quelle est la surface optimale utilisable afin de clarifier rapidement le plan d'eau sans toutefois mettre en oeuvre des moyens logistiques trop importants (nombre de curage et nombre de pompes).

Le *schéma ci-contre* présente une vue de dessus de ce que représenterait ce type de traitement.

5.1.5) COMPARAISON DES TRAITEMENTS ENVISAGEABLES

Les recherches menées par les Sociétés et Laboratoires rencontrés et la synthèse bibliographique effectuée nous ont permis de proposer quatre méthodes de traitement envisageables pour éliminer les MES argileuses des plans d'eau.

Ces quatre méthodes présentent des avantages et des inconvénients différents. De ce fait, les exploitants pourront choisir la méthode la plus adaptée vis-à-vis de leurs préoccupations premières.

Il apparaît toutefois, de manière objective, que certaines méthodes sont moins connues que d'autres et de ce fait moins préconisées à l'heure actuelle par les spécialistes. Cela ne signifie pas forcément qu'elles seraient moins efficaces, mais des essais seraient évidemment à prévoir, ce qui aura un coût et repousserait les délais de traitement.

De ce fait, il semblerait plus judicieux de traiter les plans d'eau turbides avec une, voire deux méthodes dont les principes sont aujourd'hui relativement bien maîtrisés.

Le tableau ci-contre récapitule les principales données des quatre traitements envisageables. Ils sont classés de haut en bas de manière subjective tels qu'ils apparaissent être aujourd'hui le plus avantageux possible.

Ainsi la **coagulation-floculation**, bien que présentant un coût de traitement élevé, semble être la méthode la plus efficace maîtrisée et sans impact sur l'environnement si les produits et les dosages sont adaptés.

La **filtration** serait également une méthode efficace, sans utilisation de produits, mais qui nécessiterait des essais in situ et un suivi régulier.

L'**eau minéralisée** (ou eau salée) pourrait s'avérer économiquement rentable si le site se trouve à proximité d'un approvisionnement naturel (océan, estuaire ou forage profond). L'impact sur l'environnement de cette eau serait alors à étudier particulièrement, du fait de la concentration élevée en certains éléments.

La **flottation** a fait ses preuves dans les stations d'épuration. Mais la difficulté dans le cas des MES argileuses serait d'abaisser la densité des particules de 2 à moins de 1.

5.2) DEBOUCHES ENVISAGEABLES POUR LES BOUES

Les boues obtenues après traitement seront constituées des MES originelles, mais également des produits ajoutés et d'eau engorgée.

Ces boues, suivant leur composition, pourront éventuellement être valorisées. Une analyse visant à identifier les argiles présentes s'avérera donc indispensable à partir d'un échantillonnage représentatif.

S'il s'avère que la récupération de ces boues n'est pas économiquement intéressante, il faudra simplement s'assurer qu'elles ne sont pas remises dans l'eau. Pour ce, il faudra les recouvrir de matériaux imperméables ou les extraire et les stocker hors eau. L'enherbement du bassin asséché peut éventuellement suffire.

Si au contraire un débouché économique peut être raisonnablement envisagé, la récupération des boues peut s'avérer intéressante. Pour le débouché de ces boues, il faut s'assurer que le minéral que l'on souhaite revendre est le plus pur possible. Le traitement utilisé au préalable doit avoir été choisi en fonction de cette contrainte et du prix de revient par rapport au prix du marché.

L'halloysite, par exemple, est une argile rare dont on trouve des gisements en DORDOGNE et dans le Périgord. Le premier producteur mondial d'halloysite est la NOUVELLE-ZÉLANDE : 25 000 tonnes par an.

Les propriétés de cette argile, la plus blanche qui soit, plastique, très pure et à haute résistance pyrométrique, permettent son utilisation dans plusieurs secteurs, à savoir :

- élément constitutif de la pâte qui permet de fabriquer la **porcelaine** (exemple : la porcelaine de LIMOGENES);
- élément support de la **catalyse dans l'industrie de raffinage du pétrole** dans certains pays,
- élément constitutif des **sols de prédilection pour la culture des bananiers** (sol brun-rouille à halloysite).

Dans la mesure où la revente des argiles entre dans un registre commercial, aucune négociation n'a été entreprise de notre part pour connaître la valorisation potentielle. L'exploitant devra donc entreprendre de telles démarches de manière indépendante.

Pour information, il semblerait que l'entreprise KPCL soit potentiellement intéressée ou du moins compétente dans le domaine de la valorisation de l'halloysite. Cette entreprise est basée à LIMOGENES et formule des composés pour fabriquer des produits de céramiques.

5.3) RECOMMANDATIONS LORSQUE L'ON SOUHAITE TRAITER UN PLAN D'EAU TURBIDE

L'extraction de matériaux en eau implique toujours la mise en suspension de particules plus ou moins fines. Dans la plupart des cas, ces dernières seront suffisamment lourdes pour sédimenter seules et clarifier l'eau en respectant la réglementation (MES < 35 mg/L). Mais il peut arriver qu'une partie non négligeable des fines soient très légères et relativement stables en suspension. Le plan d'eau reste de ce fait turbide et sa décantation ne se fait pas ou très lentement.

5.3.1) IDENTIFICATION DE LA NATURE ET DE LA CONCENTRATION DES MES DANS LE PLAN D'EAU

Une analyse simple dans un laboratoire permet de déterminer rapidement si les **MES** sont **organiques ou minérales et dans quelles proportions**. L'IEEB (Institut Européen de l'Environnement de Bordeaux) réalise par exemple cette analyse pour un montant de 23,16 euros HT, prix en mai 2002.

Le traitement des MES organiques est relativement simple et un laboratoire compétent en la matière proposera des traitements rapides à des coûts raisonnables.

Le traitement des MES minérales est beaucoup plus délicat. C'est ce dernier qui fait véritablement l'objet de ce rapport. La détermination de la famille des argiles en suspension et de la taille des particules est aujourd'hui l'affaire de spécialistes.

L'école des Mines d'Alès réalise par exemple ce type d'analyse. La détermination de la nature des argiles en suspension d'une eau a un coût de 300 euros HT, de 240 euros HT si l'échantillon est envoyé déjà étuvé. La détermination de la granulométrie des argiles est facturée 100 euros HT si l'échantillon est envoyé déjà étuvé. Ces prix étaient proposés en mai 2002.

5.3.2) DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX TURBIDES

L'étude bibliographique de ce rapport a montré l'importance de l'influence des facteurs physico-chimiques sur la décantation naturelle des plans d'eau ainsi que sur les traitements basés sur l'ajout de produits dans ces mêmes plans d'eau.

Il est donc fortement recommandé de faire un bilan initial des propriétés physico-chimiques du plan d'eau turbide considéré. Les facteurs essentiels à analyser et le coût d'analyse proposé par l'IEEB en mai 2002 sont les suivants :

- pH	3,31 euros HT
- Conductivité	3,31 euros HT
- Oxygène dissous	11,75 euros HT

- MES	23,16 euros HT
- Turbidité	3,31 euros HT
- Cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} et K^{+})	15,05 euros HT par élément
- Sulfate (SO_4^{2-})	7,33 euros HT
- Bicarbonate (HCO_3^{-})	3,70 euros HT
- Fer	15,05 euros HT
- Aluminium	24,07 euros HT
<u>TOTAL</u>	155,19 euros HT

Ces prix ont été fixés par arrêté du 21 décembre 1992 du Ministère de la Santé.

