

## T H E S E

PRESENTEE A L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE  
PARIS-GRIGNON

POUR OBTENIR LE TITRE DE DOCTEUR-INGENIEUR  
Géologie appliquée

MISE EN EVIDENCE DES PRINCIPAUX MECANISMES DE FORMATION  
DU COLMATAGE PAR LE FER DES RESEAUX DE DRAINAGE AGRICOLE EN FRANCE  
APPLICATION À LA PRÉVISION DE CE PHÉNOMÈNE AVANT DRAINAGE

Par

SABINE HOUOT

Ingénieur Agronome à l'I.N.A.P.G. (\*)

Soutenue le 14 Mai 1984 devant la Commission d'Examen

JURY :

MM. J. BOULAINÉ, Président  
J. BERTHELIN, Rapporteur  
T. CESTRE  
N. FEDOROFF Examineurs  
P. MOULINIER  
B. SOUCHIER

DÉPARTEMENT DES SOLS

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE

(\*) INAPG  
Chaire de Sciences du sol  
78850 THIVERVAL GRIGNON

## RESUME

Le colmatage ferrique des drains prend actuellement une importance croissante en France.

L'étude de plusieurs exemples de colmatage localisés en Bretagne, dans le Massif-Central, le Bassin Parisien et en Camargue a permis de préciser les mécanismes de mobilisation du fer, son mode de transport et la formation du précipité dans les drains.

Le colmatage ferrique apparaît dans des sites variés qui possèdent des propriétés différentes (géologiques, pédologiques, topographiques, climatiques...). Toutefois, il existe des zones à plus forts risques dans les massifs primaires (Massif Central, Massif Armoricain, Vosges, Ardennes).

L'apparition du colmatage ferrique est souvent lié à la rémanence de l'engorgement des parcelles après drainage en raison de l'existence de sources ou de nappes permanentes qui n'ont pas été repérées et captées avant la pose des réseaux.

Deux types de dépôts ont été mis en évidence et étudiés :

- des dépôts ferriques associés à des bactéries comme Leptothrix et Gallionella,

- des dépôts ferreux noirs de sulfures ferreux associés aux bactéries sulfato-réductrices.

Dans tous les sites étudiés, le fer est autochtone et provient des sols drainés.,

L'étude suivie pendant un an d'un site du Bassin Parisien, Bullion, a permis de préciser l'influence des facteurs du milieu sur la formation du colmatage ferrique.

L'anaérobiose des sols, leur teneur importante en fer libre et en matière organique favorisent l'action des bactéries ferri-réductrices qui solubilisent le fer dans les sols. Dans le drain, quatre domaines d'aération (potentiel d'oxydo-réduction) de l'eau sont distingués, qui conditionnent soit l'absence de dépôt, soit la formation de dépôts rouille avec ou sans bactéries, soit celle de dépôts noirs de sulfure de fer.

Les conditions de pose des drains (contre-pente, gley de tranchée...) jouent un rôle fondamental dans la formation ou l'absence des dépôts. Des traitements curatifs sont présentés et discutés. L'ultrastructure des dépôts est également étudiée au microscope électronique à balayage et à transmission couplés ou non à des microsondes.

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : DIVERSITE DES DEPOTS ET DES SITES DE COLMATAGE : MECANISMES IMPLIQUES	5
1.- Introduction	7
2.- Méthodes	8
2.1. Caractérisation des dépôts	9
2.2. Analyse des sols	10
2.3. Analyse des eaux	12
3.- Etude des sites	12
3.1. Site 1 : Kergrist Moelou (Côtes du Nord)	14
3.2. Site 2 : Boussac (Creuse)	26
3.3. Site 3 : Roupperoux (Sarthe)	28
3.4. Site 4 : Saint-Martin de Bréthencourt (Yvelines)	36
3.5. Site 5 : Bullion (Yvelines)	39
3.6. Site 6 : Lansargues (Hérault)	39
4.- Conclusion	43
CHAPITRE II : ETUDE DETAILLEE DE DEUX SITES DE COLMATAGE FERRIQUE : BULLION	47
1.- Introduction	49
2.- Sites d'étude et méthodes	49
2.1. Etude des sols	51
2.2. Les dépôts	51
2.3. Etude du régime hydrique. Les parcelles	52
2.4. Analyse des eaux	52
3.- Environnement géologique et climatique du site de Bullion	54
3.1. Environnement géologique	54
3.2. Géomorphologie et formations superficielles	56
3.3. Hydrogéologie	56
3.4. Environnement climatique	56
4.- Présentation du milieu : les sols et leurs teneurs en fer	58
4.1. Présentation des sols	62
4.2. Teneurs et différentes formes de fer dans les sols et les tranchées des deux parcelles	72
4.3. Teneur en soufre	80
4.4. Conclusion	80

