

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
<b>Herausgeber:</b>	Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
<b>Band:</b>	122 (1999)
<b>Artikel:</b>	Dynamisme du fer depuis les marais et tourbes de la vallée des Ponts-de-Martel jusqu'à la résurgence de la Noirague. I, Mobilisation et immobilisation du fer dans la pédosphère de la Vallée des Ponts
<b>Autor:</b>	Bouyer, Yves
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-89529">https://doi.org/10.5169/seals-89529</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 10.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# DYNAMISME DU FER DEPUIS LES MARAIS ET TOURBES DE LA VALLÉE DES PONTS-DE-MARTEL JUSQU'À LA RÉSURGENCE DE LA NOIRAGUE

## I. MOBILISATION ET IMMOBILISATION DU FER DANS LA PÉDOSPHÈRE DE LA VALLÉE DES PONTS<sup>1</sup>

YVES BOUYER

Laboratoire de Minéralogie, Pétrographie et Géochimie. Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel. 11, rue Emile-Argand, CH-2007 Neuchâtel, Suisse.

### Résumé

Le fond de la vallée des Ponts-de-Martel (Jura suisse) est partiellement recouvert d'une tourbière acide qui est restée naturelle (Bois des Lattes) en hydromorphie permanente, et d'une tourbière neutre qui est amendée et mise en prairie après drainage et chaulage. Dans le profil de la tourbière acide, c'est seulement dans l'horizon inférieur de la tourbe qu'il y a accumulation de fer par migration ascendante, de même concentration que dans le gley sous-jacent ( $\approx 3\%$ ); tandis que dans la tourbe cultivée, la concentration est à peu près uniforme le long du profil ( $\approx 3\%$ ) et devient importante dans le gley sous-jacent décarbonaté ( $\approx 6\%$ ).

Dans la tourbe naturelle, c'est l'acidité provoquée par l'oxydation des sulfures qui attaque la partie carbonatée et en libère le fer; dans la tourbe amendée en revanche, la matière organique (des niveaux inférieurs de la tourbe) complexe le fer libéré par hydrolyse des silicates de fer et de magnésium en l'entraînant dans la veine liquide (la teneur en magnésium est corrélée avec CO<sub>2</sub>).

Le fer part aussi sous forme de particules lorsqu'il se trouve dans la structure des chlorites ferrières et dans l'enrobement des argiles, lors de fortes précipitations. Lors de grosses pluies qui succèdent à des périodes sèches, le fer dans la tourbière amendée part des sols, précipite dans les gaines de sidérobactéries, *Gallionella* surtout, absentes ou presque dans le marais acide.

### Abstract

The land of the valley of Ponts-de-Martel (Swiss Jura) is covered partly by a natural acid peat bog (Bois des Lattes) composed of permanent hydromorphium and by an enriched peat bog cultivated in the grassland after drainage and liming. Within the contour of the acid peat bog, it is only in the bottom part of the peat that there will be an accumulation of iron caused by an upward migration, of the same concentration in the underlying gley ( $\approx 3\%$ ); while in the cultivated peat, the concentration is more or less even along the contour ( $\approx 3\%$ ) and becomes more significant in the underlying decarbonated gley ( $\approx 6\%$ ).

In the natural peat, the acidity prompted by the oxidation of the sulfures eats the carbonated part and frees the iron, while in the enriched peat bog, the organic substance (lower parts of the peat),

<sup>1</sup> Cet article est la première partie d'un condensé de la thèse soutenue et réussie devant un jury composé de B. Kübler, J.J. Miserez et I. Müller, professeurs à l'Université de Neuchâtel (Suisse) et de B. Fritz, professeur, CNRS, Strasbourg (France). La deuxième partie mettra en évidence l'influence chimique et minéralogique des eaux de l'emposieu sur celles de la résurgence, en particulier le transit du fer de la surface tourbeuse à la résurgence.

complexes the iron freed by the iron and magnesium hydrolysis of silicates while dragging it in the liquid vein (the magnesium content is correlated with the CO<sub>2</sub>).

The iron is also freed in a particle form when it reaches the structure of ferriferous chlorites and within the coating of clay, during heavy precipitation. After drought periods, during lashing rains, the iron of the enriched peat bog is freed from the soils, thrown in the siderobacteria stems, mostly *Gallionella*, that are more or less lacking in the acid swamp.

## 1. INTRODUCTION

### *1.1. Objectifs de l'étude*

Le comportement du fer dans un milieu naturel, de la surface à l'exutoire d'un bassin karstique, est important à plusieurs titres:

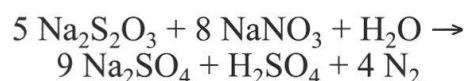
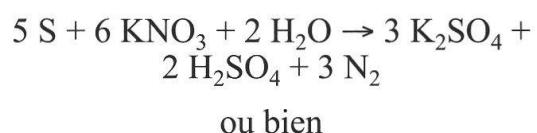
- en pédogenèse, car sa teneur à différents horizons renseigne sur son lessivage;
- en agronomie, car les métaux, même à l'état de traces, se retrouvent dans les plantes (HAMMER, 1989); par exemple un déficit en fer pour certaines espèces de plantes entraîne la chlorose. En revanche un excès de fer (II) comme celui de sulfures est toxique pour les rizières.
- en hydrogéologie, le fer peut servir de traceur sélectif; suivant le cortège de minéraux et la nature de la matière organique qui l'accompagnent, on en déduit l'origine des eaux qui arrivent à l'exutoire, soit de la surface du bassin, soit des nappes profondes du karst.

### *1.2. Le cycle du fer*

Les éléments naturels, C, N, H, O, P et S en tant que nutriments minéraux forment à eux seuls la presque totalité de la matière vivante. Leurs cycles sont connus et eux-mêmes dépendent de certains éléments moins abondants (mésnutriments), tels que le fer et le manganèse inclus dans des réactions biochimiques ou chimiques.

La migration ou l'immobilisation du fer dépend par exemple des nitrates qui l'insolubilisent par oxydation en fer (III), ou des sulfates qui au contraire le mobilisent par libération des protons lors de leur formation. Nitrates et sulfates se forment eux-mêmes par oxydation de la matière organique.

A leur tour, nitrates et sulfates peuvent se trouver liés dans une même réaction comme par exemple celle-ci due à *Thiobacillus denitrificans*:



Le rôle du CO<sub>2</sub> formé dans le cycle du carbone est d'attaquer les carbonates de fer en le rendant soluble selon la réaction:



Le phosphore sous forme de phosphate immobilise le fer sous forme de vivianite insoluble, présente dans notre terrain d'étude.

### *1.3. Apport météorique du fer*

Comme MISEREZ (1973) l'a constaté, la teneur moyenne en fer de l'eau de pluie est la même que celle des eaux de l'exutoire

du bassin (résurgence de la Noiraigue) soit 0.18 mg/l.

#### **1.4. Facteurs de mobilisation et précipitation du fer**

Le but de notre recherche est de déterminer le mode d'exportation et de précipitation du fer en fonction des différents niveaux traversés par cet élément à travers les sols, puis le karst. La délocalisation du fer peut être inorganique (milieu réducteur acide; le fer s'exporte alors sous forme de ion  $\text{FeOH}^+$  ou de ions silicatés ferreux) ou organique (sous forme de chélates et de complexes solubles dans lesquels la matière organique se lie au fer (III) principalement et au fer (II) grâce aux paires d'électrons de N, O, S servant de liaisons de coordination avec le fer). La mobilité et donc l'importance de la migration du fer dépendent de la grosseur et de la polarité de ces complexes, raison pour laquelle on extrait les différents composés organiques du sol en fonction de leurs polarités et de leurs poids moléculaires.

Dans ce cadre, sont séparés les acides fulviques (AF) - à longues chaînes alaphiques ou peptidiques et à nucleus aromatique de petite taille -, des acides humiques (AH) - à chaînes latérales plus courtes mais à nucleus aromatique plus important -(ils viennent généralement des acides fulviques par polycondensation (DUCHAUFFOUR, 1970; GOBAT *et al.*, 1998).

(Lorsque deux charges électriques égales mais opposées sont séparées d'une distance  $l$ , le moment dipolaire est défini par le produit  $\mu = e \cdot l$ ;  $\mu$  est une grandeur vectorielle; si  $e$  s'exprime en coulombs (C) et  $l$  en mètres (m), les dipôles moléculaires sont des moments de l'ordre de  $10^{-29}$  C•m. On utilise habituellement une unité mieux adaptée, le debye (D) qui vaut  $3,33 \cdot 10^{-30}$  C m).

Le fer des complexes argilo-humiques, qui sert de lien entre les argiles et les acides humiques est compris dans l'étude

comme les mesures de complexation classiques de la matière organique par l'électrode de Cu (II) dont les résultats sont comparables à ceux que l'on obtiendrait avec une électrode de fer. Les pourcentages des fractions alaphiques et aromatiques de la matière organique ont été obtenus par R.M.N. (Résonance Magnétique Nucléaire).

#### **1.5. Le fer et les sidérobactéries**

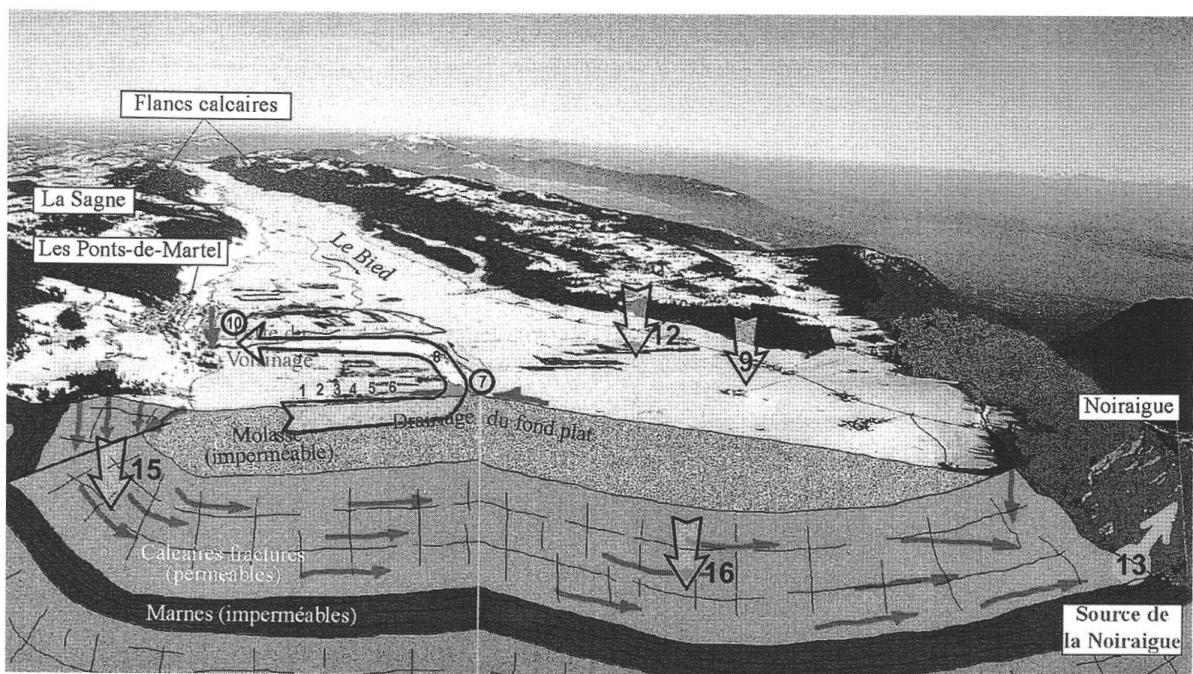
Dans le cycle du fer, le rôle dans l'immobilisation comme dans l'exportation de cet élément par des bactéries, telle *Gallionella ferruginea*, sera abordé quantitativement. En effet lors du départ de ces bactéries des sols dans les eaux, lié aux saisons et aux précipitations, on observe une augmentation de la délocalisation du fer bien plus élevée que par les seuls processus chimiques.

## **2. DESCRIPTION DU SITE ÉTUDIÉ**

### **2.1. Couverture végétale et aperçu pédologique (fig. 1)**

La région étudiée se trouve au fond d'une vallée glaciaire située dans le Jura suisse: la vallée des Ponts-de-Martel et de la Sagne. Dans le fond de cette vallée, des argiles fines d'un lac périglaciale se sont déposées en couche épaisse sur un lit de molasse marine. Le lac devait son existence à un sol gelé en permanence. Puis s'installèrent des tourbières, exploitées ensuite à des fins de chauffage (domestique souvent) et d'horticulture depuis la deuxième guerre mondiale. Il reste encore une région protégée: le Bois des Lattes où nous avons fait plusieurs prélèvements. La tourbe y est intacte et recouverte de bouleaux et de pins. La végétation y est boréale; depuis l'exploitation de la tourbe, l'influence modératrice de celle-ci sur la réponse hydrodynamique est plus faible.

Le fond de la vallée est drainé par le Bied qui disparaît dans un emposieu (perte) au lieu-dit "Le Voisinage" situé à



**Figure 1:** Lieux de prélèvements des eaux. Figure réalisée par Gogniat (1997) avec l'appui du service de l'hygiène et de l'environnement de La Chaux-de-Fonds.

Les points 1, 2, et 3, dans le sens de l'écoulement du bief, se trouvent à l'entrée du Bois des Lattes; le point 4 au cœur et les points 5, 6 et 7 à la sortie de celui-ci. Les points 9 et 12 sont dans le marais amendé et mis en prairie. Le point 10 est à l'emposieu du "Voisinage" où disparaissent les eaux du bief. Les points 15 et 16 sont situés dans les nappes profondes. Le point 13 est la résurgence de la Noiraigue.

l'ouest des Ponts-de-Martel: au fur et à mesure qu'on descend le bief principal, des drains latéraux artificiels s'y jettent et le grossissent. Situé plus au bout de cette vallée, un drainage près de Brot-Dessus, collectant des eaux de tourbes et d'argiles mélangées, disparaît après 150 mètres de course à l'air libre, dans un emposieu. Les eaux réapparaissent à la source de la Noiraigue à l'extrémité est du Val-de-Travers. Leur couleur caractéristique due à la présence d'humates de fer est à l'origine du nom de cette source. Le transit à travers le karst fera l'objet d'un autre article.