La connaissance de cet état initial de l'eau permettra de savoir qu'elles peuvent être les orientations de traitement les plus favorables et de réaliser le cas échéant des tests judicieux en laboratoire ou in situ. **Le suivi de ces paramètres au cours du traitement ou après traitement permettra de connaître les influences exactes de ce dernier sur le milieu naturel.**

Ces résultats permettront également de savoir quelles peuvent être les réelles conséquences d'un éventuel débordement du plan d'eau turbide dans le réseau hydrographique par exemple.

Ces analyses permettront également de rassurer les élus, la population et l'administration sur l'origine de l'opalescence d'un plan d'eau. Elles démontreront que la nature du problème n'est pas physico-chimique et donc non liée à une éventuelle pollution, mais bel et bien en relation avec l'exploitation de la carrière et la mise en suspension de fines très légères.

5.3.3) EVITER D'AUGMENTER LA CONCENTRATION DES MES DANS LE PLAN D'EAU

Avant d'envisager le moindre traitement, il faut s'assurer que l'origine des fines est identifiée et que ces dernières ne viennent plus contaminer le plan d'eau.

Si l'origine des MES argileuses est identifiée dans le gisement exploité, on comprend bien qu'il faudra éviter que ce dernier puisse s'éroder régulièrement et libérer des fines dans le plan d'eau. Pour ce, des **berges aux pentes faibles et végétalisées** devraient permettre de maintenir les matériaux en place.

Si les eaux de lavage sont rejetées dans le plan d'eau ou si le bassin de décantation se déverse dans le plan d'eau (ce qui est discutable sur le plan réglementaire), il faudra **créer un bassin de décantation isolé** dans le premier cas et isoler le bassin dans le deuxième cas.

Il est bien entendu fortement déconseillé d'utiliser les matériaux du gisement ou encore les matériaux de la découverte pour les remettre dans le plan d'eau afin de taluter les berges par exemple. Dans le premier cas on risque de mettre des nouvelles fines en suspension. Dans le deuxième cas, on risque de mettre en suspension de la matière organique qui va limiter un peu plus la décantation naturelle et ralentir les réactions de coagulation-floculation des particules argileuses.

5.3.4) REALISATION DE TESTS SIMPLES

➤ Un test simple peut permettre de déterminer si le maintien des argiles en suspension est essentiellement dû à l'hydrodynamisme du plan d'eau. Ce même test permet de savoir quelle serait le délai de décantation de l'eau si cet hydrodynamisme était nul.

Il consiste à mettre de l'eau turbide dans une **bouteille non bouchonnée et à l'abri de la lumière** tant que possible (afin d'éviter le développement de plancton par exemple). Il suffit de ne plus toucher cette bouteille et de regarder régulièrement si l'eau décante, et si oui, à quelle vitesse.

Si la décantation est presque totale en quelques jours, on peut en déduire que l'hydrodynamisme est l'agent principal de non sédimentation des MES. Si le plan d'eau est petit, la mise en place d'un coupe vent pourrait suffire à favoriser la décantation si tous les autres paramètres sont favorables.

Si la décantation est presque totale après plusieurs semaines, on peut penser que des facteurs physico-chimiques viennent compliquer le processus de décantation. Il faudra en tenir compte lors du traitement.

➤ Un deuxième test peut permettre de savoir si l'eau contient les éléments nécessaires pour permettre le développement de la vie. Ce développement est d'une part indispensable si l'on souhaite réaménager le plan d'eau, et d'autre part fortement favorable pour stabiliser les berges ou encore maintenir les boues dans le fond une fois les particules sédimentées.

Ce test est identique au premier sauf qu'il est nécessaire de **mettre la bouteille à la lumière**. Si des taches vertes apparaissent après un certain temps, c'est que le milieu n'est pas azoïque. Notons d'autre part que la présence de bactéries peut permettre de dégrader les produits organiques en excès éventuellement ajoutés lors d'un traitement.

➤ Un troisième test consiste à **mettre un échantillon broyé de la fraction argileuse du gisement dans un récipient rempli d'eau**. Il suffit ensuite d'observer l'opalescence de l'eau dans le temps pour savoir si le gisement contient des argiles qui sédimentent difficilement.

➤ Enfin, il ne s'agit pas d'un test, mais il est simple et recommandé de **se reporter dans la notice de la carte géologique du secteur du site** pour savoir s'il est fait mention de cortèges argileux riches en kaolinite dans la formation à exploiter. Si c'est le cas, il faudra en tenir dès le départ pour prévoir la possibilité de réaliser un traitement adapté.

5.3.5) TRAVAILLER EN COLABORATION AVEC DES SPECIALISTES

Quel que soit le mode de traitement envisagé pour traiter le plan d'eau, il convient de s'adresser à **une Société ou à un laboratoire compétents pour la solution retenue**. Que ce soit pour réaliser des analyses ou encore pour déterminer les coagulants-floculants les plus efficaces par exemple, seuls des spécialistes pourront répondre précisément à la problématique imposée par le milieu.

L'idéal pourrait être de travailler avec un **laboratoire** qui réaliserait les **analyses** et certains **tests** et qui ferait un **suivi scientifique de l'avancement du traitement**. Ce laboratoire n'étant pas forcément vendeur et donc grand spécialiste des coagulants et des floculants, il pourrait s'avérer nécessaire de confier cette partie du travail à une société compétente. Ainsi l'exploitant n'aurait pas à se soucier ni des essais, ni du traitement, ni du suivi scientifique dans la mesure où deux intervenants compétents, indépendants et complémentaires travaillent dans la même direction.

Si le mode de traitement le plus approprié n'est pas chimique, l'intervention unique du laboratoire peut suffire s'il est en mesure de réaliser des tests in situ par exemple.

5.3.6) PREVOIR LE DEVENIR DES BOUES

Selon la nature des MES et le traitement effectué, les boues pourront être plus ou moins valorisées. Il semblerait par exemple que l'halloysite soit une argile très recherchée. Dans ce cas, il faut **prévoir un mode de traitement** qui influe relativement peu sur la chimie des boues et qui permette une récupération rapide, facile et peu coûteuse.

Dans le cas moins favorable où la nature des MES ne permette pas d'envisager leur revente une fois sédimentées, il convient de s'assurer que les boues sont définitivement stabilisées.

Pour ce, on peut envisager de vider l'eau du bassin de traitement (si ce mode de traitement a été retenu) et recouvrir les boues de matériaux, de végétation, ou encore d'une couverture synthétique.

Une autre voie pourrait être issue du curage de ces boues. Leurs stockage, épandage ou incinération sont autant de possibilités dont la réglementation évolue et qu'il est sage de regarder avant de prendre une décision. Quoi qu'il en soit, il faudra s'assurer qu'elles ne seront jamais remises en eau.