5.- Hydrodynamique et hydrochimie des stations étudiées	84
5.1. Hydrodynamique des parcelles	84
5.2. Hydrochimie des stations	94
5.3. Discussion : Engorgement et mobilisation du fer dans les sols	96
6.- Analyse des dépôts	101
6.1. Etude des microorganismes associés aux dépôts	102
6.2. Analyse chimique des dépôts	103
6.3. Conclusion	108
7.- Analyse des eaux circulant dans les drains	108
7.1. Présentation générale des corrélations entre variables	109
7.2. Charge des drains	109
7.3. Concentration en Fe <sup>++</sup>	112
7.4. Concentration en carbone des eaux	113
7.5. Concentration en azote des eaux	115
7.6. Rapport carbone/Azote	115
7.7. Teneur en sulfates	118
7.8. Cations en solution	118
7.9. Variations du pH	118
7.10. Variations du potentiel d'oxydoréduction	118
7.11. Stabilité du fer en solution	118
7.12. Discussion : analyse des données	121
8. Discussion - Conclusion	125
CHAPITRE III : ETUDE SUBMICROSCOPIQUE DES DEPOTS	129
1.- Introduction	131
2.- Méthodes	
2.1. Les appareils	131
2.2. Préparation des échantillons	131
3.- Résultats	133
3.1. Lansargues	133
3.2. Bullion	139
4.- Discussion	145
CHAPITRE IV : APPLICATION A LA LUTTE CONTRE LE COLMATAGE FERRIQUE DES DRAINS	147
1.- Introduction	149
2.- Influence du mode de drainage	150
3.- Influence de la pose du réseau de drainage	150
4.- Nettoyage des drains	151
4.1. Dispositif de nettoyage	151
4.2. Efficacité du nettoyage	151
4.3. Conclusion	153

5.- Conclusion : Importance des études préalables au drainage	153
CONCLUSIONS GENERALES	155
1.- Variétés des sites de colmatage ferrique	157
2.- Types de colmatage ferrique	158
3.- Origine du fer précipitant dans les drains	158
4.- Influence de certains facteurs du milieu sur l'apparition du colmatage des drains par le fer	159
4.1. Le potentiel d'oxydo-réduction	159
4.2. Le pH	161
4.3. Teneurs en matière organique	161
4.4. Formes du fer	161
4.5. Mode d'engorgement	161
5.- Influence des modalités de pose du réseau de drainage sur l'apparition du colmatage ferrique	162
6.- Conclusion : Importance des études préalables au drainage	162

#### BIBLIOGRAPHIE

#### ANNEXES

## INTRODUCTION GENERALE

Le colmatage ferrique des drains correspond à l'apparition de produits ferrugineux couramment appelés "ocre", dans les drains et collecteurs des réseaux de drainage. Ces produits ferrugineux peuvent également se déposer sur les perforations et les enrobages des drains et même contaminer les remblais poreux des tranchées.

Ce colmatage entraîne une baisse de l'efficacité du drainage en raison de la diminution des sections des drains et de la réduction de la perméabilité de leur environnement (CESTRE, 1982).

L'apparition de produits ferrugineux affecte non seulement les réseaux de drainage, mais également les puits et les canalisations d'alimentation en eau potable (RIDWAY et al., 1981 ; TUOVINEN et NURMIAHO, 1979), ainsi que les tissus de soubassement des routes (GOUY, 1983 ; FEDOROFF, 1983). Des pays très divers sont "atteints" par le colmatage ferrique, comme en témoignent les nombreux travaux déjà effectués :

- Aux Etats-Unis (GRASS, 1969 ; GRASS et al., 1973 ; FORD, 1979 et 1982).
- Au Canada (IVARSON et SOJAK, 1978).
- Au Royaume-Uni (ALCOCK, 1973 ; THORBURN et TRAFFORD, 1976 ; TRAFFORD et BLOOMFIELD, 1971 ; BLOOMFIELD, 1972 ; TRAFFORD et al., 1973).
- En Allemagne (KUNTZE, 1982).

