

Résumé

L'usage des fongicides cupriques depuis le XIX^{ème} siècle a causé une accumulation de cuivre (Cu) dans les sols viticoles. De la phytotoxicité a ainsi été observée dans certaines parcelles. La disponibilité du Cu dépend de sa spéciation et des échanges sol-solution, donc de sa concentration totale en solution et de celle de sa fraction ionique Cu^{2+} . Le cuivre présente une forte affinité pour la matière organique du sol (MO), et particulièrement pour la matière organique dissoute (MOD). La minéralisation de la MO et la dynamique de la MOD dépendent de la gestion agronomique des sols via les apports organiques et des facteurs climatiques tels que la température. La dynamique de la MOD, via sa quantité et sa qualité, pourrait affecter la disponibilité du Cu. Cependant, le lien entre la dynamique de la MOD et la disponibilité du cuivre est mal connu.

Cette thèse étudie les effets de la qualité et de la dynamique temporelle de la MOD sur la disponibilité du cuivre, en s'appuyant sur des sols en viticulture biologique de la région de Bordeaux. Il s'est agi d'étudier si la quantité ou la qualité de la MOD, analysée via ses propriétés de fluorescence et d'absorbance, expliquait les concentrations du cuivre total ou du Cu^{2+} en solution, considérés ici comme des indicateurs de disponibilité du cuivre.

Dans des sols représentant une gamme de teneur en Cu (28 - 238 mg kg⁻¹), de teneur en carbone organique (5 - 31 g kg⁻¹) et de pH (6.3 – 8.2), les solutions de sol à l'équilibre extraites présentent des concentrations en Cu total variant de 0.1 à 2.6 μM et en Cu^{2+} variant de 2.10^{-4} à 1 μM . Les sols étudiés ont une plus forte variabilité des propriétés optiques de la MOD que des concentrations en carbone organique dissout. L'analyse statistique des relations entre les concentrations en Cu total en solution et les paramètres de la MOD ou les propriétés du sol souligne l'importance de certains paramètres qualitatifs de la MOD tels que le degré d'humification (HIX). La variabilité des concentrations en Cu^{2+} s'explique à 88 % par le pH.

En jouant sur la température, il est possible de stimuler la minéralisation de la MO qui pourrait libérer du Cu initialement sorbé sur la MO. En incubant des sols, la minéralisation de la MO du sol a effectivement été plus importante à 30°C qu'à 20°C. Cependant, la température a peu impacté la désorption du Cu et n'a pas significativement affecté la concentration du Cu^{2+} . Dans le sol au ratio C:N le plus faible, la concentration de cuivre total dans les extraits augmentait au fil de l'incubation, du fait de l'activité biologique plus prononcée. Le Cu^{2+} s'est avéré fortement lié au pH, indiquant une décorrélation avec le Cu total dans les extraits de sol.

L'apport de matières organiques au sol stimule aussi l'activité biologique et peut augmenter la minéralisation de la MO initiale et ainsi modifier la dynamique du Cu. Lors de l'incubation de sols amendés avec des résidus végétaux (feuilles de vigne, d'avoine ou de féverole), les

activités enzymatiques et la minéralisation de la MO se sont intensifiées. Aux premiers jours, un pic de concentration en MOD et Cu (total et libre) indique une solubilisation de MO labile et du Cu, concomitante avec une baisse de pH. La MOD est rapidement consommée entraînant une baisse de sa concentration et une augmentation de son degré d'humification. La dynamique du Cu total dans les extraits a été significativement impactée par celle de la MOD tandis que celle du Cu^{2+} dépendait majoritairement des variations de pH. Ceci confirme la décorrélation entre le Cu total et le Cu^{2+} dans les extraits de sol étudiés.

Les résultats de ce travail indiquent que les variations de température pourraient avoir un effet limité sur la disponibilité du Cu. Par contre, des apports organiques induisent des changements importants sur la dynamique du Cu et variables selon les sols. La gestion agronomique des matières organiques pourrait permettre de mieux contrôler la disponibilité du cuivre dans les sols viticoles.

