

Dans ce chapitre différents résultats d'analyses seront présentés ainsi que les résultats des calculs de stocks de carbone organique total. Pour ce dernier point voici la méthode utilisée :

Le Stock de Carbone Organique Total (SCOT, $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pour toute condition d'usage a été calculé par couche d'échantillonnage : par couche de 5 cm pour les 10 premiers cm, ensuite le calcul se poursuit tous les 10 cm jusqu'à 1 m de profondeur selon la fonction suivante :

$$SCOT = 100 \times E_i \times COT_i \times D_{ai} \times EG_i \text{ où :}$$

E_i = épaisseur de la couche

COT_i = carbone organique total en $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

D_{ai} = densité apparente de la couche en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

EG_i = proportion en éléments grossiers ($> 2 \text{ mm}$)

Pour la totalité du profil, nous avons déterminé le $SCOT_S$ (stock du profil du sol) au moyen de l'équation suivante :

$$SCOT_S = 100 \times \sum_n (E_i \times COT_i \times D_{ai} \times EG_i)$$

I. Analyse quantitative et qualitative de la matière organique des sols de Las Cardas et impact de différents usages des terres

I.1. Généralités

Pour mémoire, Las Cardas se situe à 45 km de la ville d'Ovalle province d'Elqui, région de Coquimbo ($71^\circ 15' 32'' \text{S}$; $30^\circ 13' 59'' \text{W}$).

L'échantillonnage de cette zone d'étude a été réalisé dans trois secteurs soumis à des modes d'usage différents, à savoir un secteur mis en réserve depuis 1973 (56,7 % de couverture végétale), deux secteurs de pâturage : un avec un usage extensif ($6 \text{ unités UPR} \times \text{ha}^{-1} \times \text{année}^{-1}$), et l'autre sous usage intensif ($10 \text{ UPR} \times \text{ha}^{-1} \times \text{année}^{-1}$).

La discussion des résultats de cette zone, ainsi que toutes les autres (Talhuén, Flor del Norte, Camarico, El Palqui, San Pedro de Pichasca et Las Ramadas), porte sur des profils moyens, c'est à dire les valeurs analysées correspondent à la moyenne arithmétique de la variable étudiée par secteur d'usage.

I.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Las Cardas et évolution dans les profils

Les sols des trois secteurs se caractérisent par de faibles teneurs en Carbone Organique Total (COT) (tableau 5.1). En effet, ces teneurs varient de 0,75 et 8,6 g·kg⁻¹ pour le secteur préservé, de 0,17 à 9,27 g·kg⁻¹ pour le mode d'usage extensif et de 0,3 à 7,26 g·kg⁻¹ pour le mode d'usage intensif. En fait, pour ces trois secteurs, partant de valeurs comprises entre 6 et 9 g·kg⁻¹ dans la couche superficielle du sol, les teneurs de COT chutent rapidement à 1 à 3 g·kg⁻¹ à 10 ou 20 cm de profondeur. La baisse du COT se poursuit encore vers la base des profils, mais beaucoup plus progressivement.

Tableau 5.1. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) des trois secteurs sous trois modes d'usage différents à Las Cardas.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g ⁻¹ sol)	IH (mg HC×g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ ×g ⁻¹ COT)
Secteur sans usage					
0 - 5	8,60	8,95	1,46	166	285
5 - 10	6,27	5,24	0,89	145	322
10 - 20	3,05	5,11	0,30	97	493
20 - 30	2,27	3,72	0,19	90	705
30 - 40	2,19	3,65	0,19	83	615
40 - 50	1,37	2,19	0,14	85	725
50 - 60	0,93	1,57	0,07	73	1003
60 - 70	0,82	1,44	0,06	78	1009
70 - 80	0,88	1,60	0,07	78	1099
80 - 90	1,11	2,07	0,09	103	720
90 - 100	0,75	1,56	0,07	124	865
Secteur à usage extensif (6 unités petits ruminants×ha⁻¹×année⁻¹)					
0 - 5	9,27	6,84	1,76	184	249
5 - 10	4,66	4,07	0,61	131	407
10 - 20	1,77	3,11	0,15	88	707
20 - 30	1,40	2,46	0,09	66	757
30 - 40	1,10	1,73	0,07	65	1025
40 - 50	1,52	2,46	0,11	73	764
50 - 60	1,37	1,97	0,11	72	834
60 - 70	1,33	1,98	0,09	66	895
70 - 80	0,85	1,37	0,05	64	1132
80 - 90	0,42	0,87	0,03	81	1356
90 - 100	0,17	0,35	0,01	89	2169
Secteur à usage intensif (10 unités petits ruminants×ha⁻¹×année⁻¹)					
0 - 5	6,96	5,88	1,09	151	245
5 - 10	1,36	0,95	0,19	140	736
10 - 20	0,95	1,49	0,13	156	891
20 - 30	0,76	0,99	0,06	89	1151
30 - 40	0,59	0,67	0,06	103	1468
40 - 50	0,43	0,60	0,05	121	1804
50 - 60	0,44	0,63	0,06	169	1727
60 - 70	0,41	0,66	0,06	149	1358
70 - 80	0,30	0,48	0,05	160	1814
80 - 90	0,35	0,49	0,05	145	1235
90 - 100	0,51	0,63	0,07	144	1385

Ce type de profil est tout à fait général, voire banal et se rencontre dans de très nombreux types de sols, dans des écosystèmes divers (Duchaufour, 1977). Globalement, il

exprime un apport essentiel de matière organique aux sols via les parties aériennes des végétaux, puis la dégradation progressive de ce matériel à proximité de la surface. En profondeur, les faibles valeurs de COT témoignent à la fois de faibles apports organiques *in situ* par le système racinaire (matériel organique et exsudats), ainsi que d'un très mauvais transfert de MO de la surface des profils vers la profondeur. A son tour tout ceci témoigne a priori d'un très mauvais brassage du sol, la percolation de constituants solubles voire en suspension dans l'eau semblant ici pouvoir être exclue en raison de la faiblesse de la pluviosité et de l'absence d'irrigation.

I.3. Qualité de la matière organique

Les données qualitatives sur la MO proviennent essentiellement de la pyrolyse Rock-Eval. Il s'agit essentiellement des index d'Hydrogène IH et d'oxygène IO qui renseignent respectivement sur la richesse en hydrogène et en oxygène de la MO. A ceux-ci s'ajoutent d'autres paramètres (S_2 , R400) fournis par cette même technique et sur lesquels nous reviendrons ci-après, ainsi que des paramètres indépendants tels que le classique C/N.

Nous n'avons pas de données d'analyse de végétaux sources de la MO des sols de la région d'étude qui pourraient nous servir de référence. D'ailleurs, d'une manière générale, il n'existe que très peu de données de pyrolyse Rock-Eval sur des végétaux (surtout sur des plantes herbacées) et même sur de la litière pédologique. Les données fournies par Disnar *et al.*, (2003) sur des litières de savanes africaines révèlent des valeurs de IH voisines ou supérieures à 400 mg de HC \times g⁻¹ de COT. Ainsi un IH de 406 mg de HC \times g⁻¹ de COT a été déterminé pour un horizon O₁-O_f d'une savane du Cameroun. Des valeurs plus élevées peuvent être atteintes dans des litières forestières, par exemple un IH de 650 mg de HC \times g⁻¹ de COT a été trouvé pour une litière forestière, sous chêne et houx. Récemment, des valeurs de IH de 370 et 510 mg de HC \times g⁻¹ de COT ont respectivement été déterminées pour des litières de Cerrado (savane arborée) et une litière de pâturage de graminée *Brachiaria brizantha* (Hochst. Stapf.), du Brésil (Volland-Tuduri, 2005). Si l'on se réfère à ces données antérieures, les IH des sols de Las Cardas qui sont en général très bas dès le sommet des profils (< 200 mg de HC \times g⁻¹ de COT), et révèlent une MO déjà très dégradée. Cette dégradation semble encore s'accroître plus en profondeur où les valeurs d'IH sont généralement encore plus basses, sauf curieusement, dans les niveaux les plus profonds de la

zone sous usage intensif (tableau 5.1). D'une manière générale, la diminution des IH qui est observée en profondeur peut être due : (i) à l'altération de la MO, mais éventuellement aussi (ii) à la présence de carbone réfractaire (« black carbon » ; Copard *et al.*, 2002), soit encore (iii) à un effet de matrice minérale (Espitalié *et al.*, 1986), ces possibilités ne s'excluant pas mutuellement. L'effet de matrice minérale est une rétention des produits de pyrolyse par certains minéraux (essentiellement argileux, illite surtout) qui a pour conséquence d'abaisser les valeurs de IH, sans affecter le COT. L'intensité de cet effet, et donc la baisse de l'IH qu'il entraîne est a priori d'autant plus importante que l'échantillon analysé est pauvre en COT. Afin de tenter de discerner la part de l'un et l'autre des facteurs incriminés, on peut tenter de s'appuyer sur des diagrammes S_2 vs COT, sachant que S_2 est la quantité de constituants hydrocarbonés émis durant la pyrolyse et que le IH est défini comme le S_2 rapporté au COT (Espitalié *et al.*, 1985a).