CONCLUSION

Cette étude est une réponse aux préoccupations des exploitants vis-à-vis de l'opalescence persistante de certains de leurs plans d'eau. Quelques aspects n'ont pu malgré tout être menés à terme du fait de confidentialités partielles de la part des exploitants et des Sociétés spécialisées contactées.

La **synthèse bibliographique**, incontournable pour comprendre les principes de sédimentation des fines dans les plans d'eau, a permis de **lister** et de **comprendre l'influence des principaux paramètres** biotiques et abiotiques.

Cette synthèse ainsi que l'étude des traitements proposés par des Sociétés spécialisées ont permis d'envisager **quatre procédés de traitement des eaux turbides**. Chacun de ces procédés présente des avantages et des inconvénients d'un point de vue efficacité, économique, environnemental, technique et en terme de délais.

La méthode la plus sûre d'un point de vu efficacité, mais pas la moins coûteuse ni la plus rapide, est la **coagulation-floculation**. Ce procédé de traitement est régulièrement utilisé dans les stations d'épuration ainsi que dans les bassins de décantation pour sédimenter les fines issues des eaux de lavage.

La méthode de **filtration** n'a pas été testé in situ mais donne de bons résultats au laboratoire. Elle a pour avantages de ne pas utiliser de produits et les délais seront d'autant plus courts que l'espace de traitement disponible sera grand.

L'utilisation d'une **eau minéralisée** peut être économiquement intéressante si le site est à proximité d'une source importante (océan, estuaire, forage profond). Il faudra en revanche s'attacher à surveiller les éventuels impacts sur le milieu naturel et obtenir une autorisation préfectorale.

La **flottation** est la quatrième méthode envisageable. Régulièrement utilisée en station d'épuration, des tests doivent être réalisés afin de savoir si cette méthode est utilisable avec des MES argileuses dont la densité est de l'ordre de 2 en moyenne.

Une cinquième méthode de traitement est aujourd'hui en phase de réflexion par l'IEEB : il s'agit d'une méthode **électrique**. En effet, les solutions colloïdales présentent une force électrique qui peut être responsable du maintien en suspension des colloïdes. De ce fait, une électrolyse du plan d'eau pourrait éventuellement casser ces forces et permettre ainsi la sédimentation des argiles fines. Cette méthode reste une hypothèse et n'a pas été présentée dans le rapport car aucun essai n'a été pour l'heure effectué et aucune conclusion ne peut donc en être tirée.

La **synthèse bibliographique** a également permis d'**identifier des terrasses riches en kaolinite voire en halloysite**. En effet, les terrasses quaternaires du bassin de la Garonne **a1a** et **a1b** sont caractérisées de la sorte dans des ouvrages et dans les notices de certaines cartes géologiques. C'est d'ailleurs dans ces terrasses qu'ont été exploités les gisements d'ARSAC (a1a) et d'AVENSAN (a1b).

Le phénomène observé sur ces sites était donc prévisible. Il est fortement recommandé aux exploitants de réaliser des tests d'identification des argiles présentes dans les gisements de ces terrasses s'ils souhaitent ne pas être confrontés à un problème environnemental important. L'exploitant pourra ainsi calculer la rentabilité potentielle de son gisement en tenant compte du coût de traitement de son futur plan d'eau.

L'attente des exploitants est aujourd'hui clairement définie. Il s'agit :

- de trouver des traitements efficaces et pérennes pour répondre au durcissement des contraintes réglementaires,
- d'améliorer leur image par rapport à la protection de l'environnement,
- de développer des systèmes d'automatisation dans les procédés de traitement permettant un résultat optimisé au moindre coût.

Cette étude permettra aux exploitants de comprendre les origines et les conséquences de la turbidité persistante de certains de leurs plans d'eau. Elle leur permettra également de **connaître les méthodes de traitement envisageables ainsi que leurs avantages et inconvénients**. Certaines pistes à suivre avant d'engager toute phase d'essai sont également proposées et peuvent permettre d'éviter aux exploitants de s'engager vers des voies relativement contraignantes à plus ou moins long terme.

En revanche, cette étude ne propose pas une solution "miracle". Un ensemble d'essais au laboratoire voire in situ révélera **le traitement le plus adapté en fonction des propriétés de chaque site et des souhaits de leur exploitant**. C'est à ce dernier de définir s'il souhaite privilégier le coût, les délais, l'impact sur l'environnement ou encore l'efficacité plus ou moins assurée du traitement.

Cette étude prouve que les exploitants se préoccupent de la remise en état de leurs carrières. Ils essaient également de **se réconcilier avec l'opinion publique** en valorisant autant que possible les terrains exploités. L'investissement dans un traitement efficace pour clarifier les eaux opalescentes est aujourd'hui essentiel afin de garantir la pérennité de l'activité dans les secteurs concernés.

Les carriers sont conscients des **efforts** qu'ils seront amenés à faire dans les années à venir. Si cette étude révèle le caractère "capricieux" de notre environnement, elle met également au grand jour un manque de communication important entre les confrères et néanmoins concurrents. Etant donné les enjeux économiques des essais et des traitements, les exploitants devraient peut-être essayer de s'entendre pour répartir les efforts et récolter ensemble les fruits de leurs découvertes.



RESUME NON TECHNIQUE

Le sujet de cette étude a été proposé par plusieurs adhérents du Comité de la Charte Aquitaine qui se préoccupent de leurs plans d'eau riches en MES, alors que les activités d'extraction sont terminées depuis quelque temps déjà. Il semblerait que cette opalescence soit due à la présence d'argiles en suspension, et en particulier à l'halloysite (identifiée sur le site d'AVENSAN, des analyses sont en cours sur les eaux des sites d'ARSAC et de CABANAC).

1) PRESENTATION DE L'ETUDE ET OBJECTIFS

Les carriers souhaitent améliorer leur image par rapport à la protection de l'environnement. De ce fait, ils se préoccupent entre autre de l'impact des MES sur le milieu naturel (couleur, nappe phréatique, biocénose et sédimentation). Il semblerait que cet impact ne soit pas significatif tant que les MES restent dans le plan d'eau et qu'elles n'en colmatent ni le substratum ni les berges.

L'attente des exploitants est aujourd'hui clairement définie. Ils travaillent pour trouver des traitements efficaces et pérennes afin de répondre au durcissement des contraintes réglementaires. Ils souhaitent également développer des systèmes d'automatisation dans les procédés de traitement, permettant un résultat optimisé au moindre coût.

2) DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

La synthèse bibliographique porte sur les trois composantes principales du système étudié, à savoir : les argiles, les plans d'eau et la décantation.

2.1) LES ARGILES

Il existe de nombreuses familles d'argiles susceptibles d'être retrouvées en suspension dans les plans d'eau des carrières. Toutes ces familles ont des propriétés différentes. Leur identification et leur teneur ne sont pas évidentes à déterminer. L'analyse par diffractométrie aux rayons X est aujourd'hui un travail de spécialiste et peu de laboratoires sont compétents dans le domaine.

La couleur et le type de gisement des différentes familles d'argiles peuvent permettre d'avoir une idée sur la nature de ces dernières dans les plans d'eau, avant toute analyse plus poussée.