## 2.2. Paramètres chiffrés du bassin

Ces valeurs sont reprises de l'étude hydrogéologique du bassin de la source de la Noiraigue (MOREL, 1976):

Longueur:	20,2 km
Largeur maximale:	6,0 km
Superficie totale:	69,9 km <sup>2</sup>
(KIRALY, 1969)	

L'occupation de cette surface se répartit comme suit:

Forêts et pâturages:	36,5 km <sup>2</sup>
Tourbières protégées:	14,0 km <sup>2</sup>
Bassin du bief:	22,0 km <sup>2</sup>
Altitude moyenne:	1065 m

### **2.3. Les tourbières**

Les tourbières se développent au fond du synclinal sur la couverture imperméable à gley du Quaternaire. La situation hydro-morphique permanente a favorisé une végétation spécialisée (ISCHER, 1935; GOBAT *et al.* 1986), les sphaignes en particulier. Ces mousses jouent un rôle étonnant sur le cycle hydrologique, car, toujours humides, elles sont le siège d'une évaporation intense. Les sphaignes situées au-dessus de la zone dénoyée, au contraire, peuvent condenser l'humidité de l'air et forment une rosée appréciable pendant les périodes de sécheresse. L'effet s'est atténué avec la disparition partielle des tourbes. La tourbe, à cause de sa couleur sombre, favorise également la fonte des neiges à la sortie de l'hiver.

Même si le climat jurassien est taxé d'uniformément humide et tempéré froid (AUBERT, 1969), dans la vallée des Ponts, il existe un contraste entre les hivers rudes et neigeux et les étés relativement secs.

## **3. MÉTHODE**

### **3.1. Points d'observation**

Neuf points d'observation ont été retenus, dont sept s'étalant dans le sens d'écoulement du bief sur un transect lisière du Bois des Lattes (no 1, 2, 3), milieu du Bois (no 4), sortie du Bois (no 5, 6, 7). Les deux autres points se trouvent dans la partie amendée: points 9 et 12 (fig. 1).

### **3.2. Prélèvements et analyses des eaux**

#### **3.2.1. Prélèvements**

A chaque point, les eaux prélevées sont séparées en une partie non traitée, une partie traitée avec HCl concentré, une partie filtrée à 0,45 µ, puis acidifiée avec HCl (ces deux dernières parties sont desti-

nées à l'analyse du fer), enfin une partie additionnée d'une goutte de HgCl<sub>2</sub> à 1% en vue des analyses de sulfates et de nitrates.

#### **3.2.2. Rythmes de prélèvements**

Prélèvements mensuels (1975-76), hebdomadaires (1977-78), et quotidiens (du 2.9.76 au 3.9.76).

### **3.3. Paramètres mesurés (tab. 1)**

pH, pCO<sub>2</sub> et potentiel d'oxydoréduction doivent être mesurés immédiatement sur le lieu de prélèvement car ils varient lors du transport. Par contre, l'alcalinité totale ne change pas pour peu qu'il n'y ait pas d'évaporation. Cette alcalinité s'exprime par:

$$[\text{Alc}] = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + 2 [\text{Ca}^{2+}] + 2 [\text{Mg}^{2+}] - [\text{Cl}^-] - [\text{NO}_3^-] - 2 [\text{SO}_4^{2-}]$$

Les méthodes d'analyses utilisées sont les suivantes (MISEREZ, 1973):

Température par thermomètre étalonné au 1/10 °C

pH, potentiel redox, oxygène dissous, conductibilité par électrodes

Dureté temporaire par HCl titré

Dureté totale par EDTA

Anions par colorimétrie automatique (Techicon)

Cations par S.A.A.

Substances humiques par spectrophotométrie UV à 270 mµ

### **3.4. Les paramètres communiqués par les bureaux fédéraux**

Les précipitations, les débits et les températures journaliers ont été communiqués par l'Office fédéral de l'économie hydraulique.

<i>In situ</i>	Jour du prélèvement	Semaine suivant le jour du prélèvement	Mois suivant le jour du prélèvement
Température en °C	Dureté temporaire	SiO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Substances humiques totales
pH	Dureté totale		Ca, Mg, Fer total et filtré à 0,45µ
Potentiel Redox (Eh)	Conductibilité électrique		Sr, Na, K, Cl
Oxygène dissous	Oxydabilité des eaux		

**Tableau 1:** Chronologie des analyses et légendes des paramètres mesurés sur tous les échantillons d'eau prélevés "in situ".

Analyse minéralogique	<u>Minéraux majeurs:</u> Sol total quartz, calcite, dolomite, feldspaths et minéraux argileux  <u>Phyllosilicates:</u> fractions < 16µ et < 2µ
Analyses granulométriques	Pipette Robinson (non séparative)  Méthode Kopecki (séparative)
Analyses chimiques	pH, complexe absorbant, calcaire actif, azote, carbone organique, fer libre, produits amorphes, dosage des éléments totaux, phase carbonatée, silice, alumine et phosphates totaux

**Tableau 2:** Analyses minéralogique, granulométrique et chimique des sols percolés ou en contact avec les eaux prélevées "in situ".

### 3.5. Analyse des sols (tab. 2)

L'analyse des sols est indispensable pour interpréter le chimisme des eaux prélevées à divers niveaux (méthodes analytiques cf. POCHON, 1978). Elle indique les zones de migration ou au contraire d'accumulation des substances chimiques.

### 3.6. Analyse des sidérobactéries

On reconnaît les sidérobactéries (les plus nombreuses sont les *Gallionella*, et bien moins nombreuses les *Leptotrix*) après coloration des pédoncules avec l'hexacyanoferrate (II) de potassium. Le dénombrement de ces bactéries est fait au grossissement de 400x, après filtration sur filtre millipore et estimé par unité de champ microscopique.

### 3.7. Extraction et propriétés des matières organiques

#### 3.7.1. Séparation des acides fulviques (AF) et des acides humiques (AH)

Les méthodes de séparation des acides fulviques et acides humiques sont celles de BRUCKERT *et al.* (1974) et de KONOVOVA (1966).

#### 3.7.2. Fractionnement des acides humiques et fulviques en fonction de leurs poids moléculaires

La séparation moléculaire (fig. 2) sur cassette Pellicon consiste à faire passer une solution à travers une membrane de porosité bien déterminée. La membrane laisse passer les molécules ayant une dimension inférieure au diamètre des pores et retient les molécules de poids moléculaire supérieur selon le principe général que la dimension d'une molécule organique est d'autant plus grande que son poids moléculaire est plus élevé.

Les membranes utilisées séparent les poids moléculaires de  $10^6$ ,  $10^5$ ,  $2.5 \cdot 10^4$ ,  $10^4$  et  $10^3$ . Mais avant de passer les solutions sur ces membranes, il faut éliminer

toutes les particules en suspension par filtrations successives sur des filtres Millipore de 8, 0.45, 0.22 et 0.10 µm.

#### 3.7.3. Séparation des molécules en fonction de leur polarité (fig. 3)

Trois solvants de polarités différentes sont utilisés pour séparer les molécules organiques de polarités également différentes, venant du fractionnement des acides fulviques et humiques de différents poids moléculaires. Les solvants choisis sont l'acétate d'éthyle ( $\mu = 1,78$  D), le n butanol ( $\mu = 1,66$  D) et l'éther ( $\mu = 1,15$  D).

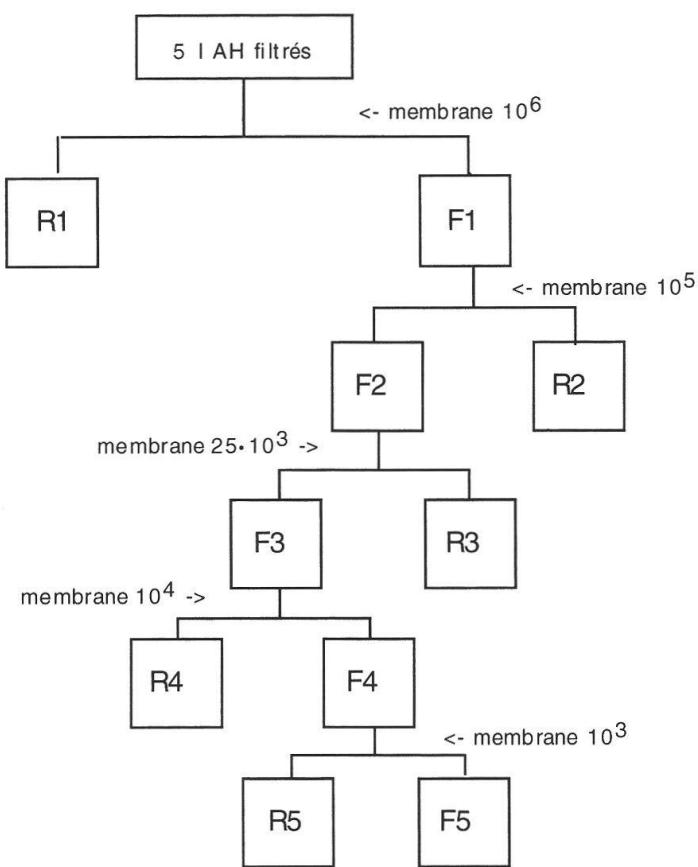
Chaque lot aqueux de molécules de même poids moléculaire est concentré sous une pression réduite de 10 mm Hg à 35°C et ramené à un volume de 10 ml. 10 ml de chaque fraction sont agités avec 10 ml de solvant. Après décantation, la phase aqueuse est reprise deux fois avec le même traitement.

#### 3.7.4. Etude du pouvoir complexant de la matière organique vis-à-vis de l'ion Cu<sup>+2</sup>

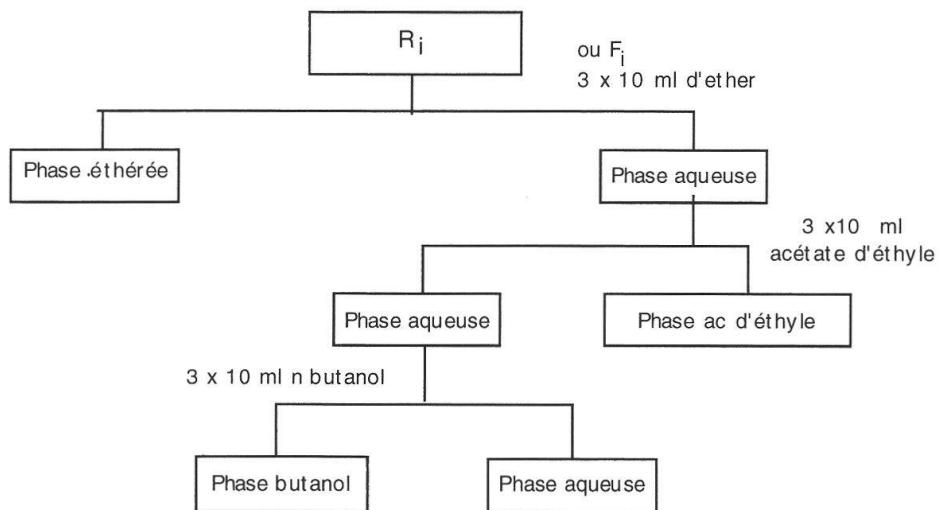
Nous nous sommes inspirés de la méthode de BUFFLE *et al.* (1974, 1977); la détermination de  $\beta_1$ , constante de stabilité des complexes du cuivre avec la matière organique naturelle, et de  $M_w$  = poids équivalent de la matière organique v pour une mole de Cu<sup>+2</sup> complexé, s'est faite à l'aide d'une électrode spécifique de cuivre (électrode Tacussel, P.C.L. 2M n° 317.341).

#### 3.7.5. Analyse de la matière organique des histosols étudiés au R.M.N. (Résonance Magnétique Nucléaire) effectuée par R. Tabacchi, Institut de Chimie, Neuchâtel

Cette analyse permet de déterminer l'évolution de la matière organique d'hilosol qui de naturel passe à cultivé. Elle nous donne les % aliphatique, % aromatique et % C( $\alpha$ ) c'est-à-dire le carbone impliqué dans les fonctions esters.



**Figure 2:** Fractionnement des substances organiques (acides fulviques et humiques) selon leurs poids moléculaires.



**Figure 3:** Extraction, aux différents solvants de polarité différente, des matières organiques séparées selon leurs poids moléculaires.

### **3.8. Interprétations des résultats: analyse factorielle des correspondances, coefficients de corrélation**

La caractérisation des groupes d'eau par leur chimisme inorganique et organique a été faite avec succès par recours aux coefficients de corrélation simple, mais surtout grâce à l'analyse des correspondances selon BENZECRI (1973). Les résultats figurent dans BOUYER & KÜBLER (1981).

## 4. RÉSULTATS

### **4.1. Evolution des différents paramètres des eaux des milieux observés: bord du marais, cœur du marais et marais élargi et amendé (fig. 4)**

Le contenu chimique dissous dans les eaux prélevées diminue lorsque l'on passe du marais amendé (drainé, chaulé, au-dessus de l'hydromorphie) - milieu ouvert (production de  $\text{CO}_2$ ) - au bord du marais acide (hydromorphie alternée) et au cœur du marais en hydromorphie permanente - milieu fermé (pas de production de  $\text{CO}_2$ ).

### **4.2. Analyse des sidérobactéries (fig. 5)**

Le départ du fer est dû parfois aux sidérobactéries (*Gallionella*) qui le précipite en fer (III) dans leurs gaines. Au cours de l'année, principalement dans les eaux du marais amendé et pendant un temps très court (pas plus d'une semaine), on assiste à un départ important du fer particulaire dû à ces bactéries.

### **4.3. Analyse aux rayons X des minéraux des argiles en suspension dans:**

#### **4.3.1. Eaux du marais acide (correspondant au profil BD 3)**

Prise d'échantillon le 15.4.1981. L'eau est filtrée à  $0,45 \mu$ , puis les suspensions sont analysées sur les poudres, puis à  $<16$  et  $<2 \mu$ . On trouve: quartz, albite, calcite,

dolomite, feldspaths potassiques, chlorite, mica, illite, kaolinite, interstratifiés smectite-illite (smic).

#### **4.3.2. Eaux du marais amendé (correspondant au profil BD 12)**

Prise d'échantillon le 15.4.1981. L'eau est traitée comme celle du marais acide. On y trouve: quartz, albite, calcite, dolomite, chlorite, kaolinite, feldspaths potassiques, illite, interstratifiés, illite-chlorite.