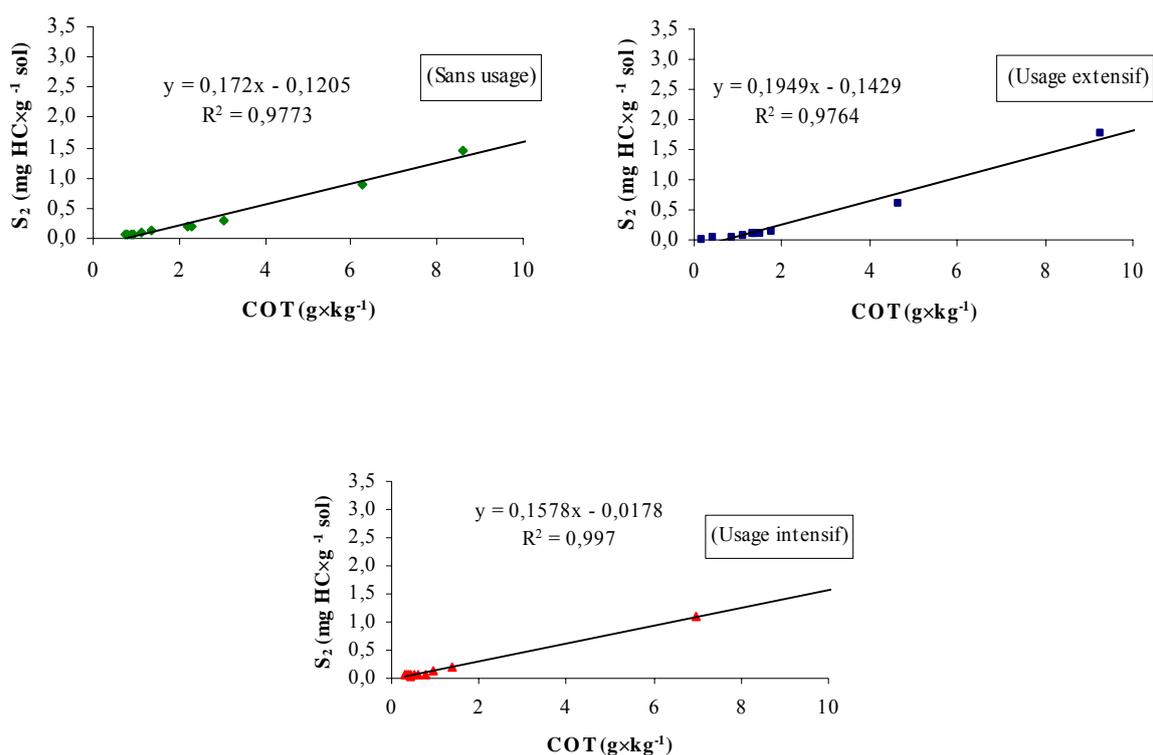


Figure 5.1. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Las Cardas.

Ainsi, pour les trois secteurs (Figure 5.1), on note que les droites définies par l'alignement des points de données intercepte l'axe des abscisses pour des valeurs de COT qui diminuent avec l'intensité de leur exploitation, seul le secteur protégé produisant une valeur

significative (ca. $0,7 \text{ g} \times \text{kg}^{-1}$; Figure 5.1). De manière immédiate, ceci semble exprimer un mélange d'un fond constant de MO dépourvue d'IH avec des proportions variables de MO ayant un IH constant défini par la pente de la droite (nous reviendrons plus loin sur ce dernier point). Parmi les trois hypothèses mentionnées ci-dessus, cette interprétation paraît de prime abord justifier celle du carbone organique réfractaire. Cependant, il faut alors admettre que ce fond serait d'autant plus faible que l'exploitation du sol est importante, la teneur de carbone réfractaire étant même nulle pour le secteur d'usage intensif dont les points de données s'alignent vers l'origine des axes, dans le diagramme S_2 vs COT (Figure 5.1). De même, dans l'hypothèse d'un effet de matrice minérale, il faudrait que celui-ci soit beaucoup plus marqué dans le secteur protégé que dans celui sous usage intensif, et inexistant dans celui d'usage intensif. Ceci ne s'accorde pas avec la distribution des argiles (cf. Chapitre VI) et va à l'inverse des teneurs en COT qui décroissent avec l'intensité de l'exploitation des sols. Par élimination seule subsiste donc l'hypothèse d'une altération de la MO un peu plus accentuée dans la profondeur des profils que dans leur partie superficielle et que dénotent de plus faible IH. Cette interprétation se heurte cependant aux valeurs d'IH relativement élevées trouvées dans plusieurs niveaux en profondeur dans le profil du secteur exploité de manière intensive. Nous reviendrons ultérieurement sur ce dernier point, cependant il convient immédiatement de rappeler les très faibles valeurs de COT du sol de ce secteur, ce qui rend les valeurs d'IH sujette à caution.

Si l'on considère cette fois la pente de la droite de corrélation S_2 vs COT ($\delta S_2 \cdot \delta \text{COT}^{-1}$) celle-ci fournit une valeur moyenne de IH hors altération poussée ou toute autre perturbation (e.g. par effet de matrice minérale ou présence de C réfractaire). Ces valeurs sont égales à 170, 190 et 150 ($\text{mg HC} \cdot \text{g}^{-1}$ de COT), respectivement pour les secteurs préservé, avec usage extensif et avec usage intensif. Ces valeurs d'IH optimales (nécessairement voisines de celles des niveaux superficiels), qui demeurent faibles et voisines les unes des autres pour les trois secteurs d'étude, et soulignent le caractère très peu discriminant de critères de qualité de la MO tels que l'IH pour distinguer les sols de la zone d'étude selon leurs différents usages. *A contrario*, ceci confère un poids supplémentaire au simple carbone organique et à ses variations dans les profils de sols et entre secteurs d'étude.

Si nous ne disposons que de très peu de valeurs d'IH sur les végétaux, voire sur les litières végétales, en revanche nous avons énormément de données en ce qui concerne le rapport C/N (Corg/Ntot) qui est un indice du degré de décomposition de la matière organique, couramment utilisé en pédologie (Duchaufour, 1977 ; Andreux, *et al.*, 1986, Lozet et

Mathieu, 2002 ; Chesworth, 2008). Lozet et Mathieu (2002) donne une valeur générale de C/N de 50 pour la végétation ce qui semble être confirmé par divers autres travaux. Ainsi Comont *et al.*, (2006) donnent des valeurs du ratio C/N comprises entre 38 et 51,5 pour les premiers 5 cm de profondeur de tourbières du Jura, avec des valeurs variant entre 34–39 à 50 cm de profondeur. Peralta (1986) a déterminé des valeurs de C/N allant de 22,9 en surface à 4,5 à 1 m de profondeur dans des sols dérivés de sédiments marins de la région de Coquimbo (Tongoy medio). Dans le tableau 5.2 est présentée l'évolution avec la profondeur des valeurs du rapport C/N de sols hydromorphes d'une zone côtière et de la cordillère du Chili sous végétation de *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser (d'après Donoso, 1992).

Tableau 5.2. Rapport C/N pour deux zones hydromorphes chiliennes sur la Cordillère des Andes et sur la Cordillère de la Côte (Donoso, 1992).

Horizon	C/N	
	Zone Coronel-Maule (C. de la Côte)	Secteur Bullileo (C. des Andes)
1	21,7	22,2
2	21,5	20,0
3	20,7	14,2

Bien que provenant d'écosystèmes souvent assez éloignés de ceux qui font l'objet de cette étude, ces valeurs fournissent néanmoins des valeurs du rapport C/N typiques de végétaux et de sols dans lesquels la MO est a priori bien préservée (histosols et sols hydromorphes) et qui ont donc de ce fait, valeur de référence. La forte décroissance des rapports C/N alors couramment observée entre végétal et sol (i.e. de ca. 50 à 20-25), s'expliquant simplement par la minéralisation des constituants biologiques les plus labiles, mais aussi des plus abondants tels que les polysaccharides : cellulose et hémicellulose.

Les variations des valeurs du paramètre C/N avec la profondeur dans les trois secteurs étudiés sont présentées dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3. Rapport C/N par type d'usage, zone de Las Cardas.

Profondeur (cm)	C/N Sans usage	C/N Usage extensif	C/N Usage intensif
0 - 5	9,98	9,59	11,79
5 - 10	12,57	9,42	4,73
10 - 20	12,62	8,76	5,88
20 - 30	10,25	10,86	8,51
30 - 40	11,22	9,82	9,83
40 - 50	13,17	13,23	13,60
50 - 60	14,73	12,52	4,47
60 - 70	123,52	47,89	10,01
70 - 80	16,77	18,00	10,39
80 - 90	24,74	9,87	6,47
90 - 100	158,52	11,03	4,16

Des valeurs très élevées (50 à plus de 150) sont observées en profondeur dans les secteurs non exploité et d'élevage extensif. De telles valeurs, plus élevées que celles fournies par de la MO végétale fraîche dénotent très certainement un problème analytique. Une perturbation du dosage du carbone par la présence de faibles proportions de carbonates étant *a priori* exclue puisque les données d'analyse du carbone utilisées sont celles du Rock-Eval et non celles du Leco¹ (qui ne fournit que des données de carbone total), l'incertitude majeure semble plutôt imputable à l'azote qui n'est effectivement présent qu'à des teneurs très faibles et donc vraisemblablement affectées d'une forte incertitude. Le profil du secteur sous usage intensif qui ne présente pas de telles anomalies de C/N montre néanmoins des fluctuations notables, avec notamment des valeurs anormalement faibles (ca. 5) à 10 et 60 cm de profondeur. Ce sol étant particulièrement pauvre en MO, on peut ici invoquer un probable problème de dosage du carbone et surtout de l'azote. Compte tenu de ces problèmes, et même en écartant les échantillons les plus anormaux, les valeurs de C/N se doivent d'être examinées avec de nécessaires réserves. Ainsi, pour les secteurs pas et peu exploités ces valeurs demeurent voisines de 10, celles du secteur sous usage intensif étant fréquemment assez proches de cette même valeur. Conformément aux données de la littérature évoquées ci-

¹ : Analyseur infrarouge de carbone, azote et soufre (CNS – 2000)

dessus, une valeur de C/N aussi faible tout au long des profils étudiés dénote une MO très altérée dès la surface, sans accentuation perceptible en profondeur. Ce constat ne fait donc que conforter globalement le diagnostic fourni par l'IH.