Mots-clés : Sol – Matière organique – Cuivre – Disponibilité - Vigne

Abstract

The use of cupric fungicides since the 19th century has caused an accumulation of copper (Cu) in vineyard soils. Hence, phytotoxicity has been observed in some vineyard plots. The availability of Cu depends on its speciation and soil-solution exchanges, therefore on its total concentration in solution and that of its ionic fraction Cu^{2+} . Cu has a strong affinity for soil organic matter (OM), and particularly for dissolved organic matter (DOM). OM mineralization and DOM dynamics depend on the agronomic management of soils via organic inputs and on climatic factors such as temperature. The dynamics of DOM, via its quantity and quality, are likely to affect the availability of Cu. However, the link between DOM dynamics and Cu availability is poorly understood.

This thesis focuses on the effects of the quality and temporal dynamics of DOM on the availability of Cu, based on soils in organic viticulture in the Bordeaux region. The aim was to study whether the quantity or quality of DOM, analyzed via its fluorescence and absorbance properties, could explain the concentrations of total Cu or Cu^{2+} in solution, considered here as indicators of Cu availability.

In soils representing a range of Cu content (28 - 238 mg kg⁻¹), organic carbon content (5 - 31 g kg⁻¹) and pH (6.3 – 8.2), stabilized soil extracts show concentrations in total Cu varying from 0.1 to 2.6 μM and in Cu^{2+} varying from $2 \cdot 10^{-4}$ to 1 μM . The soils studied have a higher variability of the optical properties of the DOM than of the concentrations of dissolved organic carbon. Statistical analysis of the relationships between total Cu concentrations in solution and DOM parameters or soil properties highlights the importance of some qualitative DOM parameters such as the degree of humification (HIX). The variability of Cu^{2+} concentrations is explained by pH at 88%.

By modifying the temperature, it is possible to stimulate the mineralization of the OM which could thus release some Cu initially sorbed on the OM. By incubating soils, the mineralization of soil OM was indeed greater at 30°C than at 20°C. However, temperature did not significantly affect the concentration of Cu^{2+} , and had only a slight impact on Cu desorption. In the soil with the lowest C:N ratio, the concentration of total Cu in the extracts increased over incubation, due to the more important biological activity. Cu^{2+} was found to be strongly linked to pH, indicating a decorrelation with total Cu in the soil extracts.

The supply of organic matters to the soil also stimulates biological activity and can increase the mineralization of the initial OM and thus modify the dynamics of Cu. During the incubation of soils amended with plant residues (vine, oat or faba bean leaves), the enzymatic activities and the mineralization of OM intensified. During the first days, a peak in the concentration of MOD and Cu (total and free) indicates a solubilization of labile MO and Cu, concomitant with a drop

in pH. DOM is quickly consumed, causing a decrease in its concentration and an increase in its degree of humification. The dynamics of total Cu in the extracts was significantly impacted by that of DOM while Cu^{2+} depended mainly on pH variations. This confirms the decorrelation between total Cu and Cu^{2+} in the soil extracts of our work.

The results of this thesis indicate that temperature variations could have a limited effect on Cu availability. On the other hand, organic inputs induce significant changes in the dynamics of Cu and depending on the soil. The agronomic management of organic matter could make it possible to better control the availability of copper in vineyard soils.

Keywords: Soil – Organic matter – Copper – Availability - Vineyard

Tables des matières

Liste des figures	6
Liste des tableaux	8
Introduction générale	13

PARTIE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE - DEMARCHE SCIENTIFIQUE - MATERIELS ET METHODES GENERAUX 16

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique 16

1	Les sols, matrices dynamiques et diverses	17
1.1	Composition des sols	17
1.1.1	La phase gazeuse	17
1.1.2	La solution du sol.....	17
1.1.3	La phase solide	19
2	La matière organique dissoute (MOD)	30
2.1	Composition de la MOD	30
2.2	Origines et flux de la MOD dans les sols.....	31
2.3	Facteurs influençant la dynamique de la MOD dans les sols	33
2.4	Techniques de caractérisation de la MOD	34
2.4.1	Analyses par spectrophotométrie UV-Visible	35
2.4.2	Analyses par spectroscopie de fluorescence	36
2.4.3	Parallel factor Analysis (PARAFAC).....	39
2.5	Impact de l'apport de litières fraîches sur la dynamique de la MO et le fonctionnement du sol	40
3	Le cuivre : dynamique dans le sol	41
3.1	Spéciation du cuivre dans la phase solide du sol	41
3.2	Spéciation du cuivre en solution.....	42
3.3	Les mécanismes affectant les échanges sol-solution des métaux.....	43
3.3.1	L'adsorption sur les phases solides	44
3.3.2	La complexation en solution.....	45
3.3.3	La précipitation et la dissolution	45
3.3.4	Cas particulier de l'interaction chimique du Cu avec la MO	46
3.4	Le phénomène d'aging	47
3.5	Disponibilité et biodisponibilité.....	47
3.6	Dynamique du Cu disponible dans les sols	48
3.6.1	Interactions entre MOD et cuivre dans la solution de sol et exploitation des propriétés optiques de la MOD.....	48
3.6.2	Impact de la température sur la disponibilité du cuivre	50
3.6.3	Impact de la minéralisation de MO exogène sur la disponibilité du cuivre	51

