

THESE

PRESENTÉE A

L'UNIVERSITÉ DE PARIS 7

EN VUE DE L'OBTENTION DU

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS 7

SPECIALITÉ GEOCHIMIE FONDAMENTALE

PAR

LAURENCE PHILIPPE

BILANS BIOGEOCHIMIQUES DU FER ET DU PHOSPHORE

DANS UN ECOSYSTEME LACUSTRE EUTROPHE :

LE LAC D'AYDAT (PUY DE DOME)

SOUTENUE LE 30 Novembre 1989



DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

G. MICHARD	: PRÉSIDENT
J. BUFFLE	: RAPPORTEUR
M. MEYBECK	: RAPPORTEUR
J. DEVAUX	: EXAMINATEUR
J.F. GAILLARD	: EXAMINATEUR
J. PINSON	: EXAMINATEUR

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux.....	p. I
Liste des figures.....	p. II
Liste des symboles.....	p. X
 INTRODUCTION.....	 p. 1
 GENERALITES :	
1) Quelques définitions.....	p. 3
2) Composition de la matière organique.....	p. 4
3) Cycle biologique de la matière organique.....	p. 5
4) Influence des conditions physiques.....	p. 8
 PRESENTATION DU SITE D'ETUDE :	
I - Situation géographique.....	p. 10
II - Contexte géologique.....	p. 10
III - Bilan hydrique.....	p. 13
IV - Caractéristiques morphométriques.....	p. 14
V - Caractéristiques physiques et biologiques.....	p. 15
 METHODOLOGIE :	
I - Introduction.....	p. 17
II - Techniques de prélèvement et de conditionnement	
1) Colonne d'eau	
a) Bouteille Van Dorm.....	p. 18
b) Bouteille à filtration.....	p. 20
2) Eaux interstitielles	
a) Préparation et pose du peeper.....	p. 21
b) Echantillonnage.....	p. 22
3) Carotte sédimentaire.....	p. 24
4) Matière particulaire.....	p. 24
III - Analyses	
1) Mesures sur le terrain	

a) Température - Oxygène dissous.....	p.25
b) pH.....	p.26
c) Alcalinité.....	p.26
d) Fe^{2+} , S^{2-} , NO_2^-	p.27
2) Mesures en laboratoire	
a) Spectrométrie d'absorption atomique.....	p.27
b) Colorimétrie.....	p.28
c) Chromatographie ionique.....	p.28
d) ΣCO_2 et CH_4	p.28
e) Analyse du solide.....	p.29
IV - Discussion	
1) Méthodes de prélèvement	
a) Bouteille Van Dorm.....	p.30
b) Peeper et bouteille à filtration.....	p.31
c) Trappes à sédiment.....	p.31
2) Mesure de la concentration en oxygène dissous.....	p.32
3) Technique d'analyse du solide.....	p.34
V - Récapitulatif.....	p.34

RESULTATS

I - Colonne d'eau

1) Gradients de concentration dans la colonne d'eau	
a) Thermocline - Chemocline.....	p.38
b) Fer - Manganèse.....	p.41
c) pH et éléments nutritifs.....	p.47
d) Cations majeurs.....	p.60
e) Chlorures - sulfates.....	p.60
f) Méthane.....	p.60
2) Evolution spatio-temporelle de la chemocline lors de la destratification. Influence sur les substances dissoutes	
a) Thermocline - Chemocline.....	p.63
b) Comportement des substances dissoutes.....	p.64
3) Apports par la Veyre.....	p.67
4) Fraction solide.....	p.73

II - Le sédiment et les eaux interstitielles

1) Gradients de concentration dans les eaux	
---	--

interstitielles.....	p.79
2) Variations des concentrations dans les différentes régions du lac.....	p.87
3) Etude du sédiment.....	p.98
III - Conclusions.....	p.103

INTERPRETATION - DISCUSSION

PRECIPITATION DE PHASES MINERALES AUTHIGENES DANS LA COLONNE D'EAU

1) La sidérite.....	p.108
2) La vivianite.....	p.109
3) La pyrrhotite.....	p.109
4) L'hydroxyde ferrique.....	p.110
5) La calcite.....	p.111
6) Conclusions.....	p.112