Un autre paramètre qualitatif important fourni par la pyrolyse Rock-Eval est l'IO. Ce paramètre, qui fait pendant à l'IH, correspond à la quantité de CO₂ émise durant la pyrolyse Rock-Eval et s'exprime en mg de CO₂ × g⁻¹ de COT. Sa valeur est directement liée au degré d'oxydation de la MO, notamment sous forme de groupements oxygénés carboxyliques qui se décomposent aisément durant la pyrolyse en libérant du CO₂. Comme pour les IH on ne dispose que de très peu de données sur les IO de la MO des sols, des végétaux et des litières, voire encore moins. Disnar *et al.*, (2003) fournissent des valeurs de IO qui vont de 193 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT pour des sols sous forêt de Chênes et Houx, à 216 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT pour des sols cultivés de Montargis (France), soit des valeurs voisines de 200, malgré la grande différence des deux milieux considérés. Volland-Tuduri (2005) a mesuré des valeurs nettement plus faibles pour les litières de Cerrado et de pâturage à *Brachiaria brizantha* (Hochst. Stapf.) du Brésil évoquées précédemment, soit respectivement 86 et 108 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT.

Si l'on se réfère aux valeurs citées ci-dessus, les valeurs d'IO qui globalement sont supérieures à 250 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT témoignent d'une certaine oxydation, dégradation de la MO. L'examen des données présentées dans le tableau 5.1 qui montrent clairement une relation inverse entre valeurs d'IO et de COT va tout à fait dans le sens d'une augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO parallèlement à sa minéralisation partielle. Il arrive fréquemment dans des sédiments récents et éventuellement des sols, que les valeurs d'IO soient influencées par la décomposition, durant l'analyse, de carbonates mal cristallisés, même présents en très faibles proportions (Disnar, comm. pers). Ce phénomène qui pourrait expliquer les valeurs d'IO assez fortes ici observées en profondeur semble néanmoins pouvoir être écarté, une présence de carbonates ne pouvant être exclue localement, mais *a priori* pas régionalement.

D'autres indices fournis par la pyrolyse Rock-Eval et qui peuvent présenter un intérêt immédiat sont l'intensité et la forme du pic d'émission de composés hydrocarbonés durant la pyrolyse S₂ (mg de HC × g⁻¹ de sol), déjà évoqué ci-dessus. La forme générale de ce signal, et notamment sa dissymétrie peuvent être appréciées de diverses manières (e.g. par déconvolution), mais avant tout et de manière immédiate, grâce au paramètre R400 (Disnar *et*

al., 2003). En fait, le paramètre R400 exprime la proportion de MO la plus labile, soit plus précisément la proportion de constituants organiques émis entre 200 et 400°C durant la pyrolyse. Si l'on considère les données présentées dans le tableau 5.4, on peut observer une augmentation du paramètre R400 et donc de la proportion du carbone labile en profondeur dans toutes les trois secteurs d'étude. Ce résultat est tout à fait contraire à ce qu'avaient observé Disnar *et al.*, (2003) pour une large variété de sols de diverses provenances. La différence majeure entre ces sols et ceux de la région d'étude semble résider dans les teneurs en MO très faibles à Las Cardas, cette MO semblant par ailleurs très altérée dès la surface du sol (cf. supra). Partant de ce constat, il peut être envisagé, à titre d'hypothèse, que l'augmentation de la part de MO labile soit simplement due à son oxydation progressive vers la base des profils de sols. Cette augmentation pourrait à la fois provoquer des ruptures de liaisons stables par oxydation (liaisons C-C) et la formation de groupes fonctionnels labiles, groupes carboxyliques, notamment.

Tableau 5.4. Valeurs de R400* de la MO des sols de la zone de Las Cardas.

*Proportion de carbone le plus labile libéré entre 200 et 400°C durant la pyrolyse de la MO.

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage extensif	R400 Usage intensif
0 - 5	0,34	0,33	0,32
5 - 10	0,31	0,30	0,41
10 - 20	0,35	0,36	0,42
20 - 30	0,39	0,40	0,49
30 - 40	0,40	0,44	0,52
40 - 50	0,43	0,41	0,51
50 - 60	0,46	0,44	0,52
60 - 70	0,49	0,46	0,57
70 - 80	0,50	0,51	0,56
80 - 90	0,45	0,53	0,50
90 - 100	0,48	0,56	0,53

I.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

Comme nous venons de le voir dans la section précédente, les trois secteurs d'étude se distinguent immédiatement par leurs stocks respectifs de COT, ceux-ci diminuant notablement avec l'intensité de l'usage du sol, soit 37,1, 27,2 et 13,5 Mg·ha⁻¹, du secteur

préservé à celui sous usage intensif. Les différents secteurs d'étude ne se distinguent aussi que peu, voire plutôt pas, par des changements qualitatifs de la MO, celle-ci étant altérée dès la surface du sol. Néanmoins, on note que si ces trois secteurs se distinguent assez mal par les teneurs maximales de COT trouvées au sommet des profils et qu'ils enregistrent tous une forte baisse du carbone organique dans les niveaux immédiatement sous-jacents, passés les 20 ou 30 premiers centimètres de profondeur les teneurs en COT apparaissent d'autant plus faibles que l'exploitation est importante. Ceci nous amène, à l'instar de Franzluebbers (2002), à considérer la répartition des stocks de carbone entre les parties supérieure et inférieure des profils, soit entre 0-30 cm et 30-100 cm de profondeur (tableau 5.4). Ainsi, on constate immédiatement que, malgré la diminution des stocks de carbone globaux (0-100cm), cette répartition demeure identique entre le secteur préservé et celui sous exploitation extensive, soit un peu plus de 60% de ce stock dans les 30 cm supérieurs du sol. Il n'en va pas de même dans le secteur sous exploitation intensive où la décroissance de 50% qu'a enregistrée le stock de carbone total par rapport au secteur préservé (13,5 contre 37,1 Mg·ha⁻¹ ; tableau 5.5), a accentué le déséquilibre de répartition de ce stock, la part de celui-ci s'élevant désormais à près de 70 % entre 0 et 30 cm de profondeur. Ainsi, il semblerait que la diminution des intrants végétaux au sol qu'entraîne la mise en pâture, déplace simplement l'équilibre de l'écosystème lorsque la densité des animaux demeure faible. En revanche, lorsqu'elle est élevée, cet équilibre n'est vraisemblablement plus préservé et la végétation ne réussit plus à renouveler le stock de carbone. L'accentuation de la diminution de la part de ce stock dans la partie inférieure du sol (où les teneurs de COT sont effectivement très faibles) pourrait au moins *pro parte* s'expliquer par une diminution du matériel racinaire. Selon cette interprétation, la seule utilisation des stocks comme paramètre d'estimation de la qualité d'un sol et sa résistance à l'exploitation serait donc insuffisante.

Tableau 5.5. Carbone organique total (COT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Cardas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*Proportion par rapport au stock de carbone organique total du secteur préservé.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	37,1	23,0 (62 %)	14,1 (38 %)	1,63
Secteur usage extensif	27,2 (73 %)*	16,5 (61 %)	10,7 (39 %)	1,54
Secteur usage intensif	13,5 (36 %)*	9,3 (69 %)	4,2 (31 %)	2,21

I.5. Conclusions sur la zone de Las Cardas

Les teneurs en COT qui sont globalement faibles dans les 3 secteurs d'étude, enregistrent aussi une forte diminution dans les 20 à 30 premiers cm des profils. Au-delà, les teneurs de MO qui sont très faibles, peuvent être qualifiées de résiduelles ($< 2,19 \text{ g COT}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Les teneurs moyennes en COT (et les stocks de carbone) du sol diminuent avec l'intensité croissante de l'exploitation du territoire.

Les faibles valeurs de IH et les valeurs de IO assez élevées enregistrées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée. Cette dégradation se poursuit néanmoins dans la profondeur des profils étudiés.

II. Évolution quantitative et qualitative de la matière organique dans la zone de Talhuén

II.1. Généralités

Le bassin versant de Talhuén se situe à 5 km au nord de la ville d'Ovalle, province de Limarí, région de Coquimbo (30°35' S ; 71°15' W).

Pour cette zone d'étude l'échantillonnage fut réalisé uniquement sur des secteurs soumis à deux types d'usages: un secteur protégé depuis 1957 et une parcelle sous culture d'artichauts, donc sous usage intensif.

II.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Talhuén et évolution dans les profils

Comme à Las Cardas, les profils de sols des deux secteurs d'étude montrent de faibles teneurs en COT dès les horizons superficiels (tableau 5.6). En effet, ces teneurs varient entre 0,81 et 14,03 g·kg⁻¹ pour le secteur mis en réserve et de 0,22 à 8,58 g·kg⁻¹ pour celui qui fait l'objet d'un usage intensif. Ces teneurs enregistrent aussi une très forte décroissance de entre 0 et 30 cm de profondeur, puis tendent à se stabiliser.