La densité des argiles influe directement sur leur vitesse de sédimentation. En effet, plus la densité est élevée, plus la vitesse de sédimentation et la clarification des eaux sont rapides.

La Capacité d'Echange Cationique (C.E.C.) d'une argile traduit la facilité avec laquelle elle peut capter des cations présents dans son environnement. Plus la C.E.C. est importante, plus l'argile concernée peut sédimenter en fixant les cations naturellement présents ou introduits dans le cadre d'un traitement par coagulation-floculation, par exemple.

Notons que la kaolinite et l'halloysite (appelée également kaolinite hydratée) sont des argiles très présentes en Aquitaine et qu'elles présentent une faible C.E.C. Elles ont été identifiées dans les terrasses a1a et a1b du bassin de la Garonne.

2.2) LES PLANS D'EAU

Les plans d'eau sont soumis à un ensemble de facteurs liés à leur profil, au climat et à l'exploitation de la carrière. Ils influent tous, directement ou indirectement, sur la concentration des MES dans le milieu.

Le vent peut générer un hydrodynamisme à l'origine du maintien en suspension des particules fines dans un plan d'eau. En ce sens, il est certainement le principal facteur à l'origine de l'opalescence persistante de certains plans d'eau.

Une petite surface et un allongement perpendiculaire aux vents dominants sont deux caractéristiques qui peuvent favoriser la clarification d'un plan d'eau. La mise en place de coupes vents (arbres, hauts talus ou merlons) peuvent également s'avérer efficace.

2.3) LA DECANTATION

La décantation d'une eau est un phénomène complexe lié à de nombreux facteurs. Il semblerait que la minéralisation, la température et le pH de l'eau constituent les trois facteurs physico-chimiques les plus importants.

Le profil du plan d'eau constitue également un élément déterminant. En effet, une topographie étroite et profonde favoriserait la sédimentation des MES, à la faveur de la formation d'un point nodal (point de vitesse nulle).

3) INFLUENCE DES PRINCIPAUX FACTEURS SUR LA SEDIMENTATION DES ARGILES DANS LES PLANS D'EAU

Les facteurs qui influencent la sédimentation des argiles peuvent être divisés en deux groupes : les facteurs vivants (biotiques) et les facteurs non vivants (abiotiques).

Les facteurs abiotiques sont soit relatifs à la qualité de l'eau brute (nature et concentration des argiles et des matières organiques en suspension, pH, température, minéralisation totale, oxygène dissous), soit relatifs aux conditions hydrodynamiques du milieu.

Les facteurs biotiques peuvent assurer une contribution bénéfique à la décantation (la flore en général) mais également un rôle négatif (remise en suspension des particules fines par la faune).

Pour obtenir une clarification intéressante à partir d'un traitement optimal, il est nécessaire de connaître l'état initial du plan d'eau. Il est notamment indispensable de connaître la nature de l'argile en suspension; de même que la concentration en matières organiques totales (elles consomment "inutilement" les coagulants-floculants ajoutés).

4) ETUDE DE CAS

Nous avons recensé quatre sites en Aquitaine qui présentent des plans d'eau riches en MES. Il s'agit des sites d'ARSAC, d'AVENSAN, de CABANAC et de MIOS.

Les sites d'ARSAC et d'AVENSAN exploitent respectivement des gisements dans les terrasses a1a et a1b du bassin de la Garonne. Ces terrasses sont connues pour contenir une fraction argileuse riche en kaolinite voire en halloysite.

Le site de CABANAC exploite une terrasse ancienne de la Garonne. Cette formation est caractérisée au droit du site par des intercalations argileuses dominées par la kaolinite (présence possible d'halloysite).

Notons que tous ces sites ont fait l'objet de tests sur le terrain ou au laboratoire.

5) TRAITEMENT DES MES DANS LES PLANS D'EAU DES CARRIERES

5.1) PROPOSITIONS DE PROCÉDÉS DE TRAITEMENT ENVISAGEABLES

La synthèse bibliographique et l'étude des tests réalisés sur les sites étudiés permettent de proposer quatre procédés de traitement envisageables. Ces quatre procédés de traitement sont : la coagulation-floculation, la filtration-évaporation, l'eau minéralisée (contenant des sels), et la flottation. Toutes ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients vis-à-vis de leur efficacité, de leur coût, de leur impact sur l'environnement, et de leur délai de traitement.

Le traitement par coagulation-floculation semble être le plus sûr d'un point de vue efficacité. En revanche, des investissements notables sont à prévoir (achat de produits, coût de fonctionnement "des" pompes, création et étanchéification d'un bassin de traitement), et les délais de traitement seront relativement importants.

Le traitement par filtration n'a pas été testé sur le terrain mais donne de bons résultats en laboratoire. Le coût engendré sera "faible" car il n'y a pas de produit à acheter. En revanche, un suivi scientifique de la perméabilité du sol pourrait s'avérer utile pour réguler le débit des pompes et pour savoir quand curer les premiers centimètres imperméabilisés par le dépôt argileux.

L'utilisation d'une eau minéralisée ou du procédé de traitement par flottation pourraient s'avérer efficaces et avantageux, mais des tests et des investissements lourds sont à prévoir au départ, sans pour autant garantir des résultats satisfaisants.

5.2) DEBOUCHES ENVISAGEABLES POUR LES BOUES

L'halloysite est une argile rare dont on trouve des gisements en DORDOGNE et dans le Périgord. Ses propriétés (la plus blanche qui soit, plastique, très pure et à haute résistance pyrométrique) permettent son utilisation dans plusieurs secteurs, à savoir : la fabrication de la porcelaine, l'industrie de raffinage du pétrole, la culture de bananes,...

Si les boues ne sont pas valorisables, il faudra s'assurer de ne pas les remettre dans l'eau. On pourra par exemple les mettre en dépôt dans des fosses rebouchées par la suite.

5.3) RECOMMANDATIONS

Des recommandations simples peuvent être proposées aux exploitants qui souhaitent traiter leurs plans d'eau riches en MES.

Tout d'abord, il est nécessaire de déterminer la nature et la concentration des argiles et des matières organiques en suspension. La détermination des propriétés physico-chimiques des eaux est également essentielle pour prévoir les orientations de traitement les plus favorables et pour établir un état initial du milieu.

Il faut éviter de remettre en eau des sédiments argileux ou de la terre de découverte riche en matière organique. Cette dernière consommerait une partie des produits ajoutés et compliquerait le traitement.

Des tests simples peuvent être réalisés pour savoir si l'hydrodynamisme est le principal agent de maintien en suspension des fines, ou pour savoir si le milieu peut permettre naturellement le développement de la vie aquatique.

Il est nécessaire de travailler en collaboration avec des Sociétés spécialisées dans le mode de traitement choisi par l'exploitant. Un organisme indépendant pourrait de son côté réaliser des tests et assurer un suivi scientifique du traitement.

Enfin, il est important de prévoir dès le départ s'il y aura revalorisation des boues pour choisir le traitement le plus adapté.



GLOSSAIRE

Abiotique : caractérise tout ce qui n'appartient pas au domaine du vivant.