En France, DEVILLERS, en 1976, fait une première estimation des cas de colmatage ferrique : 5 % des sols drainés sont atteints. Actuellement, le drainage concerne de plus en plus des sols dont le comportement vis-à-vis du colmatage ferrique est mal connu. Des cas de plus en plus nombreux sont signalés à la Division Drainage du CEMAGREF. Les nombreuses études faites depuis 1980 témoignent de l'importance croissante de ce problème en France (RODRIGUEZ, 1980 ; GOUY, 1983 ; LAGACHERIE et al., 1984 ; HOUOT et al., 1984).

Le fer peut précipiter dans les drains par voie physico-chimique. En effet, dans les sols hydromorphes engorgés, les drains représentent un milieu aéré. L'influence des modifications des conditions de Eh et pH sur la stabilité en solution du fer est bien connue (PONNAMPERUMA et al., 1967 ; VIZIER, 1971 ; HEM, 1960). Ce mode de précipitation est sans doute responsable des dépôts sur les perforations des drains, au contact des milieux engorgés et aérés.

Les microorganismes jouent également un rôle prépondérant dans l'apparition du colmatage ferrique. Selon le pH du milieu, deux types d'ocre peuvent être distingués :

(1) En milieu acide ( $\text{pH} < 3$ ), Thiobacillus ferrooxidans intervient dans l'oxydation et la précipitation du fer ferreux, normalement soluble à ce pH (MULDER, 1972). C'est l'ocre pyriteuse, définie par TRAFFORD et BLOOMFIELD (1971).

(2) A des pH voisins de la neutralité, l'analyse microbiologique des dépôts a mis en évidence un très grand nombre de bactéries associées aux dépôts ferriques (FORD, 1979 ; IVARSON et SOJAK, 1978 ; GOUY, 1983), et qui correspondent essentiellement à deux types d'organismes :

- Des bactéries autotrophes, c'est-à-dire utilisant comme source d'énergie l'oxydation du fer, et comme source de carbone le  $\text{CO}_2$  atmosphérique dissous dans l'eau. Le genre principal est Gallionella, facilement reconnaissable à son pédoncule spiralé (KUCERA et WOLFE, 1957). L'énergie d'oxydation du fer dans les conditions voisines de la neutralité est faible et une grande quantité de fer sera donc oxydée.

- Des bactéries mixotrophes des genres Sphaerotilus et Leptothrix de la famille des bactéries à gaines. Ces bactéries peuvent se comporter en bactérie autotrophe en milieu pauvre en carbone organique, mais elles peuvent dégrader des complexes organo-métalliques, utilisant la partie carbonée comme source de carbone et d'énergie. Le fer, peu stable en solution, précipite alors par voie physico-chimique sur les gaines polysaccharidiques entourant les bactéries (VAN VEEN et al., 1978 ; DONDERO, 1975). C'est l'ocre filamenteuse de TRAFFORD et BLOOMFIELD (1971).

Ces bactéries peuvent se développer dans des conditions climatiques très variables, température proche de  $0^\circ\text{C}$  en bordure de nevés (BERTHELIN, communication personnelle), température proche de  $30^\circ\text{C}$  en climat tropical en Floride (FORD, 1979).

Le fer qui précipite dans les drains provient des sols entourant ces drains (fer autochtone) ou est véhiculé jusqu'au drain par l'intermédiaire d'une nappe d'eau enrichie en fer au contact de couches géologiques éloignées (fer allochtone) (KUNTZE, 1982).

La diversité des sites où apparaît le colmatage ferrique rend difficile sa prévision. ALCOCK (1973), en Angleterre, a essayé de relier l'apparition du colmatage à la nature du substrat géologique, sans obtenir de bonnes corrélations. KUNTZE (1978), en Allemagne, définit un certain nombre de critères d'évaluation des risques basés sur la couleur des eaux et la présence d'ocre en surface des parcelles, et sur un certain nombre d'analyses pédologiques et hydrologiques des sols. Mais ces critères ne peuvent être appliqués partout (FORD, 1979).

Le travail présenté ici a été entrepris pour améliorer nos connaissances des processus et des facteurs intervenant dans le colmatage ferrique avec le souci de déterminer des critères permettant d'envisager les risques et les traitements.