Tableau 5.6. Données quantitatives (COT, Stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de deux secteurs sous deux modes d'usage différents à Talhuén.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g sol ⁻¹)	IH (mg HC×g COT ⁻¹)	IO (mg CO ₂ ×g COT ⁻¹)
Secteur sans usage					
0 - 5	14,03	12,15	2,87	199	275
5 - 10	8,88	7,58	1,20	124	314
10 - 20	5,79	9,88	0,58	101	376
20 - 30	2,34	4,02	0,20	106	596
30 - 40	1,31	2,29	0,14	125	936
40 - 50	0,96	1,67	0,12	139	1330
50 - 60	0,78	1,35	0,09	136	1691
60 - 70	0,96	1,70	0,09	130	1637
70 - 80	0,81	1,44	0,08	112	1880
80 - 90	0,89	1,58	0,10	142	2001
90 - 100	0,93	1,70	0,08	110	1431
Secteur usage intensif (culture d'artichauts)					
0 - 5	8,16	7,47	2,25	186	309
5 - 10	8,58	7,72	1,58	171	227
10 - 20	3,95	6,95	0,44	111	387
20 - 30	2,81	5,11	0,53	167	472
30 - 40	1,16	2,02	0,17	213	669
40 - 50	1,00	1,66	0,15	186	774
50 - 60	0,57	1,00	0,10	232	1144
60 - 70	0,55	0,95	0,11	208	1395
70 - 80	0,43	0,76	0,06	152	1706
80 - 90	0,46	0,69	0,08	147	1866
90 - 100	0,22	0,30	0,05	253	1667

Globalement la situation est similaire à celle observée à Las Cardas, avec des teneurs en COT supérieures pour la zone de Talhuén. En profondeur les faibles valeurs de COT témoignent d'apports organiques insuffisants, ainsi qu'une distribution irrégulière de la MO dans le profil (i.e. d'un faible transfert vertical). Cela semble avant pouvoir s'expliquer par l'absence de précipitations susceptibles de favoriser la percolation de constituants solubles au sein du profil.

Comme nous l'avons signalé préalablement, l'hypothèse d'une altération de la MO un peu plus accentuée dans la profondeur des profils semble ici confirmée par les valeurs de COT plus faibles trouvées en profondeur dans le secteur cultivé que dans celui mis en réserve (tableau 5.6).

II.3. Qualité de la matière organique

La nature et l'origine des paramètres qualitatifs (IH, IO, S₂) a été déjà expliquée dans les paragraphes précédents.

Dans le secteur non exploité, les valeurs d'IH sont faibles et proches à celles trouvées dans le secteur préservé de Las Cardas. Ces faibles valeurs (< 200 mg de HC × g⁻¹ de COT) confirment une MO déjà très dégradée dès le sommet des profils. Le degré de dégradation s'accroît en profondeur, sauf dans les niveaux les plus profonds du secteur à usage intensif.

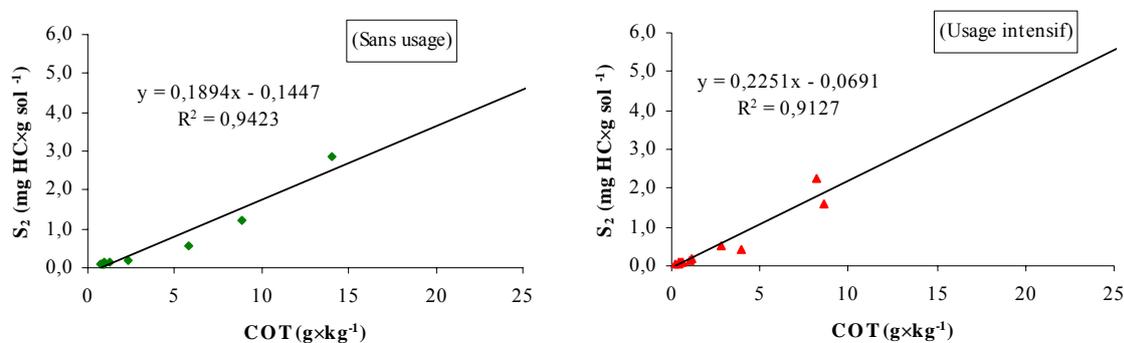


Figure 5.2. Relation S₂ vs COT par type d'usage, zone de Talhuén.

Ainsi, dans le secteur exploité les valeurs d'IH sont assez fluctuantes mais globalement plus élevées que dans le secteur préservé.

Afin de tenter d'expliquer la décroissance du IH avec la profondeur on s'appuiera sur l'analyse des digrammes S₂ vs COT. Pour les deux secteurs d'étude, ces diagrammes nous montrent que pour les deux secteurs les droites définies par l'alignement des points de données interceptent l'axe des abscisses pour des valeurs de COT qui diminuent avec l'intensité de leur exploitation (Figure 5.2), cette valeur atteignant 0,76 g·kg⁻¹ pour le secteur sans usage.

Si l'on considère la pente de la droite de corrélation S₂ vs COT on constate que sa valeur est respectivement égale à 189 et 225 (mg HC·g⁻¹ de sol) pour le secteur sans usage et sous usage intensif. Ces valeurs optimales relativement proches des valeurs d'IH de surface,

ce qui souligne à nouveau le caractère très peu discriminant de critères de qualité de la MO tels que l'IH pour distinguer les sols de la zone d'étude soumis à différents usages.

L'IO prend des valeurs en surface proches de 300 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT et augmente progressivement en profondeur jusqu'à atteindre des valeurs voisines de 2000 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT. A l'inverse de Las Cardas, les IO montrent une croissance en profondeur d'autant plus forte que l'usage est moins intense, même si la différence entre les courbes des secteurs sans usage et sous usage intensif est faible. Cela s'explique par une décroissance des stocks plus homogène tout au long des profils et moins abrupte sur les horizons de surface (entre -0,299 et -0,065 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 50 cm de profondeur pour la condition sans usage et de -0,178 à -0,065 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ pour la condition intensive) expliquée par des textures plus argileuse (Soil Survey Staff, 1999 ; Soto *et al.*, soumis). Tout cela témoigne d'une certaine oxydation de la matière organique (dégradation de la MO), ce que conforte la relation inverse entre les valeurs d'IO et COT (tableau 5.6).

Comme pour le cas de Las Cardas précédemment analysé, les valeurs de R400 sont très faibles au sommet de chaque profil et très proches pour les deux modes d'usage (0,27 pour le secteur sans usage et 0,31 pour celui sous culture intensive). L'accroissement des valeurs de ce paramètre avec la profondeur indique une augmentation de la proportion de carbone labile dans les deux secteurs d'étude. En outre, contrairement à Las Cardas, dans les 20 premiers cm le taux de croissance du R400 est assez constant pour les deux modes d'usages. Entre 20 et 100 cm de profondeur, la part de MO labile augmente presque exponentiellement dans le profil de sol sous usage intensif (tableau 5.7).

L'explication envisagée pour cette observation a été déjà évoquée dans les paragraphes précédents, à savoir que l'augmentation de la part de matière organique labile soit due à l'oxydation progressive de la MO vers la base des profils de sols.

Tableau 5.7. Valeurs de R400* de la MO des sols de la zone de Talhuén.

*Proportion de carbone le plus labile libéré entre 200 et 400°C durant la pyrolyse de la MO..

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage intensif
0 - 5	0,27	0,31
5 - 10	0,28	0,28
10 - 20	0,30	0,34
20 - 30	0,38	0,36
30 - 40	0,41	0,38
40 - 50	0,43	0,41
50 - 60	0,46	0,46
60 - 70	0,47	0,44
70 - 80	0,47	0,52
80 - 90	0,49	0,49
90 - 100	0,48	0,53

II.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

D'après les valeurs d'IH, il n'y a pas ou très peu d'évolution de la MO passés les 20 ou 30 premiers cm de profondeur. Tout au long des profils, la parcelle sous usage intensif présente des valeurs d'IH légèrement supérieures à celles du secteur mis en réserve. Cela peut s'expliquer par l'enfouissement de MO fraîche, peu ou pas dégradée, par le travail mécanique du sol. En dépit de cela, dans les deux secteurs les valeurs d'IO croissent très nettement et assez régulièrement.

Sur les 20 premiers cm la variation de la proportion de carbone labile augmente de manière plus ou moins constante pour les deux modes d'usage, mais avec une intensité ($\delta R400/\delta \text{profondeur}$) deux fois plus élevée dans le secteur sous usage intensif. À partir de 20 cm le rapport $\delta R400/\delta \text{profondeur}$ chute brusquement de 700% pour l'usage intensif, celui du secteur en réserve diminuant que de 300%. Ce quotient prend même des valeurs négatives, qui suggère une décroissance de la part de MO labile. Cela peut s'expliquer par une transformation rapide de la MO dans les premières couches du sol, ce qui témoigne de conditions d'altération rapides et entraîne une forte diminution des stocks de C en profondeur. Nous constatons donc ici l'influence de l'activité agricole sur l'évolution de la MO et des stocks de carbone.