Absorption : phénomène de pénétration d'une substance dans un corps.

Adsorption : fixation généralement superficielle d'un gaz ou d'un liquide sur un solide ou un liquide non miscible. Elle a pour origine les forces d'attractions intermoléculaires.

Alluvion : sédiment des cours d'eau et des lacs composé, selon les régions traversées et la force du courant, de galets, de graviers et de sables en dépôts souvent lenticulaires, la fraction fine correspondant à des argiles et des limons.

Argile : minéral de petite taille ($< 3,9 \mu\text{m}$), sa structure est identifiable aux rayons X (par diffractométrie). Elle est caractérisée par la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques et de couches octaédriques. Entre les feuillets se placent divers cations (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} ...). Selon leur structure et leur nature chimique, on identifie un grand nombre de familles d'argiles.

Benthos : ensemble des organismes animaux et végétaux vivant sur le substratum d'un milieu aqueux.

Biocénose : ensemble des être vivants qui peuple un même milieu.

Biotique : caractérise tout ce qui appartient au domaine du vivant.

Boue : dépôt fin imprégné d'eau obtenu par sédimentation des particules en suspension. Elles peuvent être plus ou moins déshydratées par décantation, filtration, pressage, centrifugation ou séchage.

Capacité d'Echange Cationique (C.E.C.) : quantité de cations échangeables par unité de masse d'argile. C'est-à-dire la facilité avec laquelle une particule va remplacer des cations adsorbés par d'autres cations. Plus elle est importante, plus l'action des coagulants-floculants pourra être efficace.

Décantation : processus qui tend à débarrasser un liquide de ses impuretés en les laissant se déposer sous l'effet de leur poids.

Défloculant : substance qui permet de casser les floccs et d'individualiser les particules.

Coagulant : composé minéral qui permet l'agglomération des particules les plus fines en suspension.

Coagulation : destabilisation des suspensions par un traitement chimique qui induit la neutralisation partielle de leur charge et donc de leur force répulsive. Elle nécessite une forte agitation du milieu afin de bien mélanger le coagulant-floculant dans l'eau à traiter.

Colloïde : composé organique ou minéral dont la taille est comprise entre $0,01$ et $10 \mu\text{m}$. Sa surface est chargée négativement et sa surface spécifique est importante.

Décantation : séparation des matières solides plus denses que l'eau qui sédimentent sous l'effet de leur poids.

Eutrophisation : enrichissement excessif du milieu aquatique en nutriments (nitrates et phosphates) et provoquant un déséquilibre grave de la flore et de la faune aquatique dû notamment à la baisse de la teneur en oxygène dissous lors de la phase de décomposition. D'autres facteurs concourent à l'eutrophisation comme le ralentissement de la vitesse de l'eau, la température et l'éclairement.

Floc : agglomération de particules provenant d'une floculation naturelle ou artificiellement provoquée et donnant une boue par sédimentation.

Floculant : polymère qui permet l'agglomération des particules les plus fines en suspension.

Floculation : transformation réversible que subissent les suspensions colloïdales par association des particules constituantes sous forme de floccs. Elle nécessite une agitation faible et un temps de séjour des particules relativement long.

Hydrophile : se dit d'une substance apte à être mouillé par l'eau sans être dissous.

Hydrophobe : se dit d'une substance qui ne se laisse pas mouiller par l'eau. Dans le cadre des suspensions aqueuses, les colloïdes hydrophobes sont principalement des oxydes métalliques, des oxydes de silice ou des minéraux argileux.

Gravière : plan d'eau d'origine artificielle créé par extraction de granulats et alimenté essentiellement par la nappe souterraine.

Hydromorphe : se dit d'un sol affecté par une saturation en eau prolongée de ses couches supérieures due à un défaut d'infiltration des eaux de pluie ou à la remontée de la nappe phréatique provoquant ainsi un déficit en oxygène.

Laminaire : se dit du régime d'un cours d'eau dont les filets fluides sont parallèles et individualisés.

Lac : grande étendue d'eau continentale, généralement douce, souvent qualifiée suivant son origine. Les eaux des lacs sont peu renouvelées et relativement stagnantes.

Pédogenèse : ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques aboutissant à la formation et à l'évolution des sols, à partir de la roche mère, avec différenciation des horizons.

Pélite : particule détritique de taille inférieure à 10 µm.

Podzol : sol des régions tempérés plutôt froides montrant typiquement de haut en bas les horizons suivants : 10 à 20 cm d'humus incomplètement décomposé, 2 à 5 cm d'horizon noir riche en humus, un horizon épais blanchâtre et cendreuse riche en silice, 10 à 20 cm d'humus noir colloïdal, 5 à 15 cm de couleur rouille (avec parfois de l'altos), la roche mère gréseuse ou sableuse. Ce type de sol se trouve par exemple dans les Landes. On connaît de nombreuses variations autour de ce type (sols podzoliques).

Pouvoir oxydo-réducteur : paramètre exprimant l'aptitude du milieu à réduire ou à oxyder certains constituants du sol et en particulier le fer.

Rhéologie : étude de la déformation des corps réels.

Salinité : concentration d'une eau en sels minéraux dissous.

Sédimentation : ensemble des phénomènes qui conduisent au dépôt d'un sédiment.

Slikke : partie basse d'un marais littoral, vaseuse, non colonisée par la végétation, inondée à chaque marée.

Surface spécifique : propriété intrinsèque d'une roche correspondant à la surface totale de ses particules en contact avec l'air divisée par le volume de la roche. Plus les particules élémentaires sont fines, plus la surface spécifique est grande.

Terrasse : replat situé à une altitude supérieure à celle du cours d'eau, la terrasse représente le reste d'un lit ancien dans lequel ce cours d'eau s'est enfoncé. Par extension, on emploie ce terme pour désigner les alluvions qui la constituent.

Thermocline : couche d'eau dont la température varie rapidement avec la profondeur.

Thixotropie : propriété pour un sédiment cohérent mais gorgé d'eau de devenir brusquement liquide sous l'effet d'un ébranlement mécanique. C'est le phénomène responsable de l'enlèvement dans les sables mouvants.

Turbidité : opalescence d'un liquide due aux particules en suspension.

Vase : sédiment meuble, gorgé d'eau, à éléments détritiques très fins et à colloïdes.



TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	2
AVANT-PROPOS.....	4
SOMMAIRE.....	6
TABLE DES FIGURES.....	9
INTRODUCTION.....	12
1) PRESENTATION DE L'ETUDE ET OBJECTIFS.....	15
1.1) OBJET DE L'ETUDE.....	16
1.2) IMPACTS DES MES SUR LE MILEU NATUREL.....	17
1.2.1) IMPACT DES MES SUR LA COULEUR DE L'EAU.....	17
1.2.2) IMPACT DES MES SUR LA QUALITE DE LA NAPPE PHREATIQUE.....	17
1.2.3) IMPACT DES MES SUR LA BIOCENOSE.....	18
1.2.4) IMPACT DES MES SUR LA SEDIMENTATION.....	18
1.2.5) SYNTHESE.....	18
1.3) OBJECTIFS DES CARRIERS.....	19
2) DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES.....	20
2.1) LES ARGILES.....	21
2.1.1) MINÉRALOGIE DES ARGILES.....	21
2.1.1.1) Famille de la kaolinite.....	21
2.1.1.1.1) Conditions de gisement.....	21
2.1.1.1.2) Caractéristiques.....	22
2.1.1.2) Famille de l'halloysite.....	22
2.1.1.2.1) Conditions de gisement.....	22
2.1.1.2.2) Caractéristiques.....	22
2.1.1.3) Famille de la montmorillonite.....	23
2.1.1.3.1) Conditions de gisement.....	23
2.1.1.3.2) Caractéristiques.....	23
2.1.1.4) Famille de l'illite.....	23
2.1.1.4.1) Conditions de gisement.....	24
2.1.1.4.2) Caractéristiques.....	24
2.1.1.5) Famille de la vermiculite.....	24
2.1.1.5.1) Conditions de gisement.....	24
2.1.1.5.2) Caractéristiques.....	25
2.1.1.6) Famille de la chlorite.....	25
2.1.1.6.1) Conditions de gisement.....	25
2.1.1.6.2) Caractéristiques.....	25

2.1.1.7) Minéraux argileux interstratifiés.....	26
2.1.1.7.1) Nature des minéraux associés.....	26
2.1.1.7.2) Conditions de gisement.....	26
2.1.1.8) Synthèse.....	27
2.1.2) LES ARGILES DANS LES BASSINS ALLUVIONNAIRES	
AQUITAINS.....	28
2.1.2.1) Présentation des formations sub-affleurantes.....	28
2.1.2.1.1) Le Pliocène.....	28
2.1.2.1.2) Les formations du Quaternaire.....	28
2.1.2.2) Les terrasses dans le bassin de la Garonne.....	28
2.1.2.2.1) Les terrasses du Pliocène.....	29
2.1.2.2.2) Les terrasses quaternaires anciennes.....	30
2.1.2.2.3) Origine des matériaux.....	30
2.1.2.2.4) Evolution longitudinale des dépôts.....	31
2.1.2.3) Les argiles dans les sols du Bassin Aquitain.....	31
2.1.2.3.1) Présentation des cortèges argileux dans les sols...	31
2.1.2.3.2) Evolution des cortèges argileux dans les sols.....	32
2.1.2.4) Répartition et évolution des argiles fluviatiles	
dans le Bassin Aquitain.....	34
2.1.2.4.1) Correspondance entre les caractéristiques	
physico-chimiques des eaux des rivières	
et la minéralogie des argiles transportées.....	34
2.1.2.4.2) Répartition des argiles fluviatiles récentes.....	34
2.1.2.4.3) Evolution dans le temps	
des cortèges argileux fluviatiles.....	35
2.1.2.4.4) Evolution des argiles dans l'estuaire de la Gironde	35
2.1.3) SYNTHESE.....	36
2.2) LES PLANS D'EAU.....	37
2.2.1) GÉNÉRALITÉS.....	37
2.2.1.1) Stratification thermique.....	37
2.2.1.2) Actions des précipitations.....	38
2.2.1.3) Actions des agents atmosphériques.....	38
2.2.2) LES PLANS D'EAU DES CARRIERES.....	40
2.2.2.1) Facteurs principaux influençant les carrières en eau.....	41
2.2.2.2) Paramètres influencés en eau de surface.....	41
2.2.2.3) Paramètres ubiquistes.....	42
2.2.3) SYNTHESE.....	43
2.3) LA DECANTATION.....	44
2.3.1) GENERALITÉS.....	44
2.3.1.1) Comportement des particules élémentaires en milieu calme	44
2.3.1.2) Flocculation – Vitesse de chute des flocons.....	45
2.3.1.2.1) Influence du diamètre des particules.....	46

2.3.1.2.2) Influence de la concentration en particules solides dans la suspension.....	46
2.3.1.2.3) Influence du milieu aqueux.....	46
2.3.1.3) Tassement des sédiments pélitiques.....	47
2.3.1.4) Comportement des dépôts de sédiments pélitiques sous différentes actions hydrodynamiques.....	47
2.3.1.4.1) Erosion des sédiments pélitiques par des courants en régime uniforme.....	47
2.3.1.4.2) Actions de la houle et du vent sur des dépôts de vase	48
2.3.2) EXEMPLE DE SEDIMENTATION NATURELLE DES ARGILES DANS L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE.....	49
2.3.2.1) Le bouchon vaseux.....	49
2.3.2.2) Points nodaux.....	49
2.3.3) SYNTHESE.....	50
3) INFLUENCE DES PRINCIPAUX FACTEURS SUR LA SEDIMENTATION DES ARGILES DANS LES PLANS D'EAU	51
3.1) ROLE DES COAGULANTS-FLOCCULANTS.....	52
3.1.1) PRINCIPES DE LA COAGULATION-FLOCCULATION.....	52
3.1.1.1) Actions des coagulants.....	52
3.1.1.2) Actions des flocculants.....	53
3.1.1.3) Mécanismes de Coagulation-flocculation.....	53
3.1.2) ELIMINATION DES MES PAR COAGULATION-FLOCCULATION	54
3.1.2.1) Elimination des composés minéraux par coagulation-flocculation	54
3.1.2.2) Elimination des composés humiques par coagulation-flocculation	54
3.2) INFLUENCE DES FACTEURS ABIOTIQUES.....	55
3.2.1) pH.....	55
3.2.1.1) Influence dans les processus de sédimentation naturelle....	55
3.2.1.2) Influence dans les processus de coagulation-flocculation....	55
3.2.2) TEMPÉRATURE.....	55
3.2.2.1) Influence dans les processus de sédimentation naturelle....	55
3.2.2.2) Influence dans les processus de coagulation-flocculation....	56
3.2.3) MINÉRALISATION.....	56
3.2.3.1) Influence dans les processus de sédimentation naturelle....	56
3.2.3.2) Influence dans les processus de coagulation-flocculation....	58
3.2.4) OXYGENE DISSOUS.....	58
3.2.4.1) Influence dans les processus de sédimentation naturelle....	58
3.2.4.2) Influence dans les processus de coagulation-flocculation....	58