Dans une première partie, nous avons essayé de mettre en évidence l'existence de différents types de colmatage des drains par les dépôts de fer et de définir les mécanismes entraînant leur formation, en insistant sur l'origine du fer et l'influence de la nature de l'engorgement des sols (nappe profonde résurgente, nappe perchée).

Puis, sur un site caractéristique d'un type de colmatage, nous avons étudié l'influence de la variation de certains facteurs physiques et chimiques de l'environnement sur l'apparition du colmatage ferrique.

Ensuite, dans deux types bien distincts de colmatage par le fer, nous avons étudié, par des techniques de microscopie électronique, l'ultrastructure et la composition des dépôts.

Enfin, nous présenterons quelques essais de traitements curatifs, et à partir des résultats obtenus dans les chapitres précédents, divers critères de prévision du colmatage ferrique seront mis en évidence.



## CONCLUSIONS GENERALES

Parmi les études, en nombre très limités, réalisées en France sur le colmatage ferrique des drains, les travaux les plus récents portent essentiellement sur la description d'un seul exemple (GOUY, 1983 ; LAGACHERIE et al., 1984).

L'apparition du colmatage ferrique dans un drain comporte trois phases:

- la mobilisation du fer
- son transport jusqu'au drain
- sa précipitation dans le drain

L'étude du colmatage ferrique doit considérer trois milieux fixes : le sol, la tranchée, le drain et un fluide circulant : l'eau qui intervient dans les trois précédents compartiments pour assurer la mobilisation, le transport et le dépôt du fer. Suivant les cas, la mobilisation du fer peut se faire dans le sol ou la tranchée, sa précipitation dans la tranchée ou le drain.

A travers un premier recensement des cas de colmatage ferrique en France, puis en étudiant de façon plus détaillée un site (Bullion), nous avons montré :

- (1) la grande variété des sites de colmatage ferrique
- (2) l'existence de types différents de colmatage
- (3) l'origine du fer précipitant dans les drains
- (4) l'influence de certains facteurs du milieu sur l'apparition du colmatage ferrique, comme le potentiel d'oxydo-réduction, le mode d'engorgement des sols ...
- (5) le rôle de la qualité de pose du réseau de drainage sur l'apparition du colmatage ferrique.

Enfin, nous soulignerons l'importance des études préalables au drainage dans la prévision de l'apparition du colmatage ferrique.

### 1.- Variétés des sites de colmatage ferrique

Le colmatage ferrique des drains apparaît dans des régions très diverses (cf. figure 1), dans des sols dont les caractéristiques (teneur en matière organique, granulométrie, pH ...) et l'hydromorphie (nappe temporaire ou permanente) sont très variées. Toutefois, il existe apparemment des régions à risque généralisé de colmatage ferrique dans les massifs cristallins primaires (Massif Armoricaïn, Massif Central, Vosges, Ardennes),

ce qui nous a amené à définir les colmatages "géologiques" où les risques sont liés au substrat géologique et au type de sol qui s'y développent (sols acides hydromorphes). Outre ces colmatages "géologiques", existent les colmatages "stationnels" qui se développent en raison de la situation de la parcelle drainée dans le paysage.

## 2.- Types de colmatage ferrique

TRAFFORD et BLOOMFIELD (1971) distinguent l'ocre pyriteuse qui se forme en milieu acide en association avec des bactéries du genre Thiobacillus de l'ocre filamenteuse, qui apparaît à des pH proches de la neutralité, en association avec des bactéries à gaine (Leptothrix, Sphaerotilus) et à pédoncules (Gallionella).

Nous n'avons pas étudié de dépôts se formant en milieu acide. Par contre, de nombreux exemples d'ocre filamenteuse rouille ont été observés, en association avec Leptothrix ou Sphaerotilus et Gallionella (Bullion, Roupperroux, Saint-Martin-de-Bréthencourt, Boussac).

Les observations au microscope électronique à balayage et à transmission permettent de suivre l'évolution des dépôts :

- formation de gaines par Leptothrix et de pédoncules spiralés par Gallionella ;
- imprégnation des gaines et des pédoncules par le fer ;
- dislocation des gaines et apparition de petites granules de fer qui s'accumulent à la base des drains.