L'analyse de la répartition des stocks de carbone dans les sols montre d'abord une diminution de $10,74 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ entre le secteur exploité intensivement et le secteur sans usage. Cette diminution globale s'accompagne d'une diminution différentielle entre les niveaux 0-30 cm et 30-100 cm. Pour le secteur exploité l'équilibre entre les apports superficiels et profonds de MO n'existe plus. Apparemment, le travail du sol accélère la minéralisation de la MO (Martínez *et al.*, 2008), ce qui doit donc augmenter le flux de CO_2 du sol vers l'atmosphère via l'oxydation du carbone (Reicosky *et al.*, 1997). De plus, les apports racinaires sont probablement inexistantes ou au moins non significatifs dans la profondeur du sol (tableau 5.8).

Tableau 5.8. Carbone organique total (COT) sous les deux modes d'usage pour la zone de Talhuén. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*: En relation au carbone organique totale du secteur sans usage.

	Stock de carbone organique ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	45,3	33,6 (74 %)	11,7 (26 %)	2,87
Secteur usage intensif	34,6 (76 %)*	27,3 (79 %)	7,4 (21 %)	3,69

II.5. Conclusions sur la zone de Talhuén

Les teneurs et les stocks de COT du sol diminuent d'autant plus que l'intensité de l'intervention est importante.

Les teneurs de COT présentent une forte diminution dans les 30 premiers cm.

Les faibles valeurs de IH et les valeurs de IO assez élevées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée comme cela a précédemment vu dans la zone de La Cardas.

L'exploitation des terres entraîne une diminution du stock de carbone et un accroissement du déséquilibre de la répartition de ce stock entre surface (<30 cm) et profondeur. Cette perte pourrait être due au travail du sol.

III. Analyse quantitative et qualitative de la matière organique des sols de Flor del Norte et impact de différents usages des terres

III.1. Généralités

La région de Flor del Norte est située à 7 km au nord de la ville d'Ovalle et fait partie du bassin versant de Talhuén (30°34' S ; 71°15 W).

La géologie, la lithologie et les types de sols correspondent à ceux de Talhuén, décrits dans les paragraphes précédents.

La zone d'échantillonnage comprend deux secteurs sous deux modes d'usage différents : un secteur mis en réserve (depuis 1990) et un soumis à un usage intensif (noyer et prairie de luzerne).

III.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Flor del Norte et évolution dans les profils

Dans le secteur de Flor del Norte les teneurs en COT sont entre 2 et 3 fois plus importantes que dans les zones de Las Cardas et de Talhuén. Ainsi, les valeurs de COT sont comprises entre 1,72 et 13,06 g·kg⁻¹ pour le secteur sans usage et entre 3,67 et 17,58 g·kg⁻¹ pour le secteur sous usage intensif.

Les teneurs en COT du sol chutent moins brusquement avec la profondeur que dans les autres sites. En effet, les teneurs passent de 13 à 5 g·kg⁻¹ et de 17 à 3 g·kg⁻¹ de la surface vers 30 cm de profondeur, respectivement dans les secteurs sans usage et sous usage intensif (tableau 5.9).

Tableau 5.9. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de deux secteurs sous deux modes d'usage différents à Flor del Norte.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g sol ⁻¹)	IH (mg HC×g COT ⁻¹)	IO (mg CO ₂ ×g COT ⁻¹)
Secteur sans usage					
0 - 5	13,06	11,27	2,72	219	264
5 - 10	12,95	11,14	1,70	125	195
10 - 20	9,81	16,93	1,16	111	226
20 - 30	5,71	9,84	0,55	97	266
30 - 40	4,82	8,28	0,47	97	275
40 - 50	3,68	6,35	0,38	108	359
50 - 60	2,58	4,43	0,29	112	363
60 - 70	2,78	3,22	0,28	102	365
70 - 80	2,13	2,47	0,21	102	388
80 - 90	1,78	2,04	0,25	149	560
90 - 100	1,72	2,01	0,26	151	466
Secteur usage intensif (luzerne et noyers)					
0 - 5	17,58	15,05	3,12	179	251
5 - 10	13,02	11,14	1,80	137	250
10 - 20	8,67	14,82	0,98	111	278
20 - 30	4,48	7,63	0,46	103	382
30 - 40	3,43	5,82	0,35	105	497
40 - 50	4,72	7,84	0,52	109	574
50 - 60	3,35	5,57	0,37	135	821
60 - 70	2,77	4,37	0,29	118	773
70 - 80	1,74	2,13	0,17	106	721
80 - 90	1,13	1,03	0,23	160	979
90 - 100	3,67	3,45	1,04	197	465

Comme nous l'avons déjà souligné précédemment, ce type de profil exprime la dynamique du COT dans les sols étudiés, à savoir un apport de MO essentiellement via la partie aérienne de la végétation, puis sa dégradation progressive à proximité de la surface. Cependant, les valeurs de COT qui sont ici moins faibles en profondeur que dans les zones de Las Cardas et de Talhuén, témoignent d'apports de MO plus importants par les systèmes racinaires ainsi et probablement surtout d'un transfert plus actif de MO de la surface des profils vers la profondeur.

III.3. Qualité de la matière organique

L'analyse de la variation des IH au sein des profils montre un comportement équivalent aux deux zones précédentes (Las Cardas et Talhuén), les valeurs étant très basses ($< 200 \text{ mg de HC} \times \text{g}^{-1}$ de COT) mais cependant plus proches de celles de la zone de Talhuén. Comme cela a déjà été évoqué précédemment ces faibles valeurs d'IH indiquent une MO très dégradée dès le sommet de chaque profil.

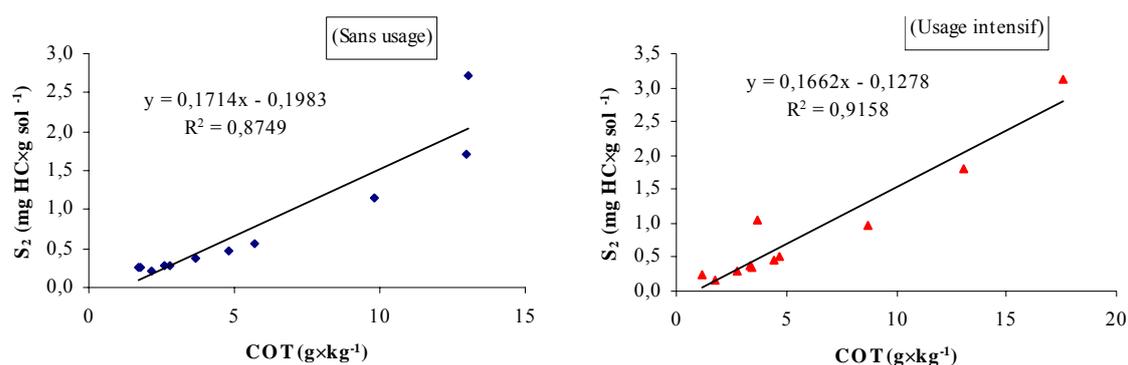


Figure 5.3. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Flor del Norte.

L'analyse des valeurs d'IH présentées dans le tableau 5.9 montre qu'une diminution notable se produit dans les 30 premiers cm. Ensuite on n'observe plus de diminution de ce paramètre et même une augmentation de l'IH vers la base des deux profils.

L'étude des diagrammes S_2 vs COT montre que les droites interceptent l'axe des abscisses pour des valeurs de COT qui diminuent avec l'intensité de l'exploitation (Figure 5.3). Ceci est notamment conforme avec des valeurs d'IH relativement élevées à la base du profil du sol cultivé. Ces valeurs sont aussi accompagnées de teneurs en COT qui sont aussi relativement élevées. Ceci nous amène à invoquer un possible transfert de MO en profondeur, favorisé par la production végétale et l'irrigation. Vers la base du profil, ce transfert peut aussi se trouver arrêté par la présence d'un horizon induré (Oyarzún et Alvarez, 2001).

Les valeurs moyennes d'IH obtenues à partir de la pente des droites S_2 vs COT et qui sont de 170 et 166, respectivement pour le secteur sans usage et le secteur cultivé (Figure 5.3), ne montrent cependant pas de discrimination globale de la qualité de la MO entre les deux secteurs.

Comme dans les zones précédentes les valeurs de l'indice IO témoignent d'une certaine dégradation de la MO. En effet, en surface cet indice présente des valeurs voisines de 300 mg de CO₂×g⁻¹ de COT pour atteindre des valeurs allant de 560 à 980 mg de CO₂×g⁻¹ de COT à 1 m de profondeur. La relation inverse entre l'IO et le COT déjà commentée précédemment se confirme et dénote une probable augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO parallèlement à sa minéralisation partielle (tableau 5.9).

Si l'on analyse le paramètre R400, on observe une augmentation modeste de ses valeurs en profondeur dans les deux secteurs d'étude. Même si les teneurs de matière organique sont ici plus importantes qu'à Las Cardas et Talhuén, le niveau d'altération (oxydation) de la MO en profondeur semble toujours s'accroître en profondeur, mais cependant moins que dans les zones considérées précédemment. A cet égard, il paraît significatif de remarquer que la valeur de paramètre R400 atteinte à la base du profil du secteur cultivé n'est que légèrement supérieure à ce qu'elle était en surface, i.e. 0,28 contre 0,26 (tableau 5.10). Nous reviendrons sur ce dernier point ci-après.

Tableau 5.10. Proportion de carbone labile libérée entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de Flor del Norte.