RAPPORTS STOECHIMETRIQUES DANS LA MATIERE ORGANIQUE

I - Evaluation des rapports C/N/P dans la fraction solide.....	p.113
II - Etude de la fraction dissoute.....	p.113
III - Comparaison des rapports C/N/P calculés par les deux méthodes	
1) Rapport C/N.....	p.118
2) Rapport N/P.....	p.119
IV - Conclusions sur la stoechiométrie de la matière organique dans la colonne d'eau.....	p.120

MODELE STOECHIMETRIQUE DE DEGRADATION DE LA MATIERE ORGANIQUE DANS LA COLONNE D'EAU

I - Principe du modèle - Hypothèses.....	p.122
II - Méthode de calcul	
1) Processus d'oxydo-réduction au passage de la chémocline.....	p.124
2) Processus d'oxydo-réduction en zone anoxique.....	p.126
III - Résultats	
1) Simulation en période de stratification maximum (22.09.87).....	p.127

2) Simulation en période de stratification moyenne (15.10.87).....	p.133
3) Simulation en fin de stratification estivale (06.11.87).....	p.138
IV - Conclusions.....	p.143
ELABORATION D'UN MODELE DIAGNOSTIQUE A L'AIDE DE BOITES	
I - Objectifs.....	p.144
II - Calcul de l'évolution des stocks au cours du temps.....	p.145
III - Principe de la modélisation du comportement du fer	
1) Description du système.....	p.147
2) Nature des échanges entre les boîtes	
a) Apports et pertes externes.....	p.149
b) Apports et pertes internes par échange entre boîtes.....	p.150
3) Mise en équation du système.....	p.153
IV - Première approche du modèle	
1) Estimation des paramètres	
a) Paramètres constants dans le modèle.....	p.156
b) paramètres évoluant au cours du temps.....	p.157
2) Résultats de cette première modélisation.....	p.160
3) Conclusions de cette première approche.....	p.164
V - affinement du modèle	
1) Méthode de calcul - Résultats.....	p.165
2) Conclusions.....	p.169
VI - Extension du modèle de comportement du fer au comportement du phosphore	
1) Estimation des stocks de phosphore dissous d'après les concentrations mesurées.....	p.171
2) Mise en équation du système.....	p.171
3) Résultats de la simulation - Conclusions.....	p.173

CONCLUSIONS GENERALES.....	p.175
----------------------------	-------

BIBLIOGRAPHIE.....	p.178
--------------------	-------

BASE DE DONNEES DANS LE VOLUME ANNEXE.

LISTE DES TABLEAUX

=====

Table 1	: Séquence des réactions d'oxydo-réduction de la matière organique d'après Froelich (1979).....	p.7
Table 2	: Composition chimique (en %) des granodiorites d'Aydat d'après Bouchet (1987).....	p.10
Table 3	: Importance relative de la surface des isobathes dans le lac d'Aydat. (Gaillard et Rabouille, données non publiées).....	p.15
Table 4	: Récapitulatif des missions, des prélèvements et des analyses effectués d'Octobre 1986 à Juillet 1988.....	p.37
Table 5	: Calcul des flux et résultats obtenus après attaque acide en milieu oxydant et microanalyse du carbone, hydrogène et azote total sur les particules de la colonne d'eau.....	p.73
Table 6	: Minéralogie des particules de la colonne d'eau après étude en microscopie électronique à balayage couplé à un EDAX.....	p.74
Table 7	: Résultats obtenus après attaque acide en milieu oxydant et microanalyse du carbone, hydrogène et azote total sur une carotte sédimentaire.....	p.99
Table 8	: Minéralogie du sédiment après étude en microscopie électronique à balayage couplé à un EDAX.....	p.100
Table 9	: Evaluation des paramètres du modèle pour les différentes séquences de temps considérés.....	p.160