### **4.4. Analyse aux rayons X des minéraux des argiles correspondant aux points de prélèvements des eaux (tab. 3)**

L'analyse aux rayons X des minéraux des argiles rend compte de l'évolution des sols par drainage et par la mise en prairie. Elle justifie également l'origine possible du fer dans les eaux quand elle détecte des chlorites par exemple.

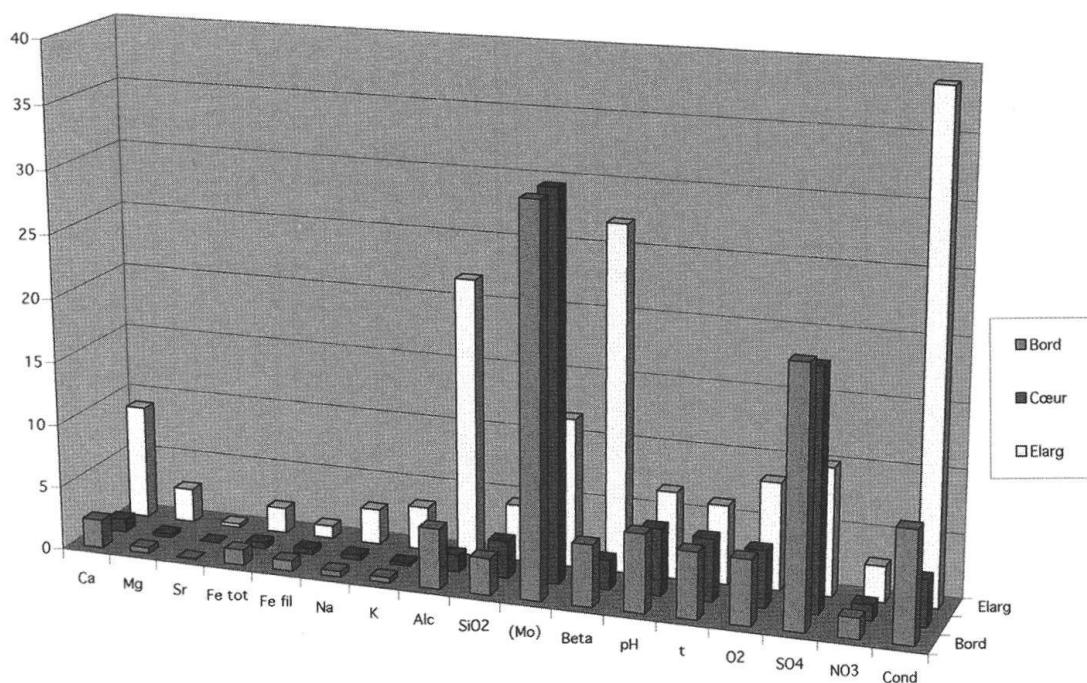
### **4.5. Schéma de la tourbière naturelle avec les points de prélèvements des eaux et des sols (fig. 6)**

L'influence du drainage sur la décarbonatation du gley est nette; les eaux sont le plus minéralisées là où la décarbonatation est la plus importante.

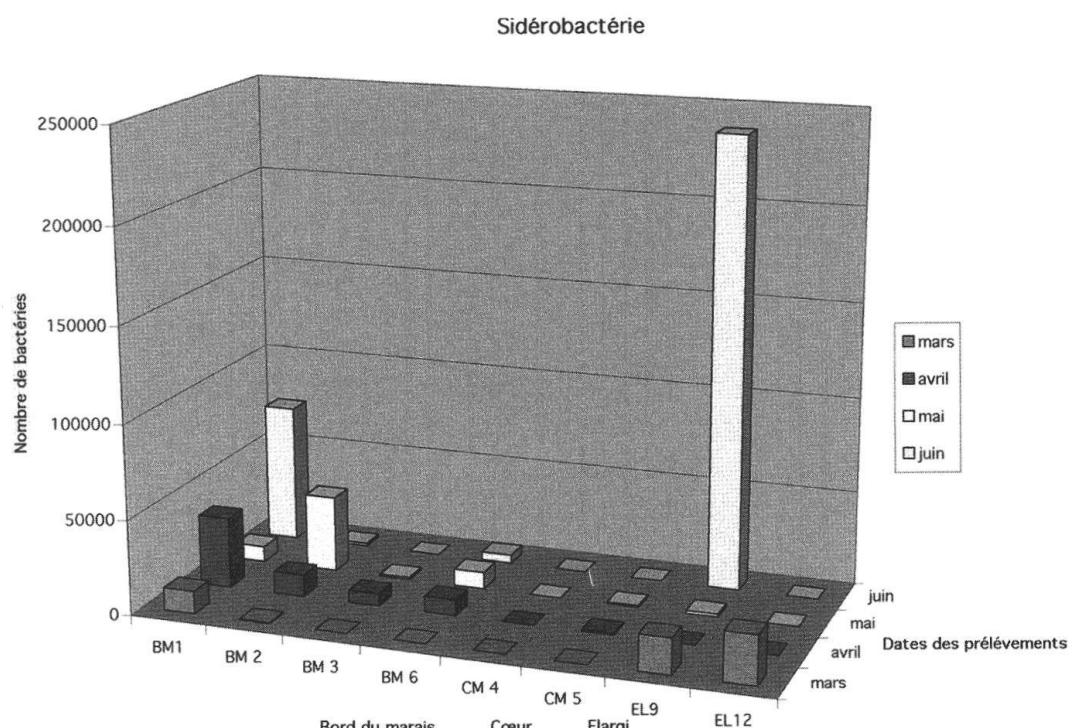
### **4.6. Analyses des échantillons prélevés aux différents horizons des profils BD 3 (tourbière naturelle de l'orée du Bois des Lattes) et BD 12 (région amendée et mise en prairie près de Brot-Dessus)**

#### **4.6.1. Profil BD 3: fig. 7**

L'étude pédologique et la description complète de chaque horizon ont été faites sur tout le profil de cette tourbe acide à type fibrist. Seuls les horizons inférieurs de la tourbe s'enrichissent en éléments majeurs qui peuvent être entraînés par des précipitations dans l'eau du bief.



**Figure 4:** Moyennes, sur 17 prélèvements, du contenu chimique des eaux du bord du marais acide (bord), du cœur du marais acide (coeur) et du marais élargi amendé (élargi). Les concentrations sont exprimées en mg/l, sauf pour  $\beta$  (capacité tampon) exprimée en équivalent/l/unité pH, pH en unité pH, et t (température en °C) et cond. (conductivité en ohms<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>) (Sur l'axe des y, échelle 1/10 pour [Ca<sup>2+</sup>], [Alc], Conduct; et 1/10<sup>-4</sup> pour  $\beta$ ) (Mo=matière organique et Alc=alcalinité totale)



**Figure 5:** Evolution des sidérobactéries en fonction de leurs milieux, caractérisés par différents pH, et des saisons. BM=bord du marais acide; CM=cœur du marais acide; EL=marais amendé et élargi.

#### 4.6.2. Profil BD 12: fig. 8

L'évolution du profil BD 12 (par rapport à BD 3, marais acide) est due au drainage, au chaulage et à la mise en prairie. La tourbe s'est tassée et on passe de fibrist à saprist. Les éléments totaux dès le haut du profil sont beaucoup plus abondants que dans la tourbe acide.

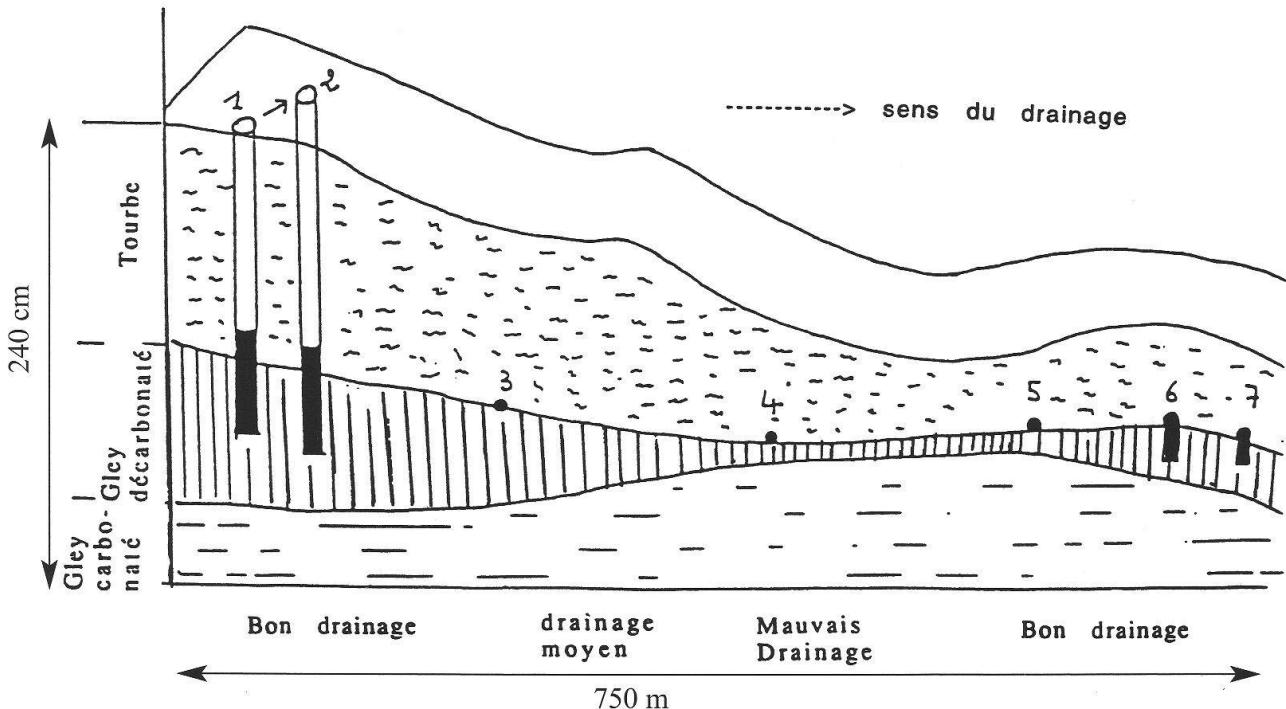
#### 4.6.3. Résultats d'analyses des échantillons prélevés à différents niveaux du profil BD 3 (orée du marais acide): matières et acides organiques. Eléments échangeables. Eléments majeurs (fig. 9)

L'hydromorphie à la base du profil rend le milieu très réducteur (odeur de  $H_2S$ ). C'est dans les horizons TS 1 (15-30 cm) et

TS 2 (30-50 cm) que les acides humiques sont les plus abondants, alors que les éléments majeurs le sont dans l'horizon TF 3 (150-180 cm).

#### 4.6.4. Résultats d'analyses des échantillons prélevés à différents niveaux du profil BD 12 (marais amendé): matières et acides organiques. Eléments échangeables. Eléments majeurs (fig. 10)

Dans le profil BD 12 (marais amendé), la tourbe saprist présente un taux d'acides fulviques et humiques beaucoup plus régulier le long du profil, avec toutefois une augmentation au bas du profil. Les éléments totaux s'accumulent aussi dans la tourbe amendée à l'horizon Tg (45-60 cm)



**Figure 6:** Influence du drainage sur la décarbonatation des gleysoirs sous-jacents à la tourbe. Les points 1, 2, 6 et 7 sont des points de prélèvements situés dans de petits puits ou regards. (voir figure 1 pour la situation des points).

et g (60-85 cm), mais ont toujours un taux plus élevé que dans la tourbe acide.

#### 4.7. Résultats d'analyse de la matière organique

##### 4.7.1. Les échantillons analysés

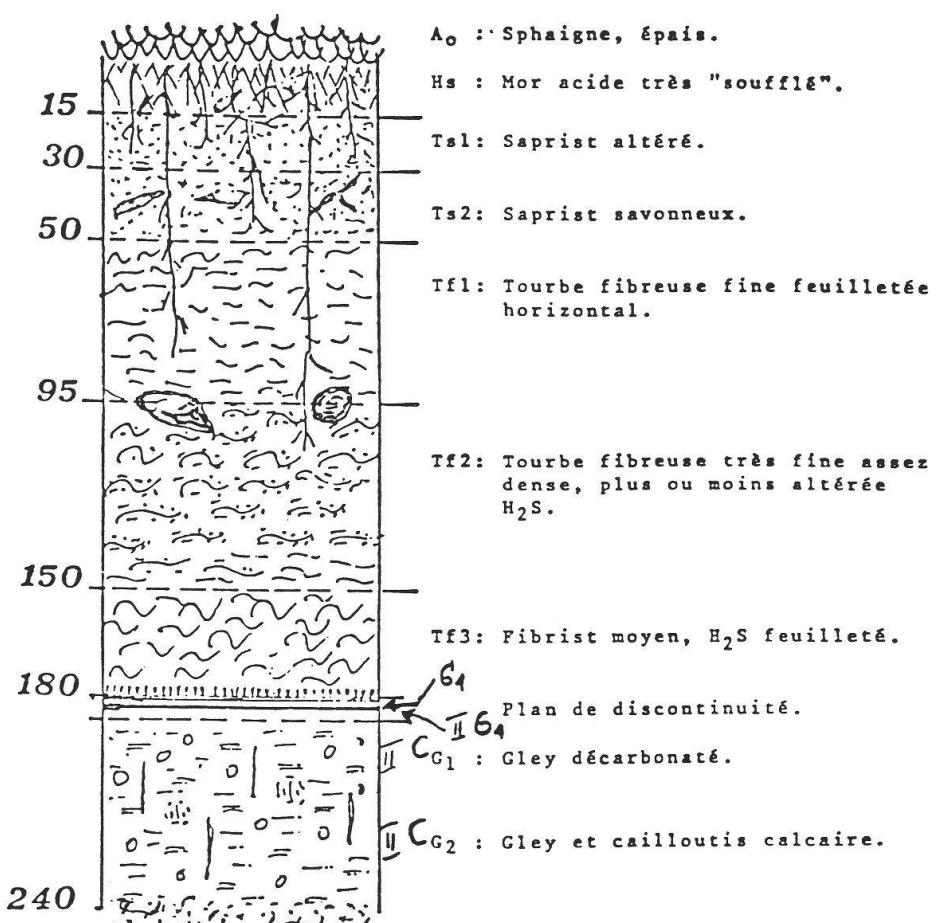
Pour les deux types de tourbe, fibrast (marais acide BD 3) et saprist (marais amendé BD 12), des prélèvements ont été faits dans les horizons supérieurs et inférieurs, afin de voir l'influence du drainage et de la mise en prairie de la tourbe.