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage intensif
0 - 5	0,26	0,26
5 - 10	0,26	0,26
10 - 20	0,27	0,27
20 - 30	0,30	0,30
30 - 40	0,32	0,31
40 - 50	0,34	0,32
50 - 60	0,35	0,38
60 - 70	0,34	0,35
70 - 80	0,45	0,36
80 - 90	0,37	0,40
90 - 100	0,33	0,28

III.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

En ce qui concerne les valeurs d'IH, elles sont initialement plus importantes dans le secteur sans usage que dans le secteur cultivé (218 mg de HC×g⁻¹ de COT contre 179 mg de HC×g⁻¹ de COT). Ici encore, comme cela a déjà été signalé dans les paragraphes précédents, une forte diminution de l'IH se produit dans les 30 premiers cm. En dépit de ces différences, vers le milieu des profils, on observe des valeurs d'IH voisines dans les deux secteurs (tableau 5.9). Tout à la base du profil du sol du secteur cultivé, on observe une valeur de IH relativement élevée, i.e. voisine de 200 mg de HC×g⁻¹ de COT. Cette valeur, qui s'accompagne de valeurs de COT et de paramètre R400 elles-mêmes relativement élevées (3,67 g×kg⁻¹ et 0.28) témoigne vraisemblablement d'un apport de MO fraîche des végétaux cultivés (luzerne et/ou noyers).

L'ensemble de ces observations apparaît témoigner de conditions particulières à la zone d'échantillonnée. Ainsi, le secteur sans usage ne posséderait pas assez de végétation susceptible de fournir la MO nécessaire à l'équilibre de l'écosystème. En conséquence, les apports aériens et racinaires seraient inexistant, ce qui aurait comme conséquence une dynamique du carbone très proche de celle d'un secteur à usage intensif.

Dans le cas du secteur sous agriculture intensive les apports réguliers de MO et d'engrais préservent un certain équilibre, même si le travail mécanique peut avoir une forte influence sur la minéralisation du carbone et sur les flux de CO₂ du sol vers l'atmosphère (Franzluebbers, 2002).

De manière inverse à Talhuén, les valeurs de l'indice IO du secteur sous usage intensif sont plus importantes que celles du secteur sans usage tout au long du profil. De plus, la croissance des IO en profondeur est d'autant plus importante que l'usage est intensif. De la même façon qu'à Las Cardas cela s'explique probablement par la forte décroissance des stocks de carbone, qui fait augmenter d'une manière très importante les valeurs de cet indice. Les valeurs atteintes sous usage intensif sont comparables à celles des sols cultivés de la région de Montargis (Disnar *et al.*, 2003).

L'analyse des proportions entre les stocks des épaisseurs 0-30 cm et de 30-100 cm pour les deux modes d'usage nous montre que le quotient de ces stocks partiels demeure presque inchangé malgré la mise en culture (1,71 pour la condition sans usage et 1,61 pour la

condition sous usage intensif, tableau 5.11). Ainsi, on peut admettre que contrairement à la mise en pâture précédemment évoquée à propos de la zone de las Cardas, la mise en culture se traduit plutôt par un accroissement de la production végétale locale qui se traduit par un modeste accroissement des teneurs en carbone du sol sans véritablement perturber la distribution des stocks de MO dans les profils et donc sans conséquence notable sur le fonctionnement de l'écosystème (au moins selon l'indicateur observé). Un autre facteur qui peut être invoqué en ce qui concerne la comparaison de cette zone d'étude avec le secteur préservé de Las Cardas, est la texture du sol, i.e. celle d'un sableux-limoneux (Soil Survey Staff, 1999), soit une texture moins argileuse que celle de la zone de Talhuén.

Tableau 5.11. Carbone organique total (COT) sous les deux modes d'usage pour la zone de Flor del Norte. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*: En relation au carbone organique totale du secteur sans usage.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	78,0	48,6 (62 %)	30,2 (38 %)	1,61
Secteur usage intensif	78,9 (100 %)*	49,2 (63 %)	28,8 (37 %)	1,71

L'observation des stocks de carbone (77,99 et 78,88 Mg·ha⁻¹ respectivement pour les conditions sans usage et usage intensif) et l'analyse des dérivées ($\delta\text{Stocks}/\delta\text{profondeur}$) confirment l'hypothèse déjà évoquée, à savoir un comportement très similaire entre les conditions sans usage et avec usage intensif (de -0,349 à -0,041 Mg·ha⁻¹·cm⁻¹ entre 0 et 100 cm pour le secteur sans usage et de -0,339 à -0,041 Mg·ha⁻¹·cm⁻¹ pour le secteur sous agriculture intensive). La dégradation du carbone en profondeur est plus continue que dans les sites précédemment analysés (Las Cardas, Talhuén).

Les valeurs du R400 au sommet de chaque profil (0,26 pour les deux situations d'usage) sont les plus faibles de toutes les zones analysées jusqu'à présent, i.e. Las Cardas et Talhuén, et sont comparables aux horizons A₁-B_w des Mollisols du Puy Mercœur analysés par Disnar *et al.* (2003).

La variation de la proportion de C labile en profondeur est très faible et très comparable entre les deux modes d'utilisation. Ceci conforte notre interprétation précédente, c'est à dire que la mise en culture semble globalement se traduire par un simple remplacement

d'une flore par une autre, sans perturbation notable du cycle du carbone du sol et donc de l'écosystème, selon le critère ici considéré (tableau 5.10).

III.5. Conclusions sur la zone de Flor del Norte

Les teneurs en COT sont moins faibles que les zones préalablement analysées dans l'ensemble des secteurs étudiés.

Il n'y a pas une différence significative entre les teneurs en COT et stocks de carbone pour les différents modes d'usages.

La distribution des teneurs et stock de carbone dans les sols est beaucoup plus équilibrée que pour les zones préalablement analysées.

Les faibles valeurs d'IH décroissent plus fortement dans les 30 premiers cm. De 30 à 100 cm la décroissance se stabilise et elle est proche de 0. Elles confirment la présence d'une MO fortement altérée.

Les valeurs de IO enregistrées dès la surface du sol, croissantes tout au long du profil, vont dans la même direction que les IH et indiquent une MO d'emblée très dégradée.

IV. Évolution quantitative et qualitative de la matière organique de la zone de Camarico

IV.1. Généralités

La région de Camarico est située à 21 km au sud-ouest de la ville d'Ovalle (30°45' S ; 71°20 W).

La zone d'échantillonnée se situe dans un secteur soumis à un usage intensif de production végétale (vignoble).

IV.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Camarico et évolution dans les profils

Par rapport aux teneurs de carbone organique trouvées dans les zones de Las Cardas (tableau 5.1), Talhuén (tableau 5.6) et Flor del Norte (tableau 5.9), Camarico présente des valeurs de COT supérieures tout au long du profil, soit de 1,49 à 20,28 g·kg⁻¹ entre 0 et 100 cm de profondeur (tableau 14). La décroissance de ces teneurs reste cependant modérée, progressive, entre les niveaux de surface et les couches profondes.

IV.3. Qualité de la matière organique

En dépit de teneurs en COT relativement élevées par rapport aux précédents sites étudiés, l'analyse des IH montre des valeurs très faibles (< 200 mg de HC× g⁻¹ de COT) dès le sommet des profils et n'évoluant que très peu en profondeur. Ceci indique ici encore une matière organique fortement dégradée peu de temps après son incorporation dans le sol (tableau 5.12).

Tableau 5.12. Données quantitatives (COT, Stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) d'un secteur de vignoble à Camarico.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g sol ⁻¹)	IH (mg HC×g COT ⁻¹)	IO (mg CO ₂ ×g COT ⁻¹)
Secteur usage intensif (vignoble)					
0 - 5	20,28	14,01	2,49	134	160
5 - 10	21,64	14,98	2,46	122	153
10 - 20	16,83	23,88	1,95	110	167
20 - 30	18,41	26,21	1,60	89	163
30 - 40	13,21	10,03	1,22	86,	164
40 - 50	12,88	11,60	0,91	68	153
50 - 60	7,34	9,39	0,58	85	258
60 - 70	5,25	7,22	0,45	110	315
70 - 80	4,74	6,24	0,39	96	379
80 - 90	1,49	1,40	0,17	105	600
90 - 100	2,87	2,07	0,29	157	326

Le comportement des IH n'échappe pas à la réalité jusqu'à présent observée : des IH qui diminuent fortement dans les 30 premier cm, suivie d'un comportement plus aléatoire mais avec de très faibles changements entre 30 et 100 cm (tableau 5.12).

L'analyse du diagramme S₂ vs COT présenté dans la Figure 4 montre que les points de données ne s'alignent pas bien selon une droite mais plutôt selon une courbe. Ainsi, l'hypothèse précédemment évoquée d'une altération de la MO un peu plus accentuée dans la profondeur des profils semble se confirmer de nouveau, mais cette fois avec une accentuation particulière de l'altération de la MO (que dénote sa valeur de IH), avec la diminution des teneurs en COT. Il convient cependant de remarquer que cette évolution assez singulière ne s'inscrit en fait que dans une gamme de IH de valeurs très faibles et d'extension limitée entre les 134 mg HC·g⁻¹ de COT observés en surface du sol et celle de 68 mg HC·g⁻¹ de COT à une profondeur voisine de 50 cm.

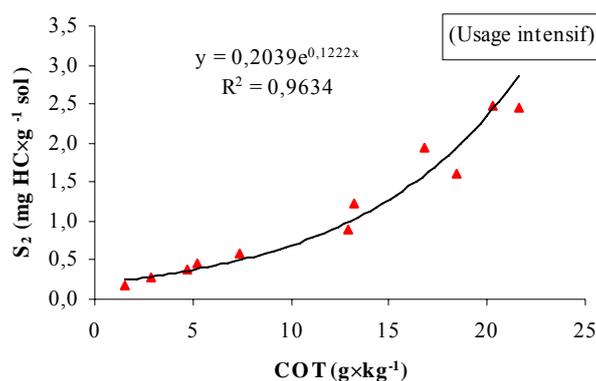


Figure 5.4. Relation S₂ vs COT par type d'usage, zone de Camarico.