II

LISTE DES FIGURES

=====

Figure 1	: Formation du lac d'Aydat (Millerioux (1976)).....	p.11
Figure 2	: Carte géologique simplifiée de la partie Sud de la chaîne des Puys (Bouchet (1987)).....	p.12
Figure 3	: Débits journaliers de la Veyre à l'entrée et à la sortie du lac d'Aydat (Bouchet (1987)).....	p.13
Figure 4	: Carte bathymétrique du lac d'Aydat (Gaillard et Rabouille, données non publiées).....	p.16
Figure 5	: Bouteille Van Dorm à prélèvement horizontal.....	p.19
Figure 6	: Echantillonnage d'une colonne d'eau.....	p.19
Figure 7	: Schéma d'un peeper.....	p.23
Figure 8	: Influence du vent sur le prélèvement d'une colonne d'eau par bouteille Van Dorm.....	p.30
Figure 9	: Corrélation entre oxygène dissous mesuré par sonde à oxygène et par Winkler.....	p.33
Figure 10	: Emplacement du matériel dans le lac.....	p.36
Figure 11a	: Variation de la température en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 22.09.87.....	p.39
Figure 11b	: Variation des teneurs en oxygène dissous en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 22.09.87.....	p.39
Figure 12a	: Variation de la température en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 09.10.87 et le 19.11.87.....	p.40
Figure 12b	: Variation des teneurs en oxygène dissous en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 09.10.87 et le 19.11.87.....	p.40
Figure 13	: Concentration en fer (échantillon filtré 0.45 μm et acidifié) en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 10.08.87.....	p.42
Figure 14	: Concentration en fer en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau après filtration en cascade le 02.06.88.....	p.43
Figure 15	: Concentration en fer en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau après filtration en cascade le 25.06.88.....	p.43

III

Figure 16	: Concentration en manganèse en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 10.08.87.....	p.45
Figure 17a	: Concentration en fer (échantillon filtré 0.45 μ m et acidifié) en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 09.10.87 et le 19.11.87.....	p.46
Figure 17b	: Concentration en manganèse en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 09.10.87 et le 19.11.87.....	p.46
Figure 18	: Evolution du pH en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 12.11.86 et le 10.08.87.....	p.48
Figure 19	: Variation de l'alcalinité en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 25.06.88.....	p.49
Figure 20	: Variation de l'alcalinité en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 18.10.87 et le 19.11.87.....	p.49
Figure 21	: Variation du carbone minéral en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 02.06.88.....	p.51
Figure 22	: Comparaison du carbone minéral total mesuré au carbone minéral dissous mesuré en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 19.07.88.....	p.51
Figure 23	: Variation du carbone organique dissous et total en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 02.06.88.....	p.53
Figure 24	: Variation du carbone organique total en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 19.07.88.....	p.53
Figure 25	: Variation des concentrations en nitrate et ammonium en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 25.06.88.....	p.55
Figure 26	: Variation des teneurs en nitrites en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 25.06.88.....	p.55
Figure 27	: Concentrations en nitrates et ammonium en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 19.11.87.....	p.56

IV

- Figure 28 : Variation des teneurs en nitrites en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 16.11.87..... p.56
- Figure 29 : Variation de la concentration en phosphore dissous en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 10.08.87..... p.57
- Figure 30 : Variation des teneurs en silice dissoute en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 22.09.87 et le 19.11.87..... p.59
- Figure 31 : Variation des concentrations en cations majeurs en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 10.08.87..... p.61
- Figure 32 : Concentration en sulfate en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 10.08.87 et le 19.11.87..... p.62
- Figure 33 : Variation de la teneur en méthane en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau le 19.07.88..... p.62
- Figure 34 : Evolution de la température au cours du temps en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.65
- Figure 35 : Evolution des teneurs en oxygène dissous au cours du temps en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.65
- Figure 36 : Evolution des concentrations en fer dosé sur des échantillons filtrés sur $0.45\ \mu$ et acidifiés au cours du temps en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.66
- Figure 37 : Evolution des concentrations en phosphore dissous au cours du temps en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.66
- Figure 38 : Evolution des teneurs en carbone minéral dissous calculé au cours du temps en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.68