BD 3 0-20 cm échantillon 5915

BD 3	75-110 cm	échantillon 5920
BD 12	0-18 cm	échantillon 5989
BD 12	70-80 cm	échantillon 5993

##### 4.7.2. Analyse élémentaire des échantillons

L'analyse des éléments organiques (tab. 4) renseigne sur les changements du contenu organique et minéral de la tourbe en fonction du drainage et de la mise en culture; par exemple, le rapport C/N est plus grand dans le milieu naturel que dans le milieu cultivé. Les éléments majeurs sont aussi beaucoup plus abondants dans la tourbe mise en culture, en voie de minéralisation.



**Figure 7:** Profil pédo-logique de la bordure du marais (BD 3), à l'orée du Bois des Lattes, se présentant comme un fibrast épais (180 cm) reposant sur un gley carbonaté, en hydromorphie permanente.

#### 4.7.3. Spectres R.M.N. des échantillons 5915, 5920, 5989, 5993 (acides humiques)

Les spectres R.M.N. (tab. 5) apportent des renseignements intéressants sur la nature et l'évolution des acides humiques. Dans la tourbe acide, on trouve plus de fonctions esters (carbone  $\alpha$ -oxygène) R-COO-R que dans le marais amendé. En revanche, le % aromatique - plus élevé dans la tourbe cultivée - marque bien le caractère aromatique des acides humiques plus prononcé que dans la tourbe acide.

#### 4.7.4. Pouvoir complexant des échantillons 5915, 5920, 5989, 5993

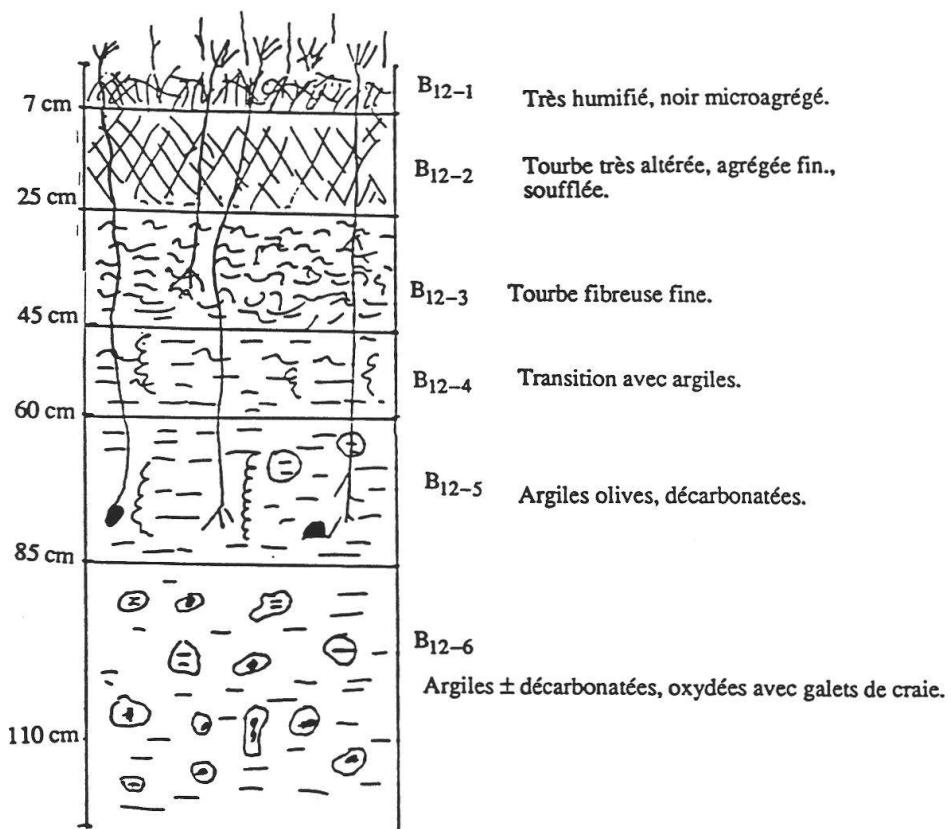
Le pouvoir complexant de la matière organique hydrosoluble vis-à-vis du fer est à rapprocher des % aromatiques déterminés par R.M.N. Les acides humiques en

milieu amendé sont jusqu'à deux fois plus complexes qu'en milieu acide (tab. 6).

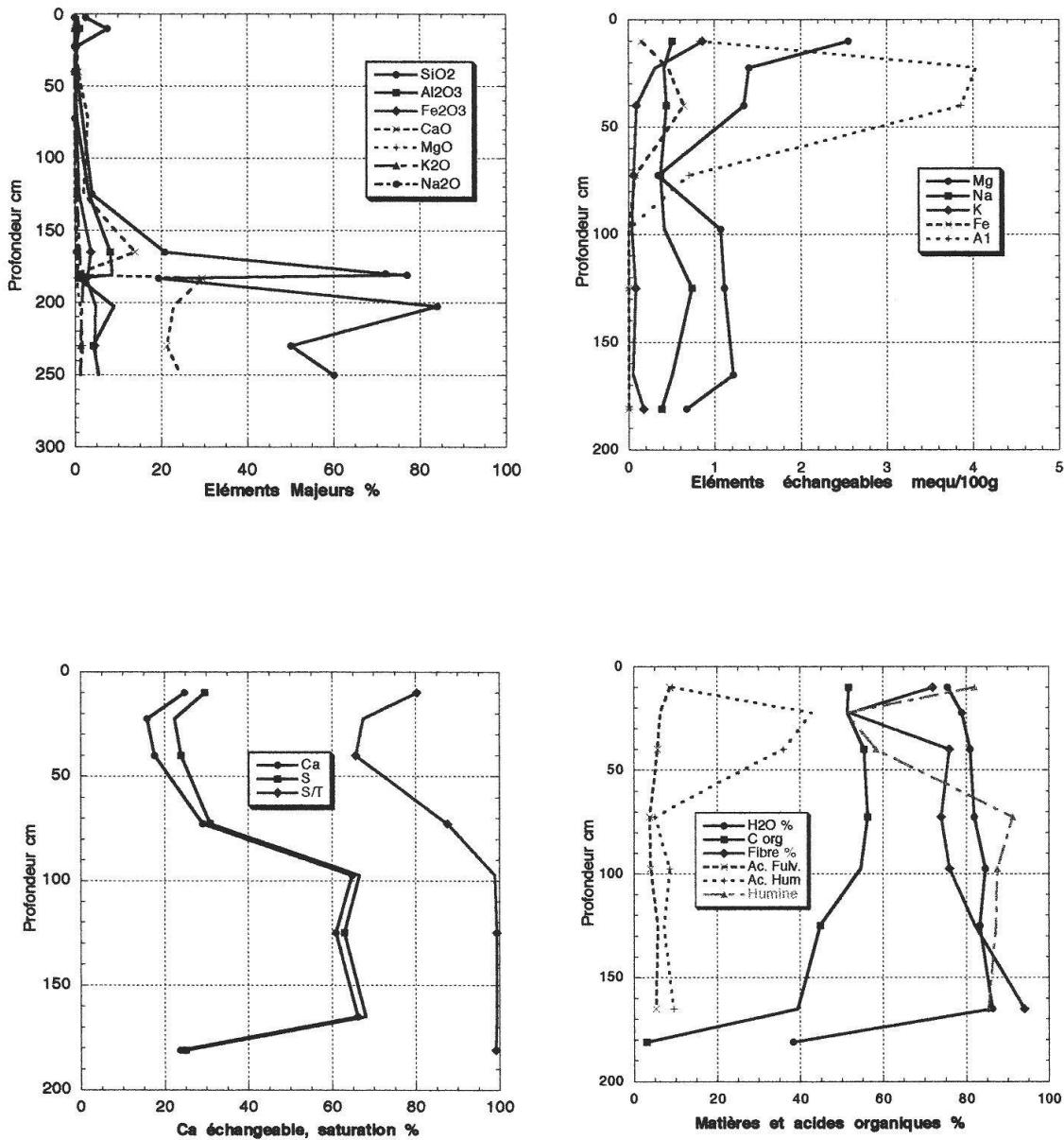
#### 4.7.5. Séparation des acides humiques et fulviques après filtration sur membrane moléculaire pour extraits aux différents solvants

On sépare tout d'abord par filtration sur membrane moléculaire les acides fulviques et les acides humiques d'après leurs poids moléculaires; ensuite dans chaque lot obtenu, on sépare les différentes molécules d'après leur polarité avec trois solvants de polarités différentes, éther, n-butanol et acétate d'éthyle.

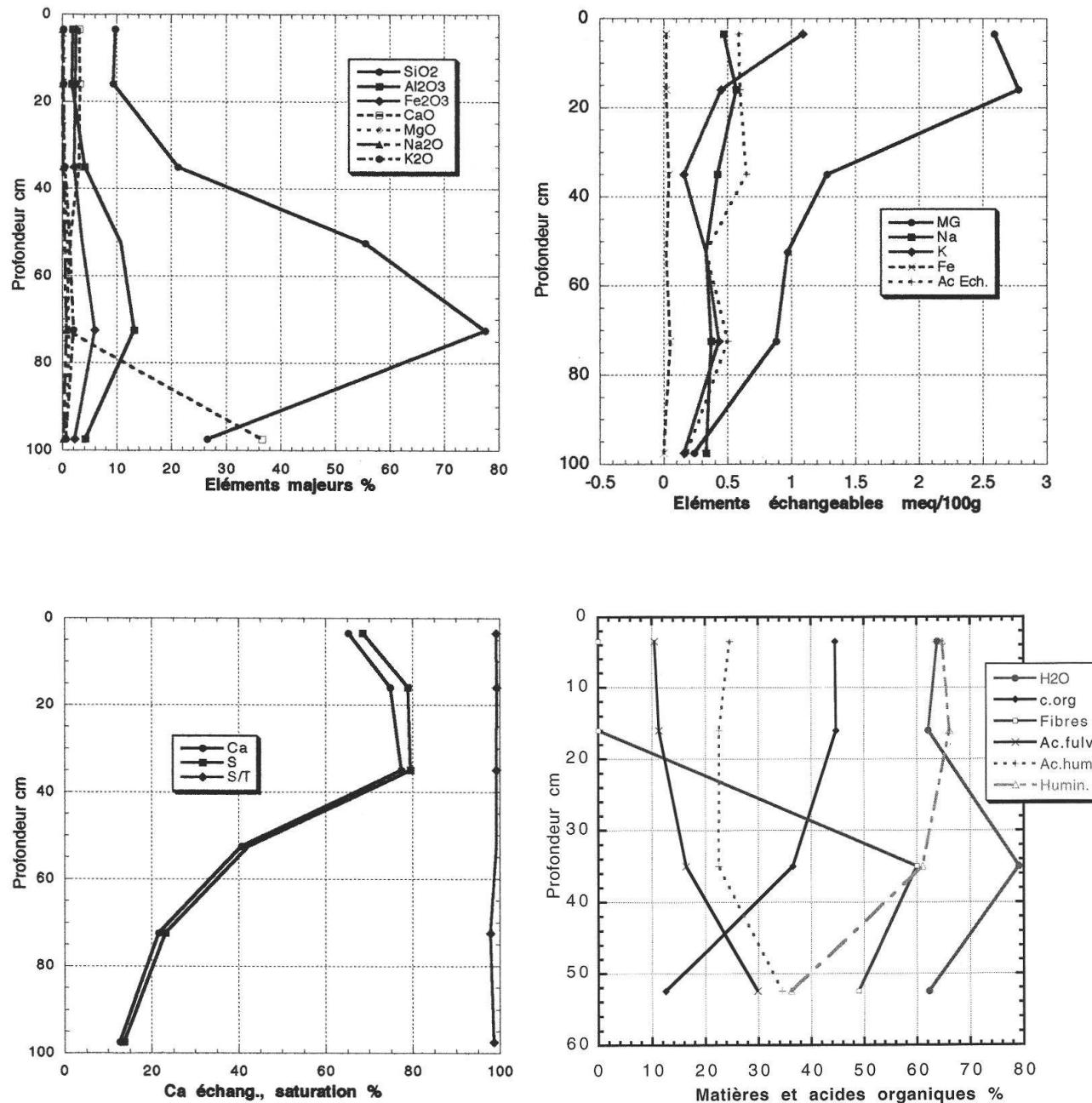
Après cette séparation, on pourra estimer l'importance de la migration des molécules organiques édaphiques en fonction de leurs tailles et de leurs poids moléculaires.



**Figure 8:** Profil pédologique de la zone périphérique du marais acide mise en prairie et drainée (BD 12) au voisinage des sols bruns: saprist humifié, peu épais, bien aéré, reposant sur un gley décarbonaté (10 cm), lequel surmonte un cailloutis altéré et largement poreux.