En surface l'IO prend des valeurs en surface proches de 160 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT, évoluant jusqu'à des valeurs voisines de 400 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT à 100 cm de profondeur. Ce sont les valeurs les plus basses de toutes les zones analysées jusqu'à présent, la différence des valeurs trouvées à 0 et 100 cm étant très faible.

La relation inverse IO – COT est toujours vérifiée sur cette zone. L'argument d'augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO en parallèle à sa minéralisation progressive semble se confirmer (tableau 5.12).

Comme partout ailleurs l'observation des R400 nous indique une augmentation de la proportion de carbone labile avec la profondeur (tableau 5.13). La règle semble se confirmer puisque on trouve la même tendance qu'à Las Cardas, Talhuén et Flor del Norte. Il existerait donc une augmentation de la part de MO labile due à son oxydation progressive à la base du profil.

Cela montre une dégradation déjà présente de la MO dans tous le profil, accompagné d'une distribution plus homogène de cette MO au sein du sol que dans les autres zones analysées, à la fois sur le plan quantitatif (COT et stock) et qualitatif (IH, IO).

Tableau 5.13. Proportion de carbone labile est non labile libéré entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de Camarico.

Profondeur (cm)	R400 Usage intensif
0 - 5	0,22
5 - 10	0,22
10 - 20	0,21
20 - 30	0,22
30 - 40	0,24
40 - 50	0,24
50 - 60	0,24
60 - 70	0,31
70 - 80	0,34
80 - 90	0,35
90 - 100	0,45

IV.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

Comme nous venons de le signaler, l'IH et donc la qualité de la MO évolue très discrètement avec la profondeur, après les 30 premiers cm. Ainsi l'IO évolue aussi d'une manière assez discrète en profondeur. Dans ce cas particulier, le type de culture (vignes) du site améliore la distribution de la MO tout au long du profil, à la fois sur le plan quantitatif et qualitatif. Les apports aériens (chute de feuille) et racinaires de MO de la vigne, combinés à un travail physique sur le sol, favorisent une meilleure répartition du stock de carbone au sein du sol. À ce sujet un trait morphologique des sols cultivés sous vigne est le déplacement de l'horizon A original vers des billons où sont installées les plantes. On se trouve alors au niveau des billons avec un horizon A_p (apporté) au-dessus de l'horizon A original. Ceci à comme conséquence une distribution racinaire plus régulière tout au long des billons et donc du profil (Álvarez, 2005).

La stratification du stock de C en fonction de la profondeur confirme les arguments déjà énoncés et montre que les valeurs sont comparables aux proportions trouvées dans le secteur mis en réserve de Las Cardas (tableau 5.14).

Tableau 5.14. Carbone organique total (COT) sous usage intensif pour la zone de Camarico. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur usage intensif	127,0 (100%)	79,1 (62 %)	47,9 (38 %)	1,65

L'analyse des valeurs de stocks montre une décroissance plus équilibrée tout au long du profil avec des valeurs qui vont de -0,624 à 0,063 Mg·ha⁻¹·cm⁻¹ entre 0 et 100 cm (tableau 5.13). Les décroissances en profondeur sont sensiblement moins accentuées que dans tous les autres sites étudiés, en particulier Las Cardas (sans usage) où la décroissance en surface est extrêmement marquée à proximité de la surface (tableau 5.1).

Les valeurs de stock de carbone organique varient de 1,40 à 14,98 Mg·ha⁻¹ entre 0 et 100 cm de profondeur, le stock total moyen du profil étant de 127 Mg·ha⁻¹, le plus élevé de toutes les zones analysées jusqu'à présent. Cela peut s'expliquer par le type d'usage et la gestion de la ferme. En effet, et comme nous l'avons déjà expliqué, Camarico est sous culture de vigne, un type d'usage où il existe des apports aériens et racinaires de MO tout au long de la vie du vignoble. D'un autre côté Camarico appartient au groupe Nord-américain Del Monte, qui met beaucoup de moyens technologiques sur l'exploitation : des apports d'engrais et d'eau qui accélèrent et favorisent une production primaire plus importante. D'ailleurs, Camarico en particulier produit 35% de la production totale de raisin de table de toute la Province sur une surface d'exploitation qui comprend 253 ha. De plus les textures argilo-limoneuse en surface et argileuse en profondeur favorisent le stockage de MO apportée.

IV.5. Conclusions sur la zone de Camarico

Les teneurs en COT sont beaucoup plus élevées que dans les zones précédemment étudiées (Las Cardas, Talhuén, Flor del Norte). Elles enregistrent aussi une diminution dans les 20 à 30 premiers cm des profils.

Les teneurs moyennes en COT (et les stocks de carbone) du sol diminuent de manière régulièrement croissante avec la profondeur.

Les faibles valeurs de IH enregistrées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée. La nature de cette MO et /où son mode d'altération particuliers la distinguent de celle des autres sites étudiés par des valeurs de IH particulièrement faibles mais des valeurs d'IO qui elles, n'augmentent que modérément.

V. Évolution quantitative et qualitative de la matière organique El Palqui

V.1. Généralités

La zone d'El Palqui est située à 32 km au sud-est de la ville d'Ovalle (30°46' S ; 70°55 W).

Comme pour le cas de Camarico la zone échantillonnée se situe dans un secteur soumis à un usage intensif (vignoble).

V.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone d'El Palqui et évolution dans les profils

Les sols se caractérisent par de faibles teneurs en COT (tableau 5.12), les résultats se rapprochant surtout de ceux de la zone de Talhuén (tableau 5.6). Les teneurs varient de 0,53 à 12,79 g·kg⁻¹. La décroissance entre les teneurs en surface et les teneurs en profondeur reste modérée.

Tableau 5.15. Données quantitatives (COT, Stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de deux secteurs sous deux modes d'usage différents à El Palqui.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g sol ⁻¹)	IH (mg HC×g COT ⁻¹)	IO (mg CO ₂ ×g COT ⁻¹)
Secteur usage intensif (vignoble)					
0 - 5	12,79	9,63	2,44	172	248
5 - 10	8,52	6,27	2,07	220	309
10 - 20	9,02	13,59	1,14	153	281
20 - 30	5,59	8,82	0,65	137	328
30 - 40	4,40	6,14	0,63	128	289
40 - 50	4,75	5,47	1,16	115	253
50 - 60	1,65	2,26	1,18	171	441
60 - 70	1,85	2,48	1,00	124	340
70 - 80	1,45	2,56	1,04	103	231
80 - 90	0,88	1,55	1,40	121	255
90 - 100	0,53	0,94	1,17	139	354

L'observation des profils montre qu'ils présentent plus ou moins le même comportement que les profils des autres sites. La distribution de la matière organique tout au long du profil reste plus homogène, la décroissance entre la surface et les couches plus profondes étant relativement peu marquée, même si l'analyse porte sur un secteur sous usage intensif.

V.3. Qualité de la matière organique

Le comportement des IH n'échappe pas à la réalité observée jusqu'à présent : des IH avec des valeurs très faibles ($< 200 \text{ mg de HC} \times \text{g}^{-1}$ de COT) dès le sommet des profils qui diminuent fortement dans les 30 premiers cm, suivie d'un comportement plus aléatoire mais avec de très faibles changements entre 30 et 100 cm indiquant une matière organique déjà très dégradée dès la surface du sol (tableau 5.15).

L'analyse du diagramme S_2 vs COT montre que comme à Camarico, les points ne s'alignent pas selon une droite, mais plutôt selon une courbe (Figure 5.5). Assez curieusement cette courbe passe par un minimum avant de réaugmenter à proximité de l'origine des axes. Cette réaugmentation ne traduit en fait que l'existence de valeurs de IH relativement élevées d'échantillons provenant de la profondeur du profil, là où les valeurs de COT sont les plus faibles. Si l'on néglige cela, l'hypothèse d'une altération de la MO d'autant plus accentuée dans la profondeur des profils semble ici confirmée de nouveau, ce qui apparaîtrait logique dans le sens ou la lithologie, les types de sols, voire leur usage (cf. Camarico) sont les mêmes que les secteurs précédents. A ceci, il convient d'ajouter une explication complémentaire pour les valeurs d'IH relativement élevées trouvées en profondeur et qu'accompagnent des valeurs d'IO relativement faibles ($< 400 \text{ mg CO}_2 \times \text{g COT}^{-1}$). Ceci pourrait dénoter des apports de MO fraîche : exsudats racinaires ou MO soluble peu altérée, entraînée en profondeur par les eaux d'irrigation.

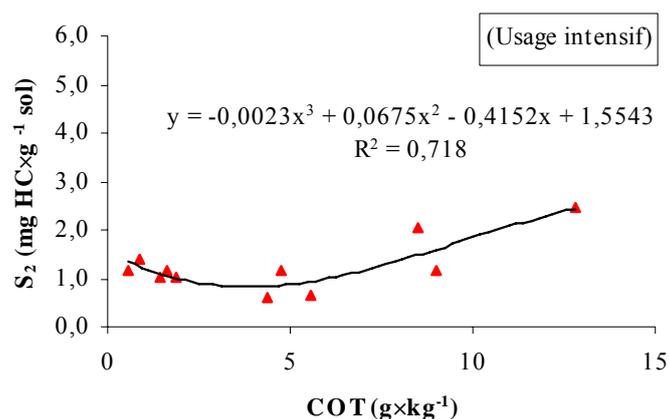


Figure 5.5. Relation S₂ vs COT par type d'usage, zone d'El Palqui.