3.7	Le cuivre dans les sols viticoles.....	52
-----	--	----

Chapitre 2 : Démarche scientifique de la thèse 54

1	Cadre conceptuel.....	55
2	Objectif et questionnement scientifique	56
3	Stratégie globale d'expérimentations	57
	Chapitre 3 : Matériels et méthodes généraux	60
	Rappel des expériences.....	61
1	Site et matériaux de l'étude.....	61
1.1	Echantillonnage des sols.....	62
1.2	Choix des sols	62
1.3	Echantillonnage des litières	64
2	Incubations	64
3	Protocole d'extraction de la solution de sol	65
4	Dosages analytiques	66
4.1	pH et activité du cuivre libre	66
4.2	Eléments totaux en solution.....	67
4.3	Concentration de COD	67
4.3.1	Mesures des propriétés optiques de la MOD.....	68
4.3.2	Parallel factor Analysis (PARAFAC).....	69
4.4	Mesures de l'activité biologique des sols	69
4.4.1	Taux de minéralisation du carbone	69
4.4.2	Activités enzymatiques	70
5	Traitement des données et analyses statistiques.....	71
	Références	73

PARTIE 2 : CHAPITRES DES RESULTATS D'EXPERIMENTATIONS..... 82

Chapitre 4 : Prédiction de la disponibilité du cuivre dans des sols viticoles via l'exploitation des paramètres optiques de la MOD..... 82

	Prélude.....	83
	Abstract	84
1	Introduction	85
2	Material and methods.....	87
2.1	Soil sampling and analyses.....	87
2.2	Extraction of soil solutions.....	88
2.3	Analyses of soil extracts.....	88
2.3.1	Total dissolved metals and Cu ²⁺ concentrations.....	88
2.3.2	Dissolved organic matter parameters	89
2.4	Statistical analyses	90
2.5	Modelling Cu ²⁺ activity.....	91

3	Results and discussion.....	91
3.1	Soil properties	91
3.2	Elemental composition of the soil extracts and Cu availability	93
3.3	Diversity of soils in terms of DOM properties	94
3.4	Relationships between the variables	96
3.5	Prediction of Cu availability using the properties of the soils and the extracts	100
3.5.1	Prediction of total Cu in extracts Cu_{KCl}	101
3.5.2	Prediction of free ionic Cu^{2+}	102
3.6	Influence of DOC composition on Cu speciation	103
4	Conclusions.....	106
	References	108
	Supplementary information	117
	Synthèse du chapitre	122

Chapitre 5 : Impact de la température de deux sols viticoles sur la dynamique de la MOD et la disponibilité du cuivre 123

	Prélude.....	124
	Résumé	125
1	Introduction	126
2	Matériels et méthodes.....	127
2.1	Design expérimental.....	127
2.1.1	Choix et description des sols	127
2.1.2	Incubation des sols	127
2.2	Mesures	128
2.2.1	Mesures sur les sols	128
2.2.2	Extractions et mesures sur les solutions de sol	129
2.3	Analyse et traitement statistique des données.....	131
3	Résultats	131
3.1	Impact de la température sur les indicateurs de l'activité biologique	131
3.1.1	Minéralisation du carbone	131
3.1.2	Activités enzymatiques	132
3.2	Paramètres de la matière organique dissoute	133
3.2.1	Concentrations et indices spectroscopiques	133
3.2.2	Distribution des composants PARAFAC de la MOD	134
3.3	Impact de la température sur la chimie du sol.....	136
3.3.1	Concentrations de Cu total et pCu dans les extraits	136
3.3.2	pH et concentrations des cations en solution	137
4	Discussion	138
4.1	La nature des sols affecte davantage l'activité biologique des sols que la T°	138
4.2	Les sols étudiés se différencient par l'évolution et la qualité de la MOD	139
4.3	La température affecte-t-elle la disponibilité du cuivre ?	141
5	Conclusions.....	146
	Références	147
	Informations supplémentaires.....	153