**Figure 9:** Profil du marais acide BD 3

- Eléments majeurs (en haut, à gauche)
- Eléments échangeables (en haut, à droite)
- Calcium échangeable et S/T = taux de saturation en cations métalliques du complexe absorbant (en bas, à gauche)
- Matières organiques: acides fulviques (Ac. Fulv.), acides humiques (Ac. Hum.), fibres, carbone organique (C. org.) humine et eau (en bas, à droite)
- T=capacité totale d'échange = quantité maximale de cations métalliques que le sol peut fixer
- S=somme des cations métalliques échangeables = quantité totale des cations alcalins ou alcalino-terreux actuellement retenus, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>



**Figure 10:** Profil du marais amendé BD 12

- Eléments majeurs (en haut, à gauche)
- Eléments échangeables (en haut, à droite)
- Calcium échangeable et S/T = taux de saturation (en bas, à gauche)
- Matières organiques: acides fulviques (Ac. Fulv.), acides humiques (Ac. Hum.), fibres, carbone organique (C. org.) humine et eau (en bas, à droite)

[Quarz: Qz; Feldspaths potassiques: FK; Albite: Ab; Smectite-lille: smic; Kaolinite: Kaol; Chlorite: HAF; Chlori; Hydroxy-Al(Fe): HAF]

Point 1	Poudres: Qz, calc, FK, chlorite						
15 $\mu$ 2 $\mu$	Qz Qz	FK	Ab	mica mica	chlor chlor	kaol kaol	chlor-smect chlor-smect
Point 2	Poudres: Qz, calc, dolomite, FK.						
16 $\mu$ 2 $\mu$	Qz Qz	FK	Ab	mica mica	chlor chlor	kaol kaol	chlor-smect chlor-smect
Point 3	(Profil BD 3) Poudres: Qz, FK, Ab, chlor, illite						
16 $\mu$ 2 $\mu$	très mauvais diagramme Qz	chlor	kaol	illite avec HAF • prélevement entre 185 et 220 cm	chlor	kaol	chlor-smect décarbonaté
Point 4	Poudres: Qz, calcite, dolomite						
16 $\mu$ 2 $\mu$	Qz --	FK	Ab	mica mica	chlor chlor	kaol kaol	chlor-smect
Poudres: Qz, calcite, dolomite, FK, Ab							
16 $\mu$ 2 $\mu$	Qz Qz	FK	Ab	mica mica	chlor chlor	kaol kaol	chlor-smect
Point 12	(Profil BD 12) a) sol surmontant le point de prélevement						
16 $\mu$ 2 $\mu$	Qz Qz	FK	Ab	chlor chlor	chlor chlor	illite illite	chlor-smect (très peu) chlor-smect (peu)
Point 12	1) partie contenant des traces de calcaire: Poudres: Qz, FK, Ca						
16 $\mu$ 2 $\mu$	Qz Qz	FK	Ab	chlor chlor	chlor chlor	illite illite	chlor-smect (très peu) chlor-smect (peu)
Point 12	2) partie ne contenant pas de calcaire Poudres: Qz, FK, Ab (tendance à avoir HAF)						
16 $\mu$ 2 $\mu$	Qz Qz	FK	Ab	chlor chlor	chlor chlor	illite illite	pas d'interstratifiés pas d'interstratifiés
Point 12	b) gley au niveau du prélevement						
Point 12	1) partie décarbonatée en partie Poudres: Qz, FK, Ab, calc (très peu)						
16 $\mu$ 2 $\mu$	Qz Qz	chlor chlor	kaol kaol	illite illite	illite illite	HAF HAF	pas d'autres interstratifiés pas d'autres interstratifiés
Point 12	2) partie complètement décarbonatée Poudres: Qz, FK, Ab						
16 $\mu$ 2 $\mu$	Qz Qz	chlor chlor	kaol kaol	illite illite	illite illite	chlor-smect chlor-smect	chlor-smect chlor-smect
Point 12	3) partie carbonatée Poudres: Qz, FK, Ab, calc						
16 $\mu$ 2 $\mu$	Qz Qz	FK	Ab	chlor-kaol chlor-kaol	chlor-kaol chlor-kaol	illite illite	smic smic

Point 5

- Prélèvement entre le niveau supérieur du gley et -15 cm  
Poudres: Qz, Ab, FK, illite, absence de carbonates. 16 et 2  $\mu$ : pas de diagramme

- Prélèvement entre -15 et -35 cm

	Poudres: Qz, FK, Ab, illite, absence de carbonates		
16 $\mu$	Qz	FK	Ab
2 $\mu$	Qz	- -	- -

**Tableau 3:** Analyse minéralogique (rayons X) des argiles en contact avec les eaux prélevées et analysées.

Bois des Lattes, tourbe naturelle - BD 3													
Echant.	Prof. (cm)	pH	AF/AH	C%	H%	N%	O%	S%	H/C	N/C	O/C	S/C	
5915	0-20	4,0	0,19	55,8	4,59	2,22	35,01	0,48	0,99	0,034	0,47	0,003	
5920	75-110	5,9	2,65	54,5	5,72	3,09	20,7	0,86	1,26	0,049	0,29	0,006	

Echant.	Eléments totaux (% m.s*)								Eléments échangeables (meq/100 g m.s.*)					
	SiO <sub>2</sub>	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	cen-dres	K	Ca	Mg	Aci-dité	T	S/T
5915	3,39	0,005	0,10	0,66	0,02	0,32	0,41	6,12	0,36	29,14	2,11	3,40	35,01	98,29
5920	7,61	0,011	0,53	2,12	0,14	0,46	0,62	15,11	0,05	53,59	4,10	0,53	58,27	99,04

\* = matière sèche

Brot-Dessus, tourbe cultivée - BD 12													
Echant.	Prof. (cm)	pH	AF/AH	C%	H%	N%	O%	S%	H/C	N/C	O/C	S/C	
5984	0-18	6,0	0,25	50,61	4,37	3,14	36,71	0,69	1,03	0,053	0,54	0,005	
5993	70-80	6,2	0,63	53,02	4,34	3,38	33,69	0,56	0,98	0,055	0,48	0,004	

Echant.	Eléments totaux (% m.s*)								Eléments échangeables (meq/100 g m.s.*)					
	SiO <sub>2</sub>	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	cen-dres	K	Ca	Mg	Aci-dité	T	S/T
5984	8,29	0,010	0,30	3,43	0,12	1,50	1,04	17,4	0,94	60,98	4,54	0,63	67,09	99,06
5993	46,16	0,047	1,36	1,46	0,52	2,23	5,93	64,77	0,33	64,21	3,21	0,49	48,24	99,98

\* = matière sèche

**Tableau 4:** Analyse élémentaire de deux horizons des deux profils pédologiques BD 3 et BD 12, en surface et en profondeur

Echantillon	% aliphatique 0.5-2.5 ppm	% carbone a oxygène 3-4.7 ppm	% aromatique 6.4-8.5 ppm
Bois des Lattes: tourbe naturelle BD 3			
5915	35,37	53,4	11,23
5920	48,90	44,56	6,55
Brot-Dessus: tourbe cultivée BD 12			
5989	33,4	35,9	30,8
5993	48,1	24,0	27,0

**Tableau 5:** Spectres R.M.N. des acides humiques, extraits de deux horizons des deux profils pédologiques BD 3 et BD 12, en surface et en profondeur

Bois des Lattes, tourbe naturelle BD 3			Brot-Dessus, tourbe cultivée BD 12		
Echantillon	log β1	Poids équivalent (g/mole)	Echantillon	log β1	Poids équivalent (g/mole)
5915	5,42	1700	5989	5,70	1800
5920	5,45	1200	5993	5,57	1400

**Tableau 6:** Pouvoir complexant de la matière organique extraite de deux horizons des deux profils pédologiques BD 3 et BD 12, en surface et en profondeur.

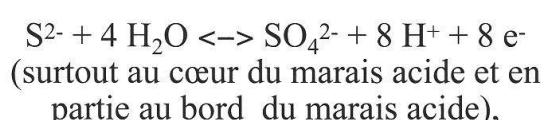
## 5. DISCUSSION

### 5.1. Comportement général

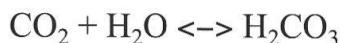
On constate in situ que l'importance de la minéralisation des eaux prélevées est proportionnelle à l'importance de la décarbonatation du gley sous-jacent (fig. 6) et corrélativement à l'importance du drainage. En se rapportant à la figure 4, on constate que la minéralisation des eaux

diminue lorsqu'on passe du marais amendé au bord du marais acide, puis au cœur du marais acide. Les protons attaquant la matrice carbonatée ont deux origines:

1. l'oxydation des sulfures selon l'équation suivante:



## 2. la formation de $\text{H}_2\text{CO}_3$ selon:



(surtout dans le marais amendé et en partie dans les bords du marais acide), l'attaque des carbonates se faisant alors comme suit:



### **5.2. Etude des coefficients de corrélation entre paramètres mesurés dans les eaux; “effet piston” et dilution en fonction des précipitations (nombre d'échantillons N=37 pour chaque point d'eau)**

#### 5.2.1. Phase carbonatée

L'attaque des carbonates contenus dans les gleys s'illustre par les coefficients de corrélation linéaire suivants:

- Dans la région du bord du marais acide (points 1, 2, 3, 5, 6):

Tout d'abord les bonnes corrélations entre pH et  $[\text{Ca}^{2+}]$  ( $r = +0,81$ ), pH et  $[\text{Mg}^{2+}]$  ( $r = 0,76$ ) confirment l'attaque des carbonates par les protons; à ces points de prélèvements, on note les corrélations suivantes: dureté temporaire -  $[\text{Ca}^{2+}]$  ( $r = +0,91$ ); dureté temporaire -  $[\text{Mg}^{2+}]$  ( $r = 0,76$ ); dureté temporaire-conductivité ( $r = +0,90$ ); dureté temporaire-[fer] ( $r = +0,97$ ). Tous ces paramètres obéissent à la dilution, sauf  $[\text{K}^+]$  qui au contraire augmente avec les précipitations (“effet piston”), ainsi que la matière organique.

- Cœur du marais acide (point 4):

Ici, pas de corrélation entre dureté totale et ions  $[\text{Ca}^{2+}]$ ,  $[\text{Mg}^{2+}]$ ,  $[\text{Fe}^{2+}]$ , ni la conductivité. On remarque in situ que le gley au lieu de prélèvement est carbonaté jusqu'au haut du profil; il n'y a pas non plus d'effet de dilution marqué par les ions, mais il y a un effet piston pour  $\text{K}^+$ .

- Sortie du marais acide, dans le sens de l'écoulement du bief (point 7), apparaissent de bonnes corrélations entre les concentrations des ions libérés de la gangue carbonatée ( $r$  dureté temporaire -  $[\text{Ca}^{2+}] = +0,97$ ;

$r$  dureté temporaire -  $[\text{Mg}^{2+}] = +0,72$ ). En revanche, le  $[\text{Fe}^{2+}]$  ici n'est pas bien corrélé avec la dureté temporaire, mais l'est bien avec le  $[\text{Mg}^{2+}]$ . Deux hypothèses peuvent alors être émises:

- soit, après l'attaque des carbonates, le fer libéré précipite à cause du pH plus élevé que dans les eaux recueillies au cœur du marais (ici  $\text{pH} = 6,7$ );

- soit le fer accompagne le cortège silicaté et, comme  $\text{Mg}^{2+}$ , vient des chlorites ferrifères.

Marais amendé (points 9 et 12):

On y constate une bonne corrélation entre  $[\text{Ca}^{2+}]$  et dureté ( $r = +0,97$ ),  $[\text{Ca}^{2+}]$  et conductivité ( $r = +0,96$ ), une moins bonne entre  $[\text{Mg}^{2+}]$  et  $[\text{Ca}^{2+}]$  ( $r = +0,51$ ), entre  $[\text{Mg}^{2+}]$  et conductivité ( $r = +0,47$ ); ici le fer n'est absolument pas corrélé avec la dureté et la conductivité, ni avec  $[\text{Ca}^{2+}]$ .

#### 5.2.2. Phase silicatée

Bord du marais acide (points 1, 2 et 3): pas de corrélation significative entre  $\text{SiO}_2$  et les autres éléments.

Cœur du marais acide (point 4): pas de corrélation significative entre le  $\text{SiO}_2$  et les autres éléments.

#### Sortie du marais acide

- Point 5: Les paramètres sont ici moyennement corrélés avec la silice:  $\text{SiO}_2\text{-Fe}$  ( $r=+0,52$ );  $\text{SiO}_2\text{-K}$  ( $r=+0,78$ );  $\text{Fe-K}$  ( $r=+0,57$ );  $\text{Fe-Na}$  ( $r=+0,64$ );  $\text{Fe-Cond}$  ( $r=+0,67$ );  $\text{Fe-T}^\circ\text{C}$  ( $r=+0,56$ );  $\text{Fe-Mg}$  ( $r=+0,82$ ); en revanche  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  ne le sont pas. Ces corrélations peuvent s'expliquer par la présence dans les gleys, dans la fraction  $<16\mu$  de feldspaths potassiques, de chlorite, de kaolinite, d'illite (peu).

- Point 6: On observe les mêmes corrélations qu'au point 5.

- Point 7: L'analyse factorielle des correspondances a mis en relief  $\text{SiO}_2$  pour ce point (BOUYER & KÜBLER, 1981).

- pH,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $SiO_2$  ont tendance à être corrélés entre eux (présence dans les sols au point 7, d'illite et de chlorite).
- Fer filtré,  $Mg^{2+}$ ,  $SiO_2$  sont bien corrélés ( $r > +0,75$ ), cette association ayant déjà été rencontrée.

#### Marais amendé (points 9 et 12)

De bonnes corrélations existent entre Mg et Fe ( $r = +0,70$ ), entre Mg et  $SiO_2$  ( $r = +0,82$ ) et entre Fe et  $SiO_2$  ( $r = +0,70$ ), et attestent donc l'appartenance de ces éléments à la phase silicatée attaquée par le  $CO_2$ . L'analyse des sols indique la présence de quartz, de feldspaths potassiques, d'albite, d'illite, de chlorite-smectite et chlorite-kaolinite (BOUYER *et al.*, 1978).

En ces points de prélèvements, dans les horizons profonds, l'illite est absente dans le marais amendé, alors qu'il y a des smectites: le pompage du potassium par les plantes, dont les racines peuvent atteindre les gleys situés en dehors de l'hydromorphie, pourrait avoir transformé les illites en smectites. Le potassium dans ces eaux n'a plus de corrélation avec les autres cations. Dans les parties fortement décarbonatées, on trouve des hydroxy-Al(Fe) (POCHON, 1978).

#### *5.2.3. Attaque des gleys*

- Dans le marais acide, le fer analysé dans les eaux *in situ* est bien corrélé avec la phase carbonatée (sauf au point 4: cœur du marais acide, où l'on n'observe aucune décarbonatation du gley), ainsi qu'à la sortie du marais; points 1, 2, 3, 5, 6, 7).

De plus aux points 5, 6 et 7 (sortie du marais), le fer appartient doublement à la phase carbonatée et silicatée, car ici le gley est très décarbonaté.

- Dans le marais amendé et cultivé, le fer appartient à la phase silicatée (les sols ne contiennent plus de calcite), ce qu'indique une bonne corrélation Si-Fe, Si-Mg, Fe-Mg, alors que Fe n'est plus lié à la dureté.