3.2.5) MES HYDROPHOBES.....	59
3.2.5.1) Influence dans les processus de sédimentation naturelle....	59
3.2.5.2) Influence dans les processus de coagulation-floculation....	59
3.2.6) MES HYDROPHILES.....	60
3.2.6.1) Influence dans les processus de sédimentation naturelle....	60
3.2.6.2) Influence dans les processus de coagulation-floculation....	60
3.2.7) VENT.....	61
3.2.7.1) Influence dans les processus de sédimentation naturelle....	61
3.2.7.2) Influence dans les processus de coagulation-floculation....	61
3.2.8) SYNTHESE.....	62
3.3) INFLUENCE DES FACTEURS BIOTIQUES.....	64
3.3.1) FLORE.....	64
3.3.1.1) Maintien des berges.....	64
3.3.1.2) Abri du vent.....	64
3.3.1.3) Sédimentation favorisée.....	64
3.3.1.4) Influence sur les autres facteurs.....	65
3.3.2) FAUNE	66
3.4) SYNTHESE.....	67
4) ETUDE DE CAS.....	69
4.1) ARSAC.....	70
4.1.1) CONTEXTES ENVIRONNEMENTAUX.....	70
4.1.1.1) Contexte géographique	70
4.1.1.1.1) Localisation.....	70
4.1.1.1.2) Paysage.....	70
4.1.1.1.3) Plans d'eau.....	70
4.1.1.2) Contexte pédologique.....	71
4.1.1.3) Contexte géologique	71
4.1.1.4) Contexte climatique.....	72
4.1.1.4.1) Précipitations en mm.....	72
4.1.1.4.2) Températures en °C.....	72
4.1.1.4.3) Vents.....	72
4.1.1.5) Contexte hydrologique	72
4.1.1.5.1) Réseau hydrographique et fossés de drainage.....	72
4.1.1.5.2) Analyses physico-chimiques.....	73
4.1.1.6) Contexte hydrogéologique	74
4.1.1.7) Contexte hydrodynamique.....	75
4.1.1.7.1) Profil du plan d'eau turbide.....	75
4.1.1.7.2) Bilan des flux.....	75

4.1.2) TRAITEMENTS PROPOSÉS ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL.....	77
4.1.2.1) Etudes menées par l'IEEB.....	77
4.1.2.1.1) La craie de Champagne.....	77
4.1.2.1.2) Le carbonate de calcium et le gypse.....	78
4.1.2.2) Proposition d'un procédé de traitement envisageable.....	79
4.2) AVENSAN.....	80
4.2.1) CONTEXTES ENVIRONNEMENTAUX.....	80
4.2.1.1) Contexte géographique	80
4.2.1.1.1) Localisation.....	80
4.2.1.1.2) Paysage.....	80
4.2.1.1.3) Plans d'eau.....	81
4.2.1.2) Contexte pédologique.....	81
4.2.1.3) Contexte géologique	81
4.2.1.4) Contexte climatique	82
4.2.1.4.1) Précipitations en mm.....	82
4.2.1.4.2) Températures en °C.....	82
4.2.1.4.3) Vents.....	82
4.2.1.5) Contexte hydrologique.....	83
4.2.1.5.1) Réseau hydrographique et fossés de drainage.....	83
4.2.1.5.2) Analyses physico-chimiques.....	83
4.2.1.5.3) Analyse des MES.....	84
4.2.1.6) Contexte hydrogéologique.....	84
4.2.1.7) Contexte hydrodynamique.....	85
4.2.1.7.1) Profil du plan d'eau turbide.....	85
4.2.1.7.2) Bilan des flux.....	85
4.2.2) TRAITEMENTS PROPOSÉS ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL.....	87
4.2.2.1) Etude menée par MORILLON CORVOL et SOPROMAT	87
4.2.2.2) Proposition d'un procédé de traitement envisageable.....	89
4.3) CABANAC.....	90
4.3.1) CONTEXTES ENVIRONNEMENTAUX.....	90
4.3.1.1) Contexte géographique	90
4.3.1.1.1) Localisation.....	90
4.3.1.1.2) Paysage.....	90
4.3.1.1.3) Plans d'eau.....	91
4.3.1.2) Contexte pédologique.....	91
4.3.1.3) Contexte géologique	91
4.3.1.4) Contexte climatique	92
4.3.1.4.1) Précipitations en mm.....	92
4.3.1.4.2) Températures en °C.....	92
4.3.1.4.3) Vents.....	93
4.3.1.5) Contexte hydrologique.....	93
4.3.1.5.1) Réseau hydrographique et fossés de drainage.....	93
4.3.1.5.2) Analyses des MES.....	93
4.3.1.6) Contexte hydrogéologique.....	93

4.3.1.7) Contexte hydrodynamique.....	94
4.3.1.7.1) Profil du plan d'eau turbide.....	94
4.3.1.7.2) Bilan des flux.....	94
4.3.2) TRAITEMENT PROPOSÉ PAR ABIOLO ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL.....	96
4.4) MIOS.....	97
4.4.1) CONTEXTES ENVIRONNEMENTAUX.....	97
4.4.2) TRAITEMENT PROPOSÉ PAR L'IEEB ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL.....	97
4.5) AUTRES SITES.....	98
5) TRAITEMENTS DES MES DANS LES PLANS D'EAU DE CARRIERES.....	99
5.1) PROPOSITIONS DE PROCEDES DE TRAITEMENT ENVISAGEABLES.....	100
5.1.1) TRAITEMENT DES MES PAR DES COAGULANTS-FLOCULANTS.....	100
5.1.1.1) Exemples de coagulants-floculants et de leurs effets sur le milieu naturel.....	100
5.1.1.1.1) Le carbonate de calcium.....	101
5.1.1.1.2) La chaux éteinte.....	101
5.1.1.1.3) Le gypse.....	102
5.1.1.1.4) La chaux éteinte + le gypse.....	102
5.1.1.1.5) La pyrite.....	102
5.1.1.1.6) Le sulfate d'aluminium.....	103
5.1.1.1.7) Le chlorure ferrique.....	103
5.1.1.1.8) Les coagulants organiques.....	103
5.1.1.1.9) Synthèse.....	104
5.1.1.2) Lieux de traitement.....	105
5.1.1.2.1) Traitement sur le plan d'eau.....	105
5.1.1.2.2) Traitement dans un petit bassin.....	106
5.1.1.2.2.1) Avantages d'un bassin de traitement des eaux.....	106
5.1.1.2.2.2) Dimensionnement et propriétés du bassin	107
5.1.1.3) Procédé de traitement envisageable	111
5.1.2) TRAITEMENT DES MES PAR UNE EAU FORTEMENT MINERALISEE ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL.....	113
5.1.3) TRAITEMENT DES MES PAR FLOTTATION ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL.....	114

5.1.4) TRAITEMENT DES MES PAR FILTRATION-EVAPORATION ET IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL.....	115
5.1.4.1) Principes de la méthode.....	115
5.1.4.2) Essai réalisé au laboratoire par l'IEEB.....	116
5.1.4.3) Procédé de traitement envisageable	117
5.1.5) COMPARAISON DES TRAITEMENTS ENVISAGEABLES.....	119
5.2) DEBOUCHES ENVISAGEABLES POUR LES BOUES.....	120
5.3) RECOMMANDATIONS LORSQUE L'ON SOUHAITE TRAITER UN PLAN D'EAU TURBIDE.....	121
5.3.1) IDENTIFICATION DE LA NATURE ET DE LA CONCENTRATION DES MES DANS LE PLAN D'EAU.....	121
5.3.2) DETERMINATION DES PROPRIETES PHISCO-CHIMIQUES DES EAUX TURBIDES.....	121
5.3.3) EVITER D'AUGMENTER LA CONCENTRATION EN MES DANS LE PLAN D'EAU.....	122
5.3.4) REALISATION DE TESTS SIMPLES.....	123
5.3.5) TRAVAILLER EN COLABORATION AVEC DES SPECIALISTES	124
5.3.6) PREVOIR LE DEVENIR DES BOUES.....	124
CONCLUSION.....	125
RESUME NON TECHNIQUE.....	128
GLOSSAIRE.....	133
TABLE DES MATIERES.....	137
BIBLIOGRAPHIE.....	145
CARNET D'ADRESSES DE L'ETUDE.....	149



BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

AGENCE DE BASSIN LOIRE-BRETAGNE

- 1979 Lagunage naturel et lagunage aéré – Procédés d'épuration des petites collectivités.
Ministère de l'environnement et du cadre de la vie et ministère de l'agriculture, 74 p.