Synthèse du chapitre	161
----------------------------	-----

Chapitre 6 : Effets de l'apport de résidus végétaux sur la dynamique de la MOD et du Cu disponible dans le sol 163

Prélude.....	164
--------------	-----

Sous-Chapitre 6.1: Changements de la dynamique de la MOD et du cuivre suite à l'incubation de deux sols viticoles amendés de résidus de feuilles de vigne 165

Résumé	165
1 Introduction	166
2 Matériels et méthodes.....	167
2.1 Design expérimental.....	167
2.1.1 Echantillonnage des sols et des litières.....	167
2.1.2 Analyses des poudres de vigne.....	168
2.1.3 Incubation des sols.....	169
2.2 Mesures	169
2.2.1 Mesures sur les sols.....	169
2.2.2 Extractions et mesures sur les solutions de sol	170
2.3 Traitement statistique des données.....	172
3 Résultats	172
3.1 Minéralisation de la matière organique	172
3.2 Evolution des propriétés de la matière organique dissoute.....	175
3.2.1 Concentration en COD et propriétés optiques.....	175
3.2.2 Evolution des composants PARAFAC	177
3.3 Changements dans la solution du sol	179
3.3.1 Variations du pH	179
3.3.2 Variations des concentrations du Cu et des autres métaux dans les extraits	180
4 Discussion	181
4.1 L'apport des résidus de feuilles de vigne ravive l'activité biologique des sols.....	181
4.2 Impact de l'apport des résidus sur la dynamique et la composition de la MOD	182
4.2.1 Forte augmentation puis diminution de la quantité de MOD dans les extraits.....	182
4.2.2 Evolution de la taille moléculaire, de l'aromaticité et de la composition de la MOD au cours du temps.....	183
4.3 La minéralisation des résidus affecte la disponibilité du cuivre via des changements dans la solution de sol	186
5 Conclusions.....	191
Références	193
Informations supplémentaires.....	198

Sous-Chapitre 6.2: A short-term incubation with cover-crop residues affected OM dynamics and Cu availability in an organic vineyard soil 204

Abstract	204
1 Introduction	205
2 Material and methods.....	206
2.1 Experimental design	206

2.1.1	Soil and litter sampling	206
2.1.2	Plant residues analyses	207
2.1.3	Microcosm incubation	208
2.2	Measurements.....	208
2.2.1	Measurements on incubated soils.....	208
2.2.2	Soil solution extraction and analyses	209
2.3	Statistical treatment.....	211
3	Results	211
3.1	Organic matter mineralization	211
3.2	Dissolved organic matter parameters.....	213
3.2.1	Concentration and optical indices.....	213
3.2.2	PARAFAC components distribution	214
3.3	pH of soil extracts and Cu dynamics.....	220
4	Discussion	221
4.1	The cover crop residues brought soluble materials that boosted soil biological activity 221	
4.1.1	Changes in DOC concentrations and optical parameters	221
4.1.2	Changes in DOM composition	223
4.1.3	Effects of residue supply on the soil biological activity.....	224
4.2	Explaining the changes in Cu availability during cover crop residue mineralization	226
5	Conclusions.....	233
	References	235
	Supplementary information	241
	Synthèse du chapitre	250

Chapitre 7 : Synthèse générale des résultats obtenus et perspectives..... 252

	Rappel du contexte, des objectifs et des hypothèses.....	253
1	Analyse du lien entre dynamique temporelle de la MOD et dynamique du Cu.....	254
1.1	Liens entre dynamique de la MOD et Cu disponible dans des sols à l'équilibre	254
1.2	Liens entre dynamique de la MOD et Cu disponible dans des sols perturbés	256
2	Evaluation globale de la pertinence des propriétés optiques de la MOD	258
3	Indicateurs de disponibilité et potentiels effets écotoxiques	262
4	Perspectives scientifiques	263
5	Implications agronomiques et environnementales des résultats obtenus	265
6	Conclusions finales.....	267
	Références	268