On rappellera à ce propos que PEDRO & MELFI (1970) ont démontré la labilité des liaisons Si-O-Fe en milieu lessivé, ce qui semble être le cas dans le marais amendé, grâce à une activité biologique produisant du  $CO_2$ .

#### *5.2.4. Matière organique hydrosoluble et fer*

De bonnes corrélations existent entre la matière organique et la température [ $+0,50$  (marais acide)  $< r < +0,70$  (marais amendé)] et montrent qu'une fraction de la matière organique hydrosoluble est fraîche et apparaît avec l'activité biologique des sols, forte dans le marais amendé, plus faible dans le marais acide.

##### a) Rôle acidifiant (bord du marais acide)

Le rapport C/N dans les tourbes du bord du marais et de la sortie du marais (points 1, 2, 3, 5, 6) est compris entre 21 et 30, ce qui indique une matière organique peu évoluée d'après GOBAT *et al.* (1998). Son rôle se borne ici, par son acidité, à attaquer le substratum carbonaté (bonne corrélation entre pH, dureté totale et ions libérés des carbonates). L'analyse factorielle des correspondances (BOUYER & KÜBLER, 1981) pour cette région fait apparaître l'association  $MO-SO_4-T^\circ C$ , l'oxydation de la matière organique faisant apparaître des protons. On a démontré que cette matière organique était peu complexante vis-à-vis du fer (cf. titration avec électrode spécifique au cuivre).

##### b) Rôle complexant

- Point 4 (cœur du marais acide)

C'est le point de prélèvement le moins bien drainé. Sur le terrain, en allant du bord du marais au cœur du marais, la tourbe fibril est passe à une tourbe plus évoluée (saprist). Ici le coefficient de corrélation  $r$  matière organique-Fer =  $+0,86$  et  $r$  matière organique-température =  $+0,70$  met en évidence le rôle complexant de la matière organique.

- Points 9 et 12 (marais amendé)

Le rapport C/N compris entre 13 et 18 dans les sols correspondant aux points de prélèvements d'eau, indique une évolution de la matière organique des sols et un plus grand pouvoir complexant vis-à-vis du fer ( $r$  matière organique-fer = +0,70;  $r$  matière organique-température = +0,55, et  $r$  température-SO<sub>4</sub> = +0,73).

### **5.3. Comparaison des propriétés chimiques des deux profils BD 3 (milieu acide) et BD 12 (milieu amendé)**

#### **5.3.1. Taux d'acides humiques**

Le taux global d'acides humiques est plus faible et plus constant tout au long du profil BD 12 (marais amendé), tandis qu'au profil BD 3 (marais acide), ce taux est plus important avec accumulation aux horizons BD 3-2 (15 à 30 cm) et BD 3-3 (30 à 50 cm) au niveau de la tourbe "saprist".

#### **5.3.2. Taux d'humine**

Ce taux est plus important dans le profil BD 3 (tourbe acide) que dans le profil BD 12 (tourbe amendée), ce qui traduit une moins grande évolution de cette tourbe en hydromorphie soit permanente, soit alternée.

#### **5.3.3. pH**

Il est en général plus acide le long du profil BD 3 (marais acide) que du profil BD 12 (marais amendé).

#### **5.3.4. Rapport C/N**

Il est plus important pour le profil BD 3 (marais acide) que pour le profil BD 12 (marais amendé). Plus le rapport est faible, plus la matière organique est complexante. La chromatographie sur couche mince révèle des sites d'amines fortement complexes pour la matière organique du marais amendé.

#### **5.3.5. Accumulation à certains horizons des minéraux (figs 9 et 10)**

Il y a accumulation de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> et MgO à l'horizon BD 12-5 (60-85 cm; marais amendé), tandis que pour le profil BD 3 (marais acide), il y a accumulation de SiO<sub>2</sub> et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à l'horizon BD 3-8 (181-185 cm); celle de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et MgO se fait plutôt à l'horizon BD 3-9 (185-220 cm) (présence de chlorite, de chlorite-smectite dans les deux fractions <2µ et <16µ).

Dans tous les horizons décarbonatés, il y a présence d'hydroxy-Al(Fe), mais pas aussi bien formés que chez POCHON (1978). Le gley au point 3 est plus fin, plus limoneux qu'au point 12 où l'on trouve des morceaux de calcaire ferrugineux et des matériaux alpins tels que des feldspaths, de la silice.

La granulométrie différente fait que le fer sera mieux retenu sur les particules fines des argiles du point 3 (marais acide) que dans les argiles du point 12 (marais amendé).

### **5.4. Distribution de la matière organique en fonction du poids moléculaire et de sa polarité (tab. 7a et 7b)**

- Dans les horizons supérieurs, les acides fulviques du marais acide, de faibles poids moléculaires, sont apolaires, tandis que ceux du marais amendé sont polaires.

- On constate que pour les horizons inférieurs, l'effet s'inverse et ce sont les acides fulviques de faibles poids moléculaires du marais amendé qui sont apolaires, alors que ceux du marais acide sont polaires.

- Les acides humiques, quels que soient leurs poids moléculaires, sont tous polaires pour les deux profils, tourbière acide et amendée.

De plus, c'est la fraction R4 ( $10^4 <$  poids moléculaire  $< 25 \cdot 10^3$ ) pour tous les horizons, qui est la plus abondante en acides humiques.

### **5.5. Spectres N.M.R. des acides humiques (tab. 5)**

- Le % aliphatique est à peu près identique pour les mêmes niveaux dans les deux tourbes (cultivée amendée et acide), mais avec une proportion plus grande pour les niveaux inférieurs.

- Le % aromatique est moins grand dans la tourbe naturelle que dans la tourbe cultivée, avec une abondance plus grande dans les niveaux supérieurs qu'inférieurs pour la tourbe naturelle. Dans la tourbe cultivée, la différence est moins grande. Les aromatiques (hydroxybenzoïques, phénol, etc...) sont également de bons complexants vis-à-vis du fer.

- Le rapport N/C traduisant l'importance des produits protéiques (également complexes) est également plus grand pour les acides humiques issus des tourbes cultivées que pour les mêmes acides issus des tourbes acides.

### **5.6. Délocalisation du fer par les sidérobactéries (fig. 5)**

On remarque qu'en général les sidérobactéries sont plus abondantes dans les eaux du bord du marais (points 1, 2, 6 et 7) et surtout dans les eaux du marais amendé, c'est-à-dire à des pH moins acides. Leur nombre augmente aussi avec la température; en plus d'une progression régulière en fonction du gradient thermique, il existe des explosions ponctuelles: par exemple, le prélèvement fait le 1.5.1978, où la concentration en fer au point 12 est de 14,11 mg/l, révèle un nombre si grand de sidérobactéries qu'il en devient indéterminable. Une semaine avant, la concentration en fer commence à augmenter. C'est surtout après une période sèche suivie de fortes pluies que ces événements exceptionnels surviennent. Une semaine après, nous retrouvons des taux correspondant aux teneurs saisonnières ([fer]  $\approx$  2,0 mg/l).

Les sidérobactéries sont donc bien impliquées dans la délocalisation du fer.

### **5.7. Influence des saisons et des précipitations sur le chimisme des eaux**

Interprétations globales d'après l'analyse factorielle des correspondances selon BOUYER & KÜBLER (1981)

#### *5.7.1. Bord du marais acide (points 1, 2, 3) et cœur du marais (point 4 et 5)*

##### a) Rôle des saisons

La matière organique (fraîche?) apparaît surtout entre mai et juillet, puis en octobre et novembre; un mois après, il y a augmentation des sulfates de façon constante.

L'association matière organique-sulfates-phosphates est importante tout le temps pour les points 4 et 5, mais au bord du marais, elle n'est importante qu'en janvier. (Rappel: Au cœur du marais [points 4 et 5] seulement, la matière organique est liée au fer, mais n'attaque pas le substratum carbonaté!).

##### b) Rôle des précipitations atmosphériques

Les fortes précipitations ont pour conséquences:

- une diminution de la dureté totale, de la dureté temporaire, du calcium, de la conductivité, du magnésium, du strontium, du sodium, de la silice et du pH (particulièrement le 1.6.1975 pour les points 1, 2, 3, 4 et 5);
- une augmentation de la matière organique, de sulfate, de fer filtré, d'oxygène dissous et de potassium (lixivation).

En dehors de ces précipitations, la forte montée du fer (9.8.1974 et 9.9.1974) traduit quand même une certaine activité biologique.

#### *5.7.2. Sortie du marais acide (points 6 et 7)*

Ces points, comme les points 1, 2, 3, 4, 5 (bord du marais-coeur du marais) sont influencés dans l'association matière organique  $\text{SO}_4^{2-}$ , et  $\text{PO}_4^{3-}$  par les fluctuations

## a) Acides fulviques

Bois des Lattes BD 3												Echantillon 5915		
Ether				n-Butanol				Acétate d'éthyle						
Fraction en %														
R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>			
5 4	2	2 6	5 1	2 9	7 6	3 3	3 6	1 7	2 2	4 1	1 2			

Brot-Dessus BD 12												Echantillon 5920		
Ether				n-Butanol				Acétate d'éthyle						
Fraction en %														
R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>			
2 7	3 1	3 2	2 2	4 4	2 5	4 0	4 7	2 8	4 4	2 8	3 2			

## b) Acides humiques

Bois des Lattes BD 3												Echantillon 5915		
Ether				n-Butanol				Acétate d'éthyle						
Fraction en %														
R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>			
1 4	1 1	4	4 5	6 2	7 1	8 8	3 3	2 3	1 8	8	2 2			

Brot-Dessus BD 12												Echantillon 5920		
Ether				n-Butanol				Acétate d'éthyle						
Fraction en %														
R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>			
1 0	1 3	9	2 8	7 6	5 7	7 3	5 5	1 4	3 0	1 7	1 7			

Brot-Dessus BD 12												Echantillon 5989		
Ether				n-Butanol				Acétate d'éthyle						
Fraction en %														
R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>			
3	3	0,6	1 5	8 8	9 2	4 5	7 5	9	5	5	1 0			

Brot-Dessus BD 12												Echantillon 5993		
Ether				n-Butanol				Acétate d'éthyle						
Fraction en %														
R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	F <sub>4</sub>			
3 0	1 3	1 2	3 9	5 3	7 0	6 5	4 5	1 6	1 7	2 2	1 6			

**Tableau 7:** Répartition des fractions d'acides fulviques et d'acides humiques, extraits de deux horizons des deux profils pédologiques BD 3 et BD 12, en surface et en profondeur, en fonction de leurs tailles et de leurs polarités.

saisonnier, mais en plus par de fortes précipitations induisant une augmentation en  $\text{SiO}_2$  et de fer associé (hydrolyse des liaisons Si-O-Fe).

#### 5.7.3. Marais amendé (points 9 et 12)

Une teneur élevée en fer total, potassium, sodium, sulfates,  $\text{H}^+$  et phosphates caractérise les eaux de cette région, surtout en été et au début du printemps, ce qui correspond bien à l'activité biologique des sols. Ici l'exportation de ces paramètres est indépendante des précipitations. On note également le 1.5.1978 et le 9.8.1974 une augmentation du fer (qui correspond également à une augmentation de  $\text{pCO}_2$  dans les sols). De plus, dans ce marais, on voit que  $\text{NO}_3^-$  et Fe sont nettement inversement corrélés (rôle oxydant des  $\text{NO}_3^-$  sur  $\text{Fe}^{2+}$  qui précipite sous forme de  $\text{Fe}^{3+}$ ).

### 5.8. Influences de quelques paramètres inhabituels

#### 5.8.1. Période automnale du 12.9.1977 au 14.11.1977.

Ces remarques portent sur les eaux prélevées hebdomadairement aux points 3 (bord du marais acide), 9 et 12 (marais amendé), issues de sols qui constituent un système ouvert (production de  $\text{CO}_2$ ). Malgré la pluie, l'hydromorphie n'est pas permanente; la température assez élevée favorise l'activité biologique, et par conséquent, une dureté temporaire relativement élevée; la teneur en fer total est aussi élevée, toute proportion gardée, pour les trois points soit par attaque du substrat carbonaté pour le point 3 (marais acide), soit par départ du fer associé aux silicates et à la matière organique pour les points 9 et 12. Pendant cette période, le déplacement des sidérobactéries est également favorisé par les fortes pluies automnales.

#### 5.8.2. Période hivernale du 14.11.1977 au 6.2.1978

La neige recouvre le sol, entraînant la fermeture du système. Pour les points 9 et 12, après un pic transitoire (du 24.10 au 19.12.1977) de  $\text{pCO}_2$ , du fer, de la température et de la plupart des paramètres, on assiste à un abaissement du contenu chimique des eaux. En revanche, les concentrations des paramètres du point 3 baissent régulièrement dès le début de cette période.

#### 5.8.3. Période du 6.2.1977 au 26.6.1978 (passage de l'hiver au printemps)

Dans un premier temps, la pluie et la neige fondue imbibent les sols; l'hydromorphie est très forte pour ces trois points. La teneur en fer baisse encore pour remonter dès le 21.4.1978 pour les points 9 et 12, et dès le 5.6.1978 pour le point 3. Pendant cette période, au contraire, la concentration des nitrates est à son plus haut niveau. En même temps, la dureté temporaire remonte pour les trois points, mais plus tardivement pour le point 3. La concentration en matière organique s'accroît également, mais en proportion, ce sont les eaux du point 3 qui connaissent la plus grande remontée en matière organique, en même temps qu'un abaissement en oxygène dissous.

Durant la période pour laquelle la concentration en nitrates est élevée, la concentration en fer y est fortement abaissée lors de très fortes pluies (6.3.1978).

Le 1er mai 1978, pendant la remontée du fer, on a un pic qui dépasse largement la moyenne de cette période, pour atteindre 14 mg/l. On remarque alors *in situ* que les eaux colmatent les filtres de 0,45  $\mu$ , et qu'il s'y trouve de nombreux colloïdes argileux. On note alors 13,9 mm de pluie provoquant une sorte de "lessivage" des sols.

### **5.9. Variations des paramètres à l'échelle journalière mesurées au point 6 (sortie du marais acide) (point 6)**

#### *5.9.1. Mesures de pCO<sub>2</sub> dans les sols après une nuit de pluie*

On confirme que les sols à activité biologique intense produisent plus de CO<sub>2</sub> que les autres. On met également en évidence les paramètres chimiques liés à la production de CO<sub>2</sub>. La méthode de mesure est décrite par MISEREZ (1973).