- Figure 39 : Evolution des concentrations en ammonium au cours du temps en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.68
- Figure 40 : Evolution des teneurs en silice dissoute au cours du temps en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.69
- Figure 41 : Evolution des concentrations en sulfate au cours du temps en fonction de la profondeur dans la colonne d'eau entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.69
- Figure 42a : Suivi de la température dans la Veyre entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.71
- Figure 42b : Suivi de la concentration en oxygène dissous dans la Veyre entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.71
- Figure 43 : Suivi des concentrations fer total, fer dissous et phosphore dissous (échantillons filtrés sur 0.45 μm et acidifiés) dans la Veyre entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.72
- Figure 44 : Flux particulaire dans la colonne d'eau entre le 09.10.87 et le 19.11.87..... p.75
- Figure 45 : Spectre obtenu par microscopie électronique à balayage couplé à un EDAX sur les particules de la colonne d'eau récupérées entre le 21.10.87 et le 02.11.87 à 11 m de profondeur..... p.77
- Figure 46 : Minéralogie des particules récupérées entre le 09.10 et le 21.10.87 à 12 m et entre le 11.11 et le 19.11.87 à 3 m exprimée en oxydes et normalisée..... p.78
- Figure 47a : Variation des teneurs en fer dissous dans les eaux interstitielles récupérées le 09.10.87..... p.80
- Figure 47b : Variation de la concentration en manganèse dans les eaux interstitielles récupérées le 09.10.87..... p.80
- Figure 48a : Variation de la concentration en ammonium dans les eaux interstitielles récupérées le 09.10.87..... p.81

VI

Figure 48b : Variations des teneurs en nitrates dans les eaux interstitielles récupérées le 19.11.87.....	p.81
Figure 49 : Variation de la concentration en phosphore dissous dans les eaux interstitielles récupérées le 09.10.87.....	p.83
Figure 50 : Variation des teneurs en silice dissoute dans les eaux interstitielles récupérées le 19.11.87.....	p.84
Figure 51a : Variation du pH dans les eaux interstitielles récupérées le 19.11.87.....	p.85
Figure 51b : Variation de l'alcalinité dans les eaux interstitielles récupérées le 19.11.87.....	p.85
Figure 52a : Comparaison entre les concentrations en carbone minéral mesuré et calculé dans les eaux interstitielles récupérées le 19.11.87.....	p.86
Figure 52b : Variation des teneurs en carbone organique et minéral dans les eaux interstitielles récupérées le 19.07.88.....	p.86
Figure 53 : Variation des concentrations en cations majeurs dans les eaux interstitielles récupérées le 19.11.87.....	p.88
Figure 54 : Variation de la teneur en méthane dans les eaux interstitielles récupérées le 12.11.86.....	p.89
Figure 55 : Comparaison des teneurs en fer dans les eaux interstitielles récupérées le 19.07.88 dans la cuvette centrale (point A fig.4) et à l'Ouest du lac vers la plage (point D fig.4).....	p.91
Figure 56 : Comparaison des teneurs en fer dans les eaux interstitielles récupérées le 19.07.88 à l'entrée de la Veyre (point B fig.4) et au niveau du ponton d'embarquement (point C fig.4).....	p.92
Figure 57a : Variation des concentrations en phosphore dissous dans les eaux interstitielles récupérées le 19.07.88 à l'Ouest du lac vers la plage (point D fig.4).....	p.93
Figure 57b : Variation des concentrations en phosphore dissous dans les eaux interstitielles récupérées le 19.07.88 au niveau du ponton	