Liste des figures

Chapitre 1

Fig. 1 : Composition volumique d'un sol agricole standard.	18
Fig. 2 : Couches de tétraèdres et d'octaèdres constitutifs des phyllosilicates, structure d'un feuillet 1 :1 de type kaolinite et d'un feuillet 2 :1 type smectite.	20
Fig. 3 : Les constituants de la matière organique du sol	23
Fig. 4 : Rafrachissement des modèles conceptuels sur le devenir des débris organiques dans le sol et leur transformation progressive	27
Fig. 5 : Pousses de féverolle en inter-rang d'une parcelle viticole à Marçillac	30
Fig. 6 : Dynamique (apports et pertes) de MOD dans les sols et les écosystèmes	32
Fig. 7 : Exemple de spectre d'absorbance d'un extrait de sol viticole.	36
Fig. 8 : Projection dans le plan d'une matrice EEM d'extrait de sol viticole	38
Fig. 9 : Méthode de calcul du HIX à partir d'un spectre de fluorescence	39
Fig. 10 : Répartition du cuivre dans les différentes fractions de sols viticoles espagnols	42
Fig. 11 : Mécanismes d'absorption du cuivre sur les surfaces organo-minérales	44
Fig. 12 : Illustration des mécanismes chimiques et biologiques impliqués pour expliquer les notions de disponibilités et biodisponibilité	48
Fig. 13 : Relation entre le ratio Cu :DOC et l'absorbance spécifique à 254 nm (SUVA₂₅₄) pour des extraits de sols agricoles	50
Fig. 14 : Teneurs en cuivre dans les sols de la région Nouvelle Aquitaine	53

Chapitre 2

Fig. 1 : Stratégie de recherche et questions scientifiques de la thèse	59
--	----

Chapitre 3

Fig. 1 : Résumé de la stratégie scientifique et expérimentale de la thèse	72
---	----

Chapitre 4

Fig. 1: Distribution of DOM optical parameters	96
Fig. 2: Principal component analysis (PCA) of soil solution chemistry and Cu availability proxies in the dataset.	97
Fig. 3: Correlation matrix between soil properties and soil solution parameter.	98
Fig. 4: Total Cu concentrations in extracts (Cu_{KCl}) as a function of total Cu in soils Cu_T (a) and pH of the soils (pH_{water}) (b); free ionic Cu concentrations (Cu²⁺) as a function of total Cu concentrations in extracts (c) and pH of the extracts (pH_{KCl}) (d).	99
Fig. 5: Comparison of the multilinear models predicting Cu_{KCl} and Cu²⁺ concentrations in the 0.01 M KCl extracts.	105

Fig. S 1: The ion-selective electrode (ISE) potential response as a function of Cu activity	117
Fig. S 2: Absorbance spectra of the DOM in three out of the 18 vineyard soils extracts.....	117
Fig. S 3: Example of a fluorescence spectrum and method of calculation of HIX	118
Fig. S 4 : Contour EEM plots of the DOM in two of the soils sampled, R.U: Raman unit	118
Fig. S 5 : Influence on DOM composition on predicted Cu²⁺ concentration ([Cu²⁺]_{model}), and its comparison with Cu²⁺ measured in solution ([Cu²⁺]_{exp})	119
Fig. S 6 : Calculated amounts of Cu bound to FA carboxylic groups and phenolic groups as function of extracts pH.....	119

Chapitre 5

Fig. 1 : Evolution de la vitesse de minéralisation nette (a) et de la minéralisation cumulée (b) du carbone dans les deux sols au cours de l'expérience.	132
Fig. 2 : Évolution des activités enzymatiques (cumulées) liées au carbone (a) et à l'azote (b) pendant l'expérience.	133
Fig. 3 : Evolution des indices de quantité et de qualité de la MOD au fil de l'expérience.	134
Fig. 4 : Evolution des abondances des composants PARAFAC au cours de l'incubation dans les deux sols.	136
Fig. 5 : Evolution des concentrations de Cu total dans les extraits (a) et des valeurs de pCu (b) au cours de l'expérience.	137
Fig. 6 : Evolution des valeurs de pH des extraits au cours de l'expérience.	138
Fig. 7 : Le cuivre total dans les extraits et la pCu en fonction du pH (a, d), de la concentration en COD (b, e) et de l'indice d'aromaticité HIX (c, f) dans les extraits des deux sols au cours de l'expérience.	146
Fig. 8 : Le cuivre total dans les extraits en fonction du Fe en solution (a) et du Mn en solution (b) au cours de l'expérience.	146