ALLEN G.P.

- 1973 Etude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde.
Mémoires de l'institut de géologie du bassin d'Aquitaine, n° d'enregistrement à l'université de Bordeaux I : 369, p. 202-266, 134 fig.

CEMAGREF

- 1983 Intérêt et limite de l'aquaculture dans les carrières en eau.
Groupement de Bordeaux, Division Aménagement Littoraux et Aquaculture, étude n°14, 208 p.

CEMAGREF

- 1990 Le génie civil des bassins de lagunage naturel.
Ministère de l'agriculture et de la forêt, documentation technique du Fonds National pour le Développement des Adductions d'Eau, n°7, 50 p.

CAILLERE S., HENIN S., RAUTUREAU M.

- 1982 Minéralogie des argiles. 2 – Classification et nomenclature.
Actualités scientifiques et agronomiques de l'INRA – 9.
Masson 2^{ème} édition, 189 p.

CASTANY G.

- 1982 Principes et méthodes de l'hydrogéologie.
Dunod Université, p. 105-109

DUSSART B.

- 1992 Limnologie - l'étude des eaux continentales.
N. Boubée & Cie 2^{ème} édition, p. 124-232.

ENCEM

- 2001 Etude d'impact de l'exploitation d'une carrière dans la commune d'ARSAC en Gironde.
Demande d'autorisation au titre des Installations Classées, GSM, 128 p.

ENCEM

- 1997 Etude d'impact de l'exploitation d'une carrière dans la commune d'AVENSAN en Gironde.
Demande d'autorisation au titre des Installations Classées, Morillon Corvol, 235 p.

FOUCAULT A., RAOULT J. F.

- 1988 Dictionnaire de géologie.
Masson 2ème édition, 352 p.

FRANCESCHI M.

- 1991 Contribution à l'étude des mécanismes de coagulation-floculation.
Thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse, n°869, 302 p.

GEOAQUITAINE

- 1992 Etude d'impact de l'exploitation d'une carrière dans les communes de CABANAC et VILLAGRAINS en GIRONDE.
Demande d'autorisation au titre des Installations Classées, Les Granulats d'Aquitaine, 75 p.

HOCART M. R.

- 1962 Genèse et synthèse des argiles.
Colloques internationaux du CNRS, éd. du CNRS, 221 p.

LATOUCHE C.

- 1971 – Les argiles des bassins alluvionnaires aquitains et des dépendances océaniques.
Mémoires de l'institut de géologie du bassin d'Aquitaine, n° d'enregistrement à l'université de Bordeaux I : 344, 2 tomes, 415 p., 96 fig.

MIGNIOT C.

- 1968 Etude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques.
La houille blanche, n°7, p. 591-620

MINES et CARRIERE

- 2002 Le recyclage des eaux de traitement dans l'industrie extractive
Revue mensuelle de l'industrie minière, février, volume 84, Dossier p. 44-65.

SOCIETE DE L'INDUSTRIE MINERALE

- 1999 Gravières (et carrières) : impact sur la qualité des eaux.
Les techniques de l'industrie minière, n°1 / 1^{er} trimestre, 100 p.

CARTES GEOLOGIQUES

BRGM

1992 AUDENGE

Carte géologique de la France au 1 / 50 000, n°826, 32 p.

BRGM

1977 BLAYE

Carte géologique de la France au 1 / 50 000, n°779, 45 p.

BRGM

1977 BORDEAUX

Carte géologique de la France au 1 / 50 000, n°803, 40 p.

BRGM

1973 HOSTENS

Carte géologique de la France au 1 / 50 000, n°851, 21 p.

BRGM

1977 SAINT-LAURENT-ET-BENON

Carte géologique de la France au 1 / 50 000, n°778, 25 p.

SITES INTERNET

http://adminet.reseaubec.com/evariste/ridt/r74/fiche_kpcl.html

<http://webmineral.brgm.fr.8003/mineraux/Main.html>

<http://www.aquarius-h2o.com>

http://www.bcrc.be/si/66_9_3.html

http://www.cite-sciences.fr/outre-mer/OUTREMER/RECHERCHES/recherches_1.html

<http://www.enviro2b.com>

<http://www.ile-de-France.driv.gouv.fr/ssol/mateutil.html>



CARNET D'ADRESSE DE L'ETUDE

ABIOLO :

Parc d'activités Descartes
33370 ARTIGUES PRES BORDEAUX
☎ : 05.57.80.28.04
Fax : 05.57.80.27.33

BPB FORMULA :

34, avenue Franklin Roosevelt
92282 SURESNES CEDEX
☎ : 01.46.25.46.85
Fax : 01.46.25.46.90

ENCEM (Environnement, Carrières et Matériaux) :

2, allées d'Orléans
33000 BORDEAUX
☎ : 05.56.81.90.82
Fax : 05.56.81.22.57

GSM (Granulats et Sables Marins) :

162, avenue du Haut-Lévêque
33608 PESSAC CEDEX
☎ : 05.56.15.10.15
Fax : 05.56.07.04.12

IEEB (Institut Européen de l'Environnement de Bordeaux) :

1, rue du Professeur Vèzes
33300 BORDEAUX
☎ : 01.56.01.84.00
Fax : 01.57.87.11.63

KPCL :

avenue du président Kennedy
BP 806
87015 LIMOGES
☎ : 05.55.31.41.41
Fax : 05.55.30.58.48

LES GRANULATS D'AQUITAINE :

5, Quai de Chaulne
33420 St JEAN DE BLAIGNAC
☎ : 05.57.55.45.54
Fax : 05.57.55.48.84

MORILLON CORVOL :

13, rue des Lacs
31150 LESPINASSE
☎ : 05.61.37.36.36
Fax : 05.61.09.51.37

SIFRACO :

Zone industrielle
Route du Barp
33380 MIOS
☎ : 05.57.71.10.07
Fax : 05.57.71.81.56

SNL FLOERGER :

41 rue Jean Huss
42028 SAINT-ETIENNE
☎ : 04.77.47.66.00

SOPROMAT :

route de Luxey
33730 PRECHAC
☎ : 05.56.65.25.54
Fax : 05.56.65.22.70

TASO MARIETTE :

26, avenue Jean-Jaurès
47000 AGEN
☎ : 05.53.68.38.45
Fax : 05.53.96.75.20

UNICEM Aquitaine(Union Nationale des Industries de Carrière Et des Matériaux) :

2, allées d'Orléans
33000 BORDEAUX
☎ : 05.56.44.95.50
Fax : 05.56.81.22.57