##### a) Orée du Bois des Lattes

Association de bouleaux et de carex; profondeur 10 cm: 0,17% (nombre de mesures n = 5); profondeur 30 cm: 0,33% (n = 5).

##### b) Dans la litière de la forêt de bouleaux

Profondeur 10 cm: 0,30% (n = 5); profondeur 30 cm: 0,33% (n = 5).

D'après ces résultats, on voit donc que dans ce genre de sol, apparenté à ceux du marais amendé, on est en milieu ouvert avec une production de CO<sub>2</sub> par activité biologique.

#### *5.9.2. Autres paramètres (figs 11 et 12)*

D'après ces figures, on voit qu'après une nuit de pluie abondante (nuit du 2 au 3 septembre 1976), il y a abaissement de pCO<sub>2</sub> dans les eaux du point 6, accompagné de celui de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SiO<sub>2</sub>, fer total, conductibilité, Na<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, dureté totale et temporaire, alors que matière organique, K<sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et S<sup>2-</sup> remontent. Les paramètres suivants sont groupés en fonction de leurs comportements identiques:

- dureté totale, dureté temporaire, conductibilité, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>
- fer total et fer filtré
- K<sup>+</sup>, matière organique
- demande chimique en oxygène (D.C.O.),
- PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ces deux derniers groupes étant plus ou moins liés.

Ces associations sont bien celles observées à l'analyse factorielle des correspondances portant sur un échantillonnage mensuel et hebdomadaire. En quelque sorte, ce qui est minéral a tendance à diminuer après une pluie, alors que ce qui est organique ou lié à la matière organique (matière organique, potassium, phosphates, sulfates) augmente.

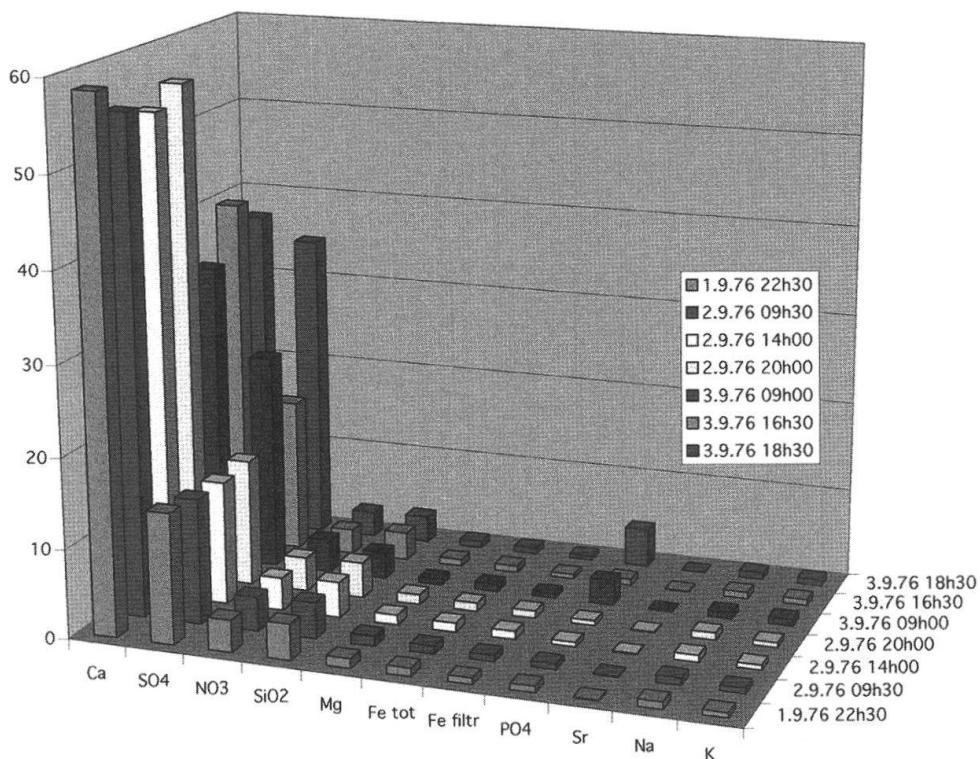
## 6. CONCLUSIONS

### **6.1. Les minéraux des argiles dans les sols étudiés**

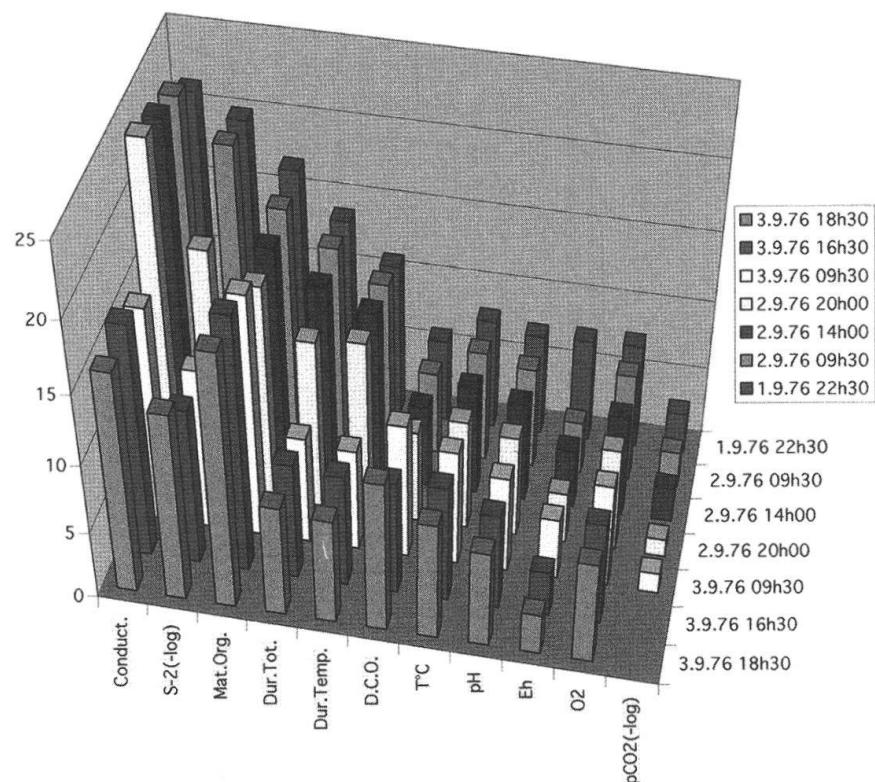
**6.1.1.** Dans le marais acide (points de prélèvements d'eau dans le sens de l'écoulement du bief: points 1, 2, 3, 5, 6, 7), il n'y a pas ou peu d'illite, sauf dans les niveaux décarbonatés où elle peut être accompagnée d'hydroxy-Al(Fe). Ceux-ci ne connaissent pas la maturité de ceux de POCHON (1978), peut-être à cause de pH moins acides que ceux des sols étudiés par cet auteur. La teneur moyenne en fer des échantillons du marais acide est de 0,50%.

**6.1.2.** Dans le marais amendé, les échantillons ne contiennent pas (ou plus) d'hydroxy-Al(Fe) dans les niveaux carbonatés. En revanche, sa présence est fréquente dans les niveaux totalement décarbonatés. Il y a toujours présence d'illite. L'analyse indique une teneur en fer en moyenne de 1,65% dans les horizons supérieurs. On note une disparition de la chlorite dans la fraction <2μ.

**6.1.3.** Au cœur du marais acide, en roche totale, à part la calcite, l'association phyllosilicates, feldspaths potassiques, plagioclases alcalins est présente partout avec des carbonates, soit calcite et dolomite (difficilement déterminables).



**Figure 11:** Variations du contenu chimique des eaux prélevées au point 6 (sortie du marais acide) avant et après une pluie abondante dans la nuit du 2 au 3/9/1976 (Ca, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Mg, fer total (Fe tot), fer filtré à 0,45μ (Fe filtr) PO<sub>4</sub>, Sr, Na, K).



**Figure 12:** Variations du contenu chimique des eaux prélevées au point 6 avant et après une pluie abondante  
Conductivité (Conduct.); -log [S<sup>2-</sup>]= sulfures; matière organique (Mat. org.); dureté totale (Dur. Tot.); demande chimique en oxygène (D.C.O.); température (T°C); pH; potentiel rédox en millivolts.  
(Sur l'axe des y, échelle 1/10 pour Conduct., dureté totale, dureté temporaire. Potentiel rédox = [Eh mesuré + 7,5]/10 mv).

## 6.2. Comportements des silicates et phyllosilicates

- Il existe un stock détritique assez frais, surtout visible dans la fraction grossière qui comprend la muscovite, la chlorite et la kaolinite détritiques. Muscovite, chlorite et feldspaths confirment l'origine alpine du détritisme.
- Des smectites sont souvent présentes dans les échantillons du marais acide, mais en faible quantité: elles sont ancrées cristallines. Cet état de cristallisation ne permet pas une détermination précise des smectites; elles peuvent encore receler des feuillets non gonflants.
- Des interstratifiés smectite-mica interviennent en quantité variable dans tous les échantillons, surtout dans les horizons profonds du point 3 (bord du marais acide).
- Tous les échantillons saturés à l'éthylène-glycol présentent des déplacements dans les minéraux interstratifiés. C'est la preuve de l'existence de couches de smectites gonflantes.
- Il subsiste soit des smectites ancrées cristallines, soit des smectites-illites.
- Le quartz est souvent dix fois moins intense dans les fractions inférieures à  $2\mu$ .
- L'association feldspath potassique-plagioclase disparaît dans la fraction fine.
- La chlorite est souvent moins abondante que la kaolinite dans la fraction fine. C'est le contraire dans la fraction inférieure à  $16\mu$ .  
Le gley des sols tourbeux est souvent d'origine alpine, éolienne ou remaniée des dépôts quaternaires antérieurs ou de la molasse.

## 6.3. Influence du drainage sur l'importance de la décarbonatation des gleys

L'influence du drainage sur la décarbonatation a été mise en évidence: plus le drainage est fort, plus la couche décarbonatée est importante. Au cœur du marais acide, où l'eau du bief est presque stagnante, il y a des carbonates jusqu'au haut du profil des gleys. Le drainage dans le marais acide a aussi une influence sur l'évolution de la tourbe, à telle enseigne que la matière organique du cœur du marais acide (faible drainage) est plus évoluée et a le même comportement complexant vis-à-vis du fer que celle issue du marais amendé.

## 6.4. Conclusions sur l'agression chimique des sols après mise en équilibre avec de l'eau distillée

Les échantillons de gleys, prélevés sur place aux points de prélèvements d'eau *in situ*, sont mis en équilibre avec de l'eau distillée. L'eau est analysée après 10, 20 et 160 jours. Il ressort de ces analyses qu'il y a une teneur minérale des eaux prélevées *in situ* et *in vitro* identique.

Nous ferons cependant les remarques suivantes:

- La dureté temporaire est toujours plus faible dans les essais *in vitro* que dans les prélèvements *in situ*. Cela tient au fait que dans la nature, les gleys sont recouverts par une tourbe où il y a production de CO<sub>2</sub> par activité biologique. On est alors en milieu ouvert, tandis que dans nos essais *in vitro*, même en présence de tourbe, nous sommes en hydromorphie permanente où l'activité bactérienne pouvant produire du CO<sub>2</sub> est faible. Seule l'eau en équilibre avec le gley carbonaté prélevée dans le marais acide (essai *in vitro*) et celle prélevée *in situ* (hydromorphie permanente) présentent les mêmes duretés; ce qui confirme bien le peu de

$\text{CO}_2$  dégagé en milieu fermé. On remarque également que dans ces essais *in vitro*, le  $\text{CO}_2$  joue un rôle visible dans l'attaque des carbonates et des liaisons des silicates Si-O-Fe, comme le notent également PEDRO & MELFI (1970).

#### - Calcium

Il apparaît dans les essais *in vitro* que

1. La matière organique entraîne le calcium dans la phase aqueuse pour les échantillons du marais amendé au bout de 20 jours (coefficient de corrélation  $r_{\text{Ca}^{+2}-\text{matière organique}}$  dans les eaux prélevées *in situ* = +0,80).
2. L'échantillon du gley du marais acide, contenant de la calcite mais sans cailloutis calcaire, ne libère son calcium qu'au bout de 165 jours.

#### - Magnésium

Grâce aux essais *in vitro*, on démontre que l'apport du magnésium dans l'eau n'est pas dû à la présence du cailloutis calcaire (contenant ou non de la dolomite), mais l'est plutôt à la présence de la chlorite dans l'échantillon de gley décarbonaté du marais amendé, dans la fraction  $<16\mu$ , absente dans les autres échantillons.

#### - Potassium

1. Les échantillons libérant beaucoup de potassium sont ceux du marais amendé (horizon supérieur du gley carbonaté). L'analyse aux rayons X révèle la présence de smectites de transformation à partir d'illites après pompage par les racines de  $\text{K}^+$  (effet pelouse).
2. Echantillons libérant peu de potassium (gley du marais amendé, horizon supérieur, avec ou sans cailloutis, et gley du marais acide). Dans ces trois échantillons, il y peu d'interstratifiés. Pour tous les échantillons, la libération de  $\text{K}^+$  ne dépend pas de la présence de la matière organique.

#### - Sodium

Pour tous les échantillons, la libération importante du sodium se situe entre 10 et 20 jours de contact avec l'eau. Puis au bout de 165 jours, elle est intermédiaire entre celles obtenues entre 10 et 20 jours. La présence de  $\text{Na}^+$  dans l'eau n'est ici pas influencée par la matière organique.

#### - Fer et aluminium

On observe des comportements semblables pour les deux éléments. Deux familles de sols se distinguent dans la libération du fer et de l'aluminium:

1. Les échantillons solides provenant respectivement de l'horizon supérieur du profil du marais amendé avec et sans cailloutis, de l'horizon inférieur dans le gley sans cailloutis, et échantillon du gley du marais acide, libèrent très peu de fer. On note une première décharge minime au bout de 10 jours, légèrement supérieure au bout de 20 jours, mais qui s'abaisse à son niveau le plus bas au bout de 165 jours.
2. Les échantillons provenant de l'horizon inférieur du profil BD 12, avec gley sans cailloutis et avec tourbe relarguent fer et aluminium surtout au bout de 20 jours, puis on assiste à un abaissement des concentrations au bout de 160 jours (destruction de la matière organique avec formation de  $\text{NO}_3^-$  et précipitation de fer par oxydation).