Un autre type de colmatage des drains par le fer a été mis en évidence sur deux sites : Kergrist-Moëlou et Lansargues. Il fait intervenir des bactéries sulfato-réductrices qui ne se développent qu'en milieu strictement anaérobie et provoquent la précipitation de sulfures ferreux résultant de la réduction de sulfates. Le milieu devenant moins réducteur, on observera à la surface de ces dépôts noirs, le développement de ferro-bactéries qui oxydent le fer ferreux. Les deux types de dépôts peuvent coexister (Kergrist-Moëlou), rouille en surface, noir à l'intérieur du dépôt.

## 3.- Origine du fer précipitant dans les drains

Le fer peut être allochtone à la parcelle s'il est véhiculé jusqu'au drain par l'intermédiaire d'eaux extérieures à la parcelle. Une nappe profonde qui se serait enrichie en fer au contact d'un substrat géologique concentré en fer, assure alors l'alimentation en fer du dépôt. Le fer est autochtone s'il est mobilisé à partir des sols de la parcelle drainée (KUNTZE, 1982). Dans tous les sites étudiés, nous avons mis en évidence le caractère autochtone du fer. En effet, quand il existait des venues d'eaux extérieures aux parcelles drainées, des dosages de fer effectués sur ces eaux ont montré qu'elles étaient dépourvues de fer.

#### 4.- Influence de certains facteurs du milieu sur l'apparition du colmatage des drains par le fer

##### 4.1. Le potentiel d'oxydo-réduction (figure 48)

Les degrés d'anaérobiose des "compartiments" sol et drain influencent respectivement la mobilisation et la précipitation du fer.

La solubilisation du fer résulte essentiellement de l'activité bactérienne du sol. En milieu aéré, des bactéries du genre Thiobacillus oxydent les sulfures ferreux en sulfates ferreux. Ce processus s'accompagne de la forte acidification du milieu (EHRlich, 1981 ; LAZAROFF et al., 1982 ; TUOVINEN et al., 1983).

En milieu anaérobie, les bactéries ferri-réductrices permettent la solubilisation du fer (BERTHELIN, 1976 ; CHEIKHZADEH-MOSSADEGH, 1981). Ce sont des bactéries hétérotrophes. Une source de carbone métabolisable est donc nécessaire à leur activité. D'autre part, elles réduisent préférentiellement les formes libres du fer et plus particulièrement les formes amorphes (MUNCH et OTTOW, 1980).

Dans le drain, la précipitation du fer dépend aussi de l'aération du milieu (figure 48). Lorsque le milieu est très réducteur ( $Eh < -200$  mV, BERTHELIN, 1982), les bactéries sulfato-réductrices provoquent la précipitation de sulfures ferreux (Kergrist-Moëlou et Lansargue). A l'inverse, lorsque le milieu est très aéré ( $Eh > 300$  mV dans l'eau des collecteurs de Bullion), le fer, instable en solution, précipite par simple voie physico-chimique sans intervention de microorganismes (dépôts recueillis aux exutoires des collecteurs).

Entre ces deux extrêmes, existent deux zones d'anaérobiose plus ou moins forte, mises en évidence à Bullion, mais dont les limites de potentiel d'oxydo-réduction ne sont pas connues précisément. En milieu considéré comme légèrement réducteur (figure 48, valeurs approximatives du potentiel  $200 < Eh < 300$  mV), se développe l'ocre filamenteuse typique (drains 1-2 et 1-3 à Bullion). Par contre, en milieu "réducteur" (valeurs approximatives du potentiel  $-200 < Eh < 200$  mV), aucun précipité de fer ne se forme (drains 4-1 et 4-2 à Bullion). La minéralisation de l'azote est un bon indicateur du niveau d'anaérobiose de l'eau des drains signalé par l'analyse des données. Dans les eaux réductrices où n'apparaît pas le colmatage ferrique, la minéralisation de l'azote ne se fait pas. Dans les eaux légèrement réductrices où le colmatage ferrique apparaît, la minéralisation de l'azote est bloquée au stade de l'ammonification.

Les phases d'aérobiose et d'anaérobiose du sol et des drains peuvent ne pas être simultanées. Un sol peut être engorgé sans que le drain soit en charge, et inversement, le drain peut être en charge sans que le sol soit noyé. Toutefois, la mise en charge du drain entraîne l'engorgement de la tranchée et donc y favorise la solubilisation du fer par réduction bactérienne.