Fig. S 1 : Représentations des 4 composants issus de l'analyse PARAFAC de cette étude	153
Fig. S 2 : Evolution des intensités de fluorescence maximale des 4 composants PARAFAC, C1 (a), C2 (b), C3 (c) et C4 (d) au cours de l'expérience	154
Fig. S 3 : Évolution des concentrations totales de Fe (a), de Mn (b), de Zn (c) et de Ca (d) dans les extraits de sols au cours de l'expérience.	155
Fig. S 4 : La fluorescence totale (a) et l'absorbance à 254 nm (b) en fonction des concentrations de COD au cours de l'expérience.	155
Fig. S 5 : Le Cu total dans les extraits en fonction des intensités de fluorescence des 4 composants PARAFAC, C1 (a), C2 (b), C3 (c) et C4 (d)	156
Fig. S 6 : La pCu dans les extraits en fonction des pourcentages de fluorescence des composants PARAFAC, C1 (a), C2 (b), C3 (c) et C4 (d) au cours de l'expérience.	157

Chapitre 6

Sous-Chapitre 6.1

Fig. 1 : Minéralisation cumulée du carbone dans les sols durant l'incubation	175
Fig. 2 : Activités enzymatiques liées au carbone (a) et à l'azote (b) dans les sols	175
Fig. 3 : Evolution des paramètres de la MOD au cours de l'incubation	177
Fig. 4 : Evolution pendant l'incubation des sols de la distribution de l'abondance relative des 4 composants déterminés par PARAFAC	179
Fig. 5 : Evolution du pH dans les extraits pendant l'expérience.	180
Fig. 6 : Evolution des paramètres de disponibilité du cuivre pendant l'expérience, avec le cuivre total en solution et la valeur pCu indicateur de l'activité du cuivre libre Cu^{2+}	181
Fig. 7 : Les concentrations de cuivre total en solution et l'activité du cuivre libre en fonction du pH (a, c) et du COD (b, d).	190
Fig. 8 : Les concentrations de cuivre total en solution en fonction des intensités de fluorescence maximales des composants PARAFAC.	191

Fig. S 1 : Spectres des 4 composants (a) C1, (b) C2, (c) C3 et (d) C4 déterminés par l'analyse PARAFAC sur les 136 sols étudiés dans l'expérience	198
Fig. S 2 : Evolution des intensités maximales de fluorescence des composants PARAFAC au cours de l'expérience	199

Fig. S 3 : Relations entre concentration en COD et intensités cumulées de fluorescence des composants C2 et C3 (a), et des composants C1 et C4 (b).	199
Fig. S 4 : Relations entre pH et intensités de fluorescence des composants PARAFAC	200
Fig. S 5 : Les concentrations de Cu dans les extraits (a) et les valeurs de pCu (b) en fonction de l'indice d'aromaticité HIX	200

Sous-Chapitre 6.2

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1: Principaux composants fluorescents de la MOD, d'après Parlanti (2000)	37
--	----

Chapitre 3

Tableau 1 : Caractéristiques des sols étudiés dans la thèse	63
Tableau 2 : Caractéristiques des litières apportées dans les expériences 3 et 4	64

Table 1: Chemical properties of the 18 vineyard soils analysed in this study. C_{org} stands for organic carbon, Cu_T for total Cu. Carbonate values <1 were not quantifiable	92
Table 2 : Values of total Cu in solution and Cu²⁺ reported as toxicity thresholds in the literature, compared with the maximum values found in the present study	94
Table 3: Best models for predicting Cu_{KCl} and Cu²⁺ in KCl extracts and associated statistics. R²_{adj}: adjusted r-squared, RMSE: root mean square error, max VIF: maximum value of the variance inflation factor, N: number of observations	101

Table S 1: Chemical and optical properties of the 0.01 M KCl extracts. Mean values are given with their standard deviations (of triplicate extracts) in parentheses.....	119
---	------------

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques physico-chimiques des deux sols de cette étude.....	127
--	------------

Tableau S 1 : Récapitulatif des résultats des variables mesurées dans les extraits et dans les sols au cours de l'expérience. Les lettres symbolisent les différences significatives entre les valeurs moyennes à différentes dates d'extraction (p < 0.001). nd = Données non disponibles	157
Tableau S 2: Analyses répétées ANOVA pour hiérarchiser les facteurs (température, sol, durée d'incubation) ayant influencé les variables mesurées au cours de cette expérience (niveau de significativité : p < 0.001).	160

Chapitre 6a