VII

d'embarquement (point C fig.4).....	p.94
Figure 57c : Variation de la concentration en phosphore dissous dans les eaux interstitielles récupérées le 19.07.88 à l'entrée de la Veyre (point B fig.4).....	p.94
Figure 58a : Variation de l'alcalinité dans les eaux interstitielles récupérées le 19.07.88 à l'entrée de la Veyre (point B fig.4).....	p.96
Figure 58b : Variation de l'alcalinité dans les eaux interstitielles récupérées le 19.07.88 au niveau du ponton d'embarquement (point C fig.4).....	p.96
Figure 59 : Variation des teneurs en cations majeurs dans les eaux interstitielles récupérées le 19.07.88 au niveau du ponton d'embarquement (point C fig.4).....	p.97
Figure 60 : Spectre obtenu par microscopie électronique à balayage couplé à en EDAX sur le sédiment à l'interface eau/sédiment.....	p.101
Figure 61 : Minéralogie du sédiment à 0-1 cm et 32-37 cm de profondeur exprimée en oxydes et normalisée.....	p.102
Figure 62a : Evolution du carbone dissous en fonction des concentrations en NH_4^+ dans une isopycnale de 8-9°C.....	p.115
Figure 62b : Evolution des teneurs en NH_4^+ en fonction de celles en phosphore dissous dans une isopycnale de 8-9°C.....	p.115
Figure 63a : Evolution des teneurs en carbone dissous en fonction des concentrations en Fe^{2+} dans une isopycnale de 8-9°C.....	p.117
Figure 63b : Evolution des teneurs en NH_4^+ en fonction des concentrations en Fe^{2+} dans une isopycnale de 8-9°C.....	p.117
Figure 64 : Evolution des teneurs en oxygène dissous, fer et manganèse dans la colonne d'eau du 22.09.87.....	p.129
Figure 65a : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour l'alcalinité et pour le carbone minéral dissous le 22.09.87.....	p.130

VIII

Figure 65b : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour le méthane le 22.09.87.....	p.130
Figure 66a : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour l'ammonium 22.09.87.....	p.131
Figure 66b : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour le phosphore dissous le 22.09.87.....	p.131
Figure 67 : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour le pH le 22.09.87.....	p.132
Figure 68 : Evolution des teneurs en oxygène dissous, fer et manganèse dans la colonne d'eau du 15.10.87.....	p.134
Figure 69a : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour l'alcalinité et pour le carbone minéral dissous le 15.10.87.....	p.135
Figure 69b : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour le méthane le 15.10.87.....	p.135
Figure 70a : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour l'ammonium 15.10.87.....	p.136
Figure 70b : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour le phosphore dissous le 15.10.87.....	p.136
Figure 71 : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour le pH le 22.09.87.....	p.137
Figure 72 : Evolution des teneurs en oxygène dissous, fer et manganèse dans la colonne d'eau du 06.11.87.....	p.139
Figure 73a : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour l'alcalinité et pour le carbone minéral dissous le 06.11.87.....	p.140
Figure 73b : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour le méthane le 06.11.87.....	p.140
Figure 74a : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour l'ammonium 06.11.87.....	p.141
Figure 74b : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour le phosphore dissous le 06.11.87.....	p.141
Figure 75 : Comparaison de la simulation (trait) à la mesure (points) pour le pH le 06.11.87.....	p.142
Figure 76 : Evolution de la profondeur de la chemocline au cours de la période du 09.10 au 19.11.87.....	p.146

IX

- Figure 77 : Représentation schématique du système utilisé pour la modélisation du comportement du fer dans la colonne d'eau..... p.154
- Figure 78 : Evolution du gradient de température à la thermocline dans la colonne d'eau au cours de la période du 09.10 au 19.11.87..... p.158
- Figure 79a : Evolution des teneurs moyennes en fer dissous en zone oxique simulées (courbe) et mesurées (points)..... p.162
- Figure 79b : Evolution des teneurs moyennes en fer dissous en zone anoxique simulées (courbe) et mesurées (points)..... p.162
- Figure 80a : Evolution des teneurs moyennes simulées en fer particulaire en zone oxique..... p.162
- Figure 80b : Evolution des teneurs moyennes simulées en fer particulaire en zone anoxique..... p.162
- Figure 81 : Evolution du coefficient de dispersion au cours de la période de simulation..... p.166
- Figure 82 : Evolution des teneurs en fer dissous en zone oxique (a) et anoxique (b) après affinement du modèle (ligne) comparée à l'évolution mesurée (point)..... p.168
- Figure 83 : Evolution des teneurs en fer particulaire en zone oxique (a) et anoxique (b) après affinement du modèle..... p.168
- Figure 84 : Evolution simulée des flux de fer dissous du compartiment anoxique vers le compartiment oxique..... p.170
- Figure 85 : Evolution des teneurs moyennes en phosphore dissous en zone oxique (a) et anoxique (b) simulées (courbe) et mesurées (étoiles)..... p.174
- Figure 86 : Evolution des teneurs moyennes du phosphore particulaire en zone oxique (a) et anoxique (b)..... p.174