On note que les teneurs en aluminium et en fer libéré varient comme les teneurs en  $\text{K}^+$  et inversement avec le pH. Les conditions *in vitro* pour les échantillons situés au-dessus de la nappe dans le marais amendé dans des conditions normales *in situ*, sont celles alors d'un milieu fermé puisqu'elles sont complètement recouvertes d'eau, ce qui a pour conséquence:

- d'augmenter le pH (ressources limitées en  $\text{CO}_2$ ),
- de diminuer le pouvoir tampon,
- d'hydrolyser les minéraux primaires.

En conclusion, deux facteurs semblent jouer un rôle déterminant dans l'exportation du fer et de l'aluminium dans les régions à milieu ouvert (marais amendé):

1. Le cailloutis calcaire, en augmentant le pH, a tendance à diminuer l'exportation d'aluminium et de fer.
2. La matière organique, en s'oxydant, produit des sulfates accompagnés de protons, et solubilise donc indirectement le fer maintenu en solution par complexation avec la même matière organique.

Ces deux dernières remarques se confirment sur le terrain où l'on observe que le cailloutis calcaire sert de relais au fer exporté par la matière organique: dans un premier temps, il s'échange contre le calcium du cailloutis calcaire et s'y dépose. Dans un deuxième temps, la matière organique acidifiante et complexante reprend ce fer et l'exporte définitivement dans les eaux.

*In situ*, nous avions noté une plus grande concentration du fer dans les eaux du marais amendé que dans celles du marais acide. Dans les essais *in vitro*, l'échantillon du gley décarbonaté du marais acide n'exporte ni fer ni aluminium. Seul cet échantillon contient des hydroxy-Al(Fe) déterminés aux rayons X, qui semblent donc stables vis-à-vis de l'hydrolyse.

#### - Silice

La dissolution de  $\text{SiO}_2$  s'identifie assez bien à celle de l'aluminium et du fer et vient ainsi confirmer l'hydrolyse des argiles. On remarque que, *in vitro*, la présence de calcaire sous forme de cailloutis diminue l'exportation de Al, Fe et  $\text{SiO}_2$ .

### **6.5. Phase silicatée et carbonatée**

**6.5.1.** Dans le marais acide, le fer analysé dans les eaux *in situ* est bien corrélé avec la phase carbonatée (Mg, Ca, dureté totale) en bordure aux points 2 et 3 (Fe-dureté

totale,  $r = +0,9$ ) ainsi qu'à la sortie, points 5 et 6 (Fe-dureté totale,  $r = +0,8$ ), mais pas du tout au cœur du marais acide (point 4), où il n'y a pas de décarbonatation du gley.

**6.5.2.** Dans le marais amendé et cultivé, le fer est plutôt lié à la phase silicatée (les sols ne contiennent plus de calcite), ce qui indique une bonne corrélation Si-Fe, Si-Mg, Fe-Mg, alors que le fer n'est plus corrélé avec la dureté.

### **6.6. Influence de la matière organique sur la mobilisation du fer**

La matière organique hydrosoluble élaborée sur les bords du marais acide pendant la période d'activité biologique, est relâchée au début septembre (matière organique et sulfates sont alors liés). A la fin du printemps, au contraire, la matière organique fraîche n'est pas oxydée et n'est pas accompagnée d'autant de  $\text{SO}_4^{2-}$  qu'en automne.

Les corrélations entre matière organique hydrosoluble et fer dans les eaux sont nulles dans le marais acide (sauf au cœur de celui-ci, point 4), mais sont bonnes dans le marais amendé, donc respectivement en hydromorphie permanente et en milieu lessivé quand bien même la teneur en matière organique dans les eaux du marais acide est supérieure à celle du marais amendé. Ceci s'explique par le pouvoir complexant relatif de ces deux sortes de matière organique hydrosoluble; ce pouvoir complexant est deux fois plus élevé dans le marais amendé que dans le marais acide. Cela est à rapprocher du rapport C/N de ces deux types de sols, plus petit dans le marais amendé que dans le marais acide. On peut alors imaginer qu'il y a plus d'azote et donc plus de sites complexants dans la matière organique issue du marais amendé, le doublet électronique de l'azote formant des liaisons stables avec le fer (II) et le fer (III). (Cette matière organique

séparée par chromatographie sur couche mince met bien en évidence les groupements -NH<sub>2</sub>).

L'ensemble est confirmé par les spectres R.M.N. indiquant un pourcentage aromatique pratiquement trois fois plus élevé en milieu cultivé. Cela correspond à la présence de molécules complexantes (phénols, acides benzoïques, etc.). Enfin, les nitrates, produits d'oxydation de la matière organique, abaissent de façon très significative la teneur en fer dans les eaux par oxydation du fer (II) en fer (III) insoluble.

### **6.7. Sidérobactéries**

Dans un premier temps, le fer (III) est précipité en partie dans les gaines des sidérobactéries, puis est entraîné dans les eaux du marais amendé (points 9 et 12) lors de fortes pluies, surtout après une longue période de sécheresse.

En revanche, dans le marais acide, malgré une augmentation de ces bactéries avec la température, leur nombre reste faible, voire nul, à cause de l'acidité de la matière organique.

### **6.8. Niveaux d'exportation ou d'immobilisation du fer**

#### **6.8.1. Tourbe BD 3 (marais acide)**

En descendant le long du profil, on note une accumulation de SiO<sub>2</sub> (7,6%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,24%) et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,42%) dans l'horizon TS 1 où le taux d'acide humique est le plus élevé (et donc celui de l'humine le plus bas). Ensuite, on remarque une diminution de ces "complexes" jusqu'aux horizons TF 3 et G 1 où le taux est maximal (SiO<sub>2</sub>: 72%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 8,6%; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 2,95%).

La migration du fer des niveaux supérieurs (TS 1) semble insignifiante, attendu que les acides susceptibles de complexer le fer sont peu polaires. Donc les chélates ne

sont pas entraînés vers le bas du profil lors de précipitations.

En revanche, la teneur en SiO<sub>2</sub> (72%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8,6%) et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2,95%) du bas du profil G 1 (malgré une teneur en humine élevée et en AH et AF basse) est à rapprocher de celles des gleys sous-jacents (échantillon 1055 - gley carbonaté - 185-220 cm: SiO<sub>2</sub> 84%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 9% et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,57%). Les horizons inférieurs étant situés en hydromorphie permanente, on peut penser à une contamination "*per ascensum*" de ces horizons par les gleys. Dans l'eau prélevée à cet endroit, on trouve les mêmes proportions de ces éléments. Mais ici, la source des éléments contenus dans les eaux vient du gley qui s'enrichit en profondeur de ces éléments.

En conclusion: la matière organique ici n'entraîne pas le fer mais, par l'oxydation acidifiante de ses sulfures (provenant des horizons Tf 2 et Tf 3) en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, décarbonate les gleys contenant du fer.

#### **6.8.2. Tourbe BD 12 (marais amendé)**

Si la quantité de matière organique totale est moins grande ici que dans le marais acide, en revanche, toute proportion gardée, les taux d'acides fulviques et humiques sont plus constants et plus élevés, et subséquemment le taux d'humine plus faible. Les taux de fer sont plus élevés dans la tourbe cultivée et cet élément est déjà exporté dès les horizons superficiels (acides organiques plus polaires) - (vérifié *in situ* dans les eaux prélevées à ce niveau).

Dans le gley décarbonaté, le taux de fer est à son maximum. C'est l'agression des carbonates des gleys qui libère le fer aussitôt complexé par la matière organique, alors qu'en présence de calcium, la matière organique complexe Ca<sup>2+</sup> pour flocculer et le fer libéré précipite alors.

6.8.3. Les analyses des minéraux des argiles entraînés par les eaux lors de fortes précipitations montrent que l'origine du fer est à attribuer également aux suspensions argileuses qui contiennent du fer dans leur structure (chlorite ferrifère) ou dans leur enrobement. Dans un prochain article, nous montrerons que le fer mesuré dans les crues à la résurgence comprend deux origines: tout d'abord apparaît une partie de fer déposée dans les chenaux karstiques sous forme d'oxydes et d'hydroxydes (effet piston), puis plus tard, au maximum du débit, une autre partie, accompagnée des argiles de surface et de tout le cortège chimique et minéral (argiles), qui l'accompagne depuis la surface du bassin.

### **6.9. Transit du fer et recharge des sols**

a) Le rôle de la matière organique soluble, soit par son acidité (marais acide), soit par son pouvoir complexant (marais amendé), est de maintenir le fer en solution. Dès que le fer, accompagné de matière organique, touche un cailloutis calcaire, soit au bas des profils des sols, soit dans les calcaires dénoyés, la matière organique est oxydée. Le fer abandonné à lui-même précipite. C'est pourquoi, à la résurgence du bassin, point ultime du transfert à travers le karst, les eaux d'étiage sont pauvres en fer (0,15 mg/l), sauf en cas de crue où le flux rapide ne laisse pas le temps à la matière organique d'être immobilisée et oxydée à la surface du bassin. Ainsi en période de crue, les eaux de la résurgence contiennent jusqu'à dix fois plus de fer qu'en régime normal.

- b) Le fer enrobe les argiles ou fait partie des complexes argilo-humiques (JABIOL *et al.*, 1995). Une petite partie est liée à la structure des argiles et notamment aux chlorites ferrifères. Ces argiles étant éoliennes, le fer l'est donc aussi dans les parties supérieures des tourbes.
- c) GREJBINE (1963), grâce à des pièges, a démontré que l'apport du fer atmosphérique (poussières et aérosols) était considérable et suffisant pour recharger les sols, comme l'indique MISEREZ (1973) dans le cas du bassin de l'Areuse.
- d) Le transport du fer n'est pas que chimique: en effet, en automne et après une période de dessiccation assez grande suivie d'une forte pluie, la source du point 12 (marais amendé), qui a habituellement une teneur moyenne en fer de 2,36 mg/l, atteint une teneur de 20 à 25 mg/l, accompagnée d'une élévation considérable du nombre de sidérobactéries (*Gallionella* surtout). Cela dure 5 à 8 jours.

### **REMERCIEMENTS**

Nos remerciements vont à B. Kübler, J.J. Miserez, I. Müller, professeurs à l'Institut de Géologie de Neuchâtel (Suisse) et à B. Fritz, directeur du Centre de Géochimie de la Surface à Strasbourg (France). Notre gratitude est à la mesure du temps qu'ils ont consacré sans compter à nous donner des conseils scientifiques compétents, et à corriger ce manuscrit sans se départir de leur patience et de leur gentillesse.

## BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT, D. 1969. Phénomènes et formes du karst jurassien. *Eclogae geol. Helv.* 62 (2):325-399.
- BENZECRI, J.P. 1973. L'analyse des données. Tome 2. L'analyse des correspondances. *Dunod, Paris.*
- BOUYER, Y., MISEREZ, J.J. & POCHON, M. 1978. Inventaire géochimique et bilan du fer dans le sol et les eaux du karst jurassien: état, importance, déplacements. *Lab. de Pédologie, EPFL, En Vernay, Ecublens.*
- BOUYER , Y. & KÜBLER, B. 1981. Hétérogénéité chimique et hydrologique des eaux souterraines d'un karst du Haut-Jura neuchâtelois (Suisse). *J. of Hydrol.*, 54: 315-339.
- BRUCKERT, S., HETIER, J.M. & GUTIERREZ, F. 1974. Extraction chimique des composés organiques et des complexes organo-minéraux. *Science du sol* 4: 225-245.
- BUFFLE, J., LANDRY, J.-C. & HAERDI, W. 1974. TMS- l'Eau, 547-545.
- BUFFLE, J., GRETIER, F.L. & HAERDI, W. 1977. Measurement of complexation properties of humic and fulvic acids in natural waters with lead and copper ion-selective electrodes. *Anal. Chem.* 49: 216-222.
- DUCHAUFOUR, P. 1970. Précis de pédologie. *Masson & Cie éd., Paris.*
- GOBAT, J.M., ARAGNO, M. & MATTHEY, W. 1998. Le sol vivant. *Presses polytechn. univ. romandes, Lausanne.*
- GOBAT, J.-M., GROSVERNIER, P. & MATTHEY, Y. 1986. Les tourbières du Jura suisse. *Actes de la Soc. jurass. d'Emulation*, 1986: 213-315.
- GOGNIAT, S. 1997. Ecoulement souterrain en pays jurassien. In: Cahier n° 5, Spéléologie jurassienne. Editions de la Girafe, Mus. Hist. nat. La Chaux-de-Fonds.
- GREJBINE, T. 1963. Accumulation des poussières cosmiques sur la terre. *C.R. Acad. Sci. Paris* 256 (17):3735-3738.
- HAMMER, D.A. 1989. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Lewis Publ.*
- ISCHER, A. 1935. Les tourbières de la Vallée des Ponts-de-Martel. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 60: 77-164.
- JABIOL, B., BRETHES, A., PONGE, J.F., TOUTAIN, F. & BRUN, J.J. 1995. L'humus sous toutes ses formes. *ENGREF, Nancy.*
- KIRALY, L. 1969. Bref commentaire à la carte structurale de la surface Argovien-Séquanien dans le canton de Neuchâtel. *Bull. Soc. neuchâtel. Sci. nat.* 92: 71-72.
- KONONOVA, M. M. 1966. Soil Organic Matter. 2nd Ed. *Pergamon Press, New York.*
- MISEREZ, J.J. 1973. Géochimie des eaux du karst jurassien. Contribution physico-chimique à l'étude des altérations. *Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.*
- MOREL, G. 1976. Etude hydrogéologique du bassin de la source de la Noirague (Jura). Rapport CHYN, *Univ. Neuchâtel, Suisse.*
- PEDRO, G. & MELFI, A.J. 1970. Recherches expérimentales sur le comportement des hydrates ferriques et des constituants silico-ferriques en milieu lessivé. *Pédologie* 20 (1): 5-33.
- POCHON, M. 1978. Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse. *Mém. Soc. helv. Sci. nat.* XC.