D'autres facteurs du milieu sont aussi importants dans la mobilisation du fer : le pH, la forme du fer, la teneur en matière organique, le mode d'engorgement des sols.

Potentiel de l'eau du sol et de la tranchée	SOL	TRANCHEE	DRAIN	Potentiel de l'eau du drain
Réducteur 200 mV	+ Matière organique + pH voisin de la neutralité + Fer libre abondant, pseudogleys ou gleys à fort battement de nappes (Go) <u>Réduction bactérienne du fer</u> $Fe^{III} \rightarrow Fe^{++}$ bactéries ferri-réductrices (gleys minéraux → peu de $Fe^{++}$ libéré)	$Fe^{III}$ 	Bactéries sulfato-réductrices $FeS$ 	très réducteur -200 mV
		$Fe^{++}$ 	$Fe^{++}$ 	réducteur 200 mV
Non réducteur		$Fe^{III}$ le fer ne pénètre pas dans le drain	Leptothrix Sphaerotilus Gallionella $Fe^{III}$ ocre "filamenteuse"	légèrement réducteur
	Milieu acide pH < 3 $FeS \rightarrow Fe^{++} SO_4^{--}$ Thiobacillus		$Fe^{III}$ Ocre "pyriteuse" Thiobacillus ferrooxydans	300 mV
			$Fe^{III}$ pas de bactéries dans le dépôt	non réducteur

Figure 48 - Influence du potentiel d'oxydo-réduction sur la mobilisation du fer, son transport et son mode de précipitation dans les drains.

#### 4.2. Le pH

Les pH des sols et des eaux de drainage étudiées dans ce travail sont tous supérieurs à 5. On peut donc négliger l'intervention de bactéries du genre Thiobacillus dans la mobilisation et la précipitation du fer. Les variations du pH influencent seulement la stabilité du fer solubilisé par les bactéries ferri-réductrices.

Malgré ses faibles variations entre les différentes eaux des drains, le pH est un paramètre discriminant dans l'apparition du colmatage ferrique à Bullion, qui est favorisé par des pH légèrement plus acides. Les pH des eaux des drains sont compris entre 5,9 et 6,6 dans la parcelle 1, où existe le colmatage ferrique et entre 6,2 et 7,1 dans la parcelle 4 où aucun colmatage n'a été mis en évidence. Ce caractère plus acide permet un apport plus important de fer dans le drain et donc la formation d'un dépôt plus abondant.

#### 4.3. Teneur en matière organique

Elle intervient dans la mobilisation et la précipitation du fer.

##### a) Mobilisation

Les bactéries ferri-réductrices sont hétérotrophes. Elles exigent donc une source de carbone métabolisable pour se développer. C'est pourquoi dans les gleys minéraux (Bullion), peu de fer est mobilisé. En revanche, cette solubilisation sera abondante, par exemple dans les gleys de tranchée qui sont relativement riches en matières organiques.

##### b) Précipitation

De fortes concentrations en carbone organique empêchent la formation de gaines par *Leptothrix* et *Sphaerotilus*. Mais l'analyse discriminante distingue la concentration en carbone organique comme facteur de discrimination entre les puits colmatés et ceux non colmatés. Comme la concentration en carbone organique est plus élevée dans les puits colmatés, on peut donc se demander s'il existe, comme pour l'aération du milieu, un seuil de concentration en carbone organique en-dessous duquel les bactéries ne peuvent se développer

#### 4.4. Formes du fer

Les bactéries ferri-réductrices réduisent préférentiellement les formes libres du fer et, parmi elles, les formes amorphes (MUNCH et OTTOW, 1980). C'est pourquoi le type de sol et le degré d'altération des sols drainés interviennent dans la mobilisation du fer.

Ainsi, dans un pseudogley, l'altération poussée des horizons de surface provoque l'entraînement du fer en association avec les argiles et la matière organique, jusqu'aux horizons de concentration de ces éléments (horizons  $B_{tg}$ ). Le fer, essentiellement sous forme libre, sera alors facilement solubilisé par ferri-réduction bactérienne au cours de l'engorgement ultérieur de ces horizons.

Par contre, dans les gleys, en particulier si les nappes sont à faible battement et n'affectent que des horizons minéraux, l'altération plus faible ne permettra pas la libération du fer, surtout s'il est inclus dans des silicates. Il reste donc peu mobilisable.

La concentration en fer de l'eau des drains ne constitue pas, à elle seule, un caractère discriminant dans l'apparition du colmatage ferrique. Par contre, la conjugaison du pH, du Eh et de la concentration en fer ferreux permet de distinguer, à Bullion, les drains colmatés de ceux qui ne sont pas.

#### 4.5. Mode d'engorgement

La nappe engorgeant les sols joue un double rôle :

- physico-chimique : son niveau d'aération lié à l'activité microbienne permet la mobilisation et la stabilité du fer en solution ;
- mécanique : elle permet le transport du fer jusqu'au drain.

Le type de nappe (nappe temporaire ou permanente) influence la pédogenèse des sols (pseudogley ou gley) et donc indirectement la mobilisation du fer. Les sols à plus fort risque de solubilisation de fer sont donc :

- Les pseudogleys à nappe temporaire. Au moment de leur engorgement, une part importante de fer est solubilisée.
- Les gleys dont la nappe subit de petites oscillations et entraîne l'apparition d'un horizon d'altération Go où le fer est facilement mobilisable.

#### 5.- Influence des modalités de pose du réseau de drainage sur l'apparition du colmatage ferrique

L'insuffisance de précautions au moment de la pose des réseaux, des erreurs de pose et un mauvais entretien des réseaux de drainage peuvent favoriser la mobilisation du fer et sa précipitation dans les drains.

Ainsi, si la tranchée de drainage est rebouchée dans des conditions de forte humidité qui nuisent à la conservation d'une bonne structure et s'accompagne de l'enfouissement au contact du drain des horizons organiques, la dégradation de la matière organique dans ces mauvaises conditions entraîne l'anaérobiose du milieu et la formation de "gley de tranchée". Cela favorise le développement des bactéries ferri-réductrices qui solubilisent le fer. La teneur en fer des tranchées diminue et devient plus faible que dans le sol environnant. C'est le cas de la tranchée 1-2 de Bullion et de celle de Rouperroux. Par contre, si la tranchée évolue dans de meilleures conditions d'humidité, le fer n'est pas solubilisé. On assiste au contraire à l'augmentation de sa teneur dans la tranchée par rapport au sol en place. Le fer mobilisé dans le sol précipite dans la tranchée avant de parvenir au drain. C'est le cas des profils 4-2 et 1-3 de Bullion

En ce qui concerne la précipitation du fer dans les drains, d'une manière générale, tout ce qui entraîne le ralentissement du débit d'eau dans les drains favorise la formation du colmatage ferrique : contrepente, mauvais entretien des fossés permettant l'apparition de bouchons racinaires...

Le colmatage ferrique apparaît souvent au niveau du raccord du drain au collecteur, puis se développe vers l'amont du drain. Pour éviter cela, il est souvent recommandé de faire un drainage direct sur fossé, ce qui permet, d'autre part, un accès facile au drain en cas de nettoyage hydraulique.

## 6.- Importance des études préalables au drainage

L'étude préalable au drainage met en évidence la solubilisation potentielle du fer dans la parcelle à drainer. Pour cela, il est nécessaire de déterminer le type de sol, son pH, sa teneur en matière organique, en fer libre et fer total, c'est-à-dire l'ensemble des composantes impliquées dans la solubilisation du fer. De plus, la nature de l'engorgement des sols doit être étudiée avec soin (engorgement plus ou moins réducteur, permanent ou non, variation de profondeur de nappe...) puisque l'engorgement réducteur des sols est en quelque sorte la cause initiale de la mobilisation du fer par les bactéries ferri-réductrices.

Avant le drainage, toutes les venues d'eaux permanentes extérieures à la parcelle doivent être soigneusement captées, pour éviter le maintien de l'engorgement réducteur des sols après drainage. Les arrivées d'eaux profondes sont à éliminer, même si elles ne contiennent pas de fer car elles favoriseront l'engorgement des sols et la mobilisation du fer.

Enfin, la pose du réseau de drainage doit bien sûr être faite dans de bonnes conditions climatiques pour favoriser une bonne évolution de la tranchée (structure et aération). Les contrepentes sont à éviter impérativement.

L'évolution de la tranchée après le drainage semble être un des facteurs déterminants dans l'apparition du colmatage ferrique. Si elle reste aérée et bien structurée, c'est un piège pour le fer qui est solubilisé dans le sol. Par contre, si elle se gleyfie, elle favorise l'apport du fer dans le drain.