L'IO prend des valeurs en surface proche de 250 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT, évoluant jusqu'à des valeurs voisines de 350 mg de CO₂ × g⁻¹ de COT à 100 cm de profondeur. Ces valeurs sont donc relativement faibles et constante tout au long du profil.

La relation inverse IO – COT est toujours observée sur cette zone. L'argument d'augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO en parallèle à sa minéralisation partielle semble se confirmer, néanmoins l'évolution demeure ici modeste (tableau 5.15).

Comme partout ailleurs l'observation des R400 nous indique une augmentation de la proportion de carbone labile avec la profondeur (tableau 5.14). La règle semble se confirmer puisque on trouve la même tendance qu'à Las Cardas, Talhuén et Flor del Norte. Il existerait donc une augmentation de la part de MO labile à la base du profil. Conformément à ce que nous avons précédemment envisagé, ceci pourrait être dû à l'altération de la MO résiduelle, mais éventuellement aussi à une introduction de MO labile par voie racinaire ou encore par percolation à partir des niveaux supérieurs du sol.

Tableau 5.16. Proportion de carbone labile est non labile libéré entre 200 et 400°C (R400) pour la zone d'El Palqui.

Profondeur (cm)	R400 Usage intensif
0 - 5	0,22
5 - 10	0,22
10 - 20	0,21
20 - 30	0,22
30 - 40	0,24
40 - 50	0,24
50 - 60	0,24
60 - 70	0,31
70 - 80	0,34
80 - 90	0,35
90 - 100	0,45

V.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

De manière analogue à Camarico, l'IH et donc la qualité de la MO, évolue très discrètement avec la profondeur, après les 30 premiers cm. Ainsi l'IO évolue aussi d'une manière assez modérée en profondeur. Comme nous l'avons déjà expliqué pour la zone de Camarico, le type de culture du site (vigne) favorise une meilleure distribution des paramètres quantitatifs et qualitatifs le long du profil. Les apports aériens (chute des feuilles) et racinaires de MO de la vigne, combiné à un travail physique sur le sol, améliorent la répartition du stock de carbone au sein du sol. La présence de billons de plantation due au déplacement de l'horizon A original à comme conséquence une distribution racinaire plus régulière tout au long du profil (Álvarez, 2005).

La stratification du stock de C en fonction de la profondeur confirme les arguments déjà énoncés et montre que les valeurs sont comparables aux proportions trouvées dans le secteur mis en réserve de Las Cardas, ainsi que dans celui aussi cultivé en vigne de Camarico (tableau 5.17).

Tableau 5.17. Carbone organique total (COT) sous usage intensif pour la zone d'El Palqui. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur usage intensif	59,7 (100%)	38,3 (64 %)	21,4 (36 %)	1,79

De manière analogue à la zone de Camarico, l'analyse des valeurs de stocks montre une décroissance plus équilibrée tout au long du profil avec des décroissances en profondeur qui évoluent de -0,624 à 0,063 Mg·ha⁻¹·cm⁻¹ entre 0 et 100 cm (tableau 5.16). Ces décroissances sont sensiblement moins fortes que pour tous les autres sites étudiés, en particulier Las Cardas (sans usage) où la décroissance est extrêmement marquée en surface (tableau 5.1).

Les valeurs de stock de carbone organique varient de 0,94 à 13,59 Mg·ha⁻¹ entre 0 et 100 cm de profondeur, le stock total moyen du profil étant de 59,72 Mg·ha⁻¹.

L'essentiel des explications de ces valeurs a déjà été évoqué dans les paragraphes précédents : un type d'usage (vignoble) où il existe des apports constant aériens et racinaires de MO, et une gestion qui met en œuvre beaucoup de moyens technologiques sur l'exploitation : des apports d'engrais et d'eau qui accélèrent et favorisent une production primaire plus importante. De plus les textures argileux-limoneux favorisent le stockage de MO.

V.5. Conclusions sur la zone d'El Palqui

Les teneurs en COT sont proches des valeurs de Flor del Norte. Ils enregistrent aussi une diminution dans les 30 premiers cm de profondeur.

Les teneurs moyennes en COT (et les stocks de carbone) du sol diminuent de manière régulièrement croissante avec la profondeur.

Les faibles valeurs de IH et les valeurs de IO assez élevées enregistrées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée.

VI. Évolution quantitative et qualitative de la matière organique de la zone de San Pedro de Pichasca

VI.1. Généralités

Le bassin de San Pedro de Pichasca se trouve à 36,7 km au nord-est de la ville d'Ovalle, province de Limarí, région de Coquimbo (30°24' S ; 70°53' W).

L'échantillonnage a porté sur trois secteurs de mode d'usage différent : (a) le secteur sans usage correspond à une parcelle d'une réserve naturelle appartenant au service forestier chilien (CONAF) depuis 1981, (b) un secteur sous usage extensif (ancienne prairie de luzerne abandonnée et (c) un secteur sous usage intensif (vignoble).

VI.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de San Pedro de Pichasca et évolution dans les profils

Les profils des sols de cette zone montrent des valeurs de MO plus importantes que pour le reste de la séquence altitudinale, avec un écart important entre le secteur préservé et ceux sous usages extensif et intensif. En effet les valeurs varient de 0,31 à 2,18 g·kg⁻¹ pour le secteur sans usage, de 1,01 à 21,22 g·kg⁻¹ pour l'usage extensif et de 0,8 à 17,22 g·kg⁻¹ dans le secteur sous usage intensif (tableau 5.18).

Tableau 5.18. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de trois secteurs sous trois modes d'usage différents à San Pedro de Pichasca.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g ⁻¹ sol)	IH (mg HC×g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ ×g ⁻¹ COT)
Secteur sans usage					
0 - 5	2,18	1,95	0,31	134	380
5 - 10	1,31	1,17	0,17	134	506
10 - 20	0,81	1,45	0,09	119	645
20 - 30	0,69	1,24	0,08	120	746
30 - 40	0,61	1,08	0,08	139	754
40 - 50	0,45	0,77	0,07	173	1258
50 - 60	0,38	0,67	0,06	171	1248
60 - 70	0,35	0,63	0,05	156	1233
70 - 80	0,23	0,41	0,04	187	1475
80 - 90	0,29	0,51	0,05	170	1123
90 - 100	0,31	0,55	0,05	138	1014
Secteur à usage extensif (prairie à l'abandon)					
0 - 5	27,57	21,22	6,92	251	238
5 - 10	11,07	8,48	1,53	136	284
10 - 20	4,49	6,89	0,46	100	354
20 - 30	5,20	7,91	0,37	81	557
30 - 40	4,40	6,68	0,74	161	511
40 - 50	1,26	1,92	0,26	204	925
50 - 60	0,77	1,19	3,29	208	775
60 - 70	1,28	1,98	0,68	148	651
70 - 80	0,68	1,06	0,23	143	844
80 - 90	0,65	1,01	0,18	145	899
90 - 100	-	-	-	-	-
Secteur à usage intensif (vignoble depuis 10 mois)					
0 - 5	21,82	17,22	5,94	271	218
5 - 10	11,35	9,47	2,08	183	231
10 - 20	6,89	11,49	0,90	129	260
20 - 30	5,41	9,26	0,65	119	270
30 - 40	2,64	4,66	0,30	126	482
40 - 50	1,74	2,87	0,20	121	614
50 - 60	1,78	2,85	0,29	164	522
60 - 70	0,71	1,20	0,10	151	1516
70 - 80	0,87	1,44	0,23	182	1607
80 - 90	1,00	1,72	0,28	187	890
90 - 100	0,53	0,80	0,18	259	1140

La situation des profils sous usage extensif et intensif reste plutôt proche du profil d'El Palqui, c'est-à-dire des profils avec des contenus en MO plus importants, et une distribution

en profondeur plus équilibrée. Cependant le secteur protégé présente des valeurs extrêmement faibles avec une variation très légère entre la surface et la profondeur.

VI.3. Qualité de la matière organique

Les valeurs d'IH restent relativement faibles comme partout ailleurs. Cependant les différences entre la surface et la profondeur restent plus discrètes. Le degré de dégradation reste très important pour le profil du secteur préservé avec des valeurs des valeurs de IH très faibles comprises entre 134 et 187 mg HC·g⁻¹ de COT. En revanche, la MO des sols des secteurs sous usage extensif et intensif s'avère beaucoup moins altérée, avec en surface des valeurs de IH qui se situent autour de 260 mg HC·g⁻¹ de COT.

L'analyse des diagrammes S₂ vs COT (figure 6) met en évidence la différence des taux de minéralisation de la MO entre le secteur préservé et les secteurs sous usage extensif et intensif respectivement. En premier lieu, grâce à l'échelle nous pouvons voir une nette différence des valeurs du S₂ et du COT, entre le secteur préservé (faibles valeurs) et les secteurs exploités. La valeur moyenne d'IH obtenue à partir de la pente ($\delta S_2 \cdot \delta COT^{-1}$) de la droite du graphique du secteur sans usage (IH = 135 mg HC·g⁻¹ de COT) met en évidence la présence d'une MO dégradée tout au long du profil. Sur le graphique du secteur sous usage extensif, on peut noter une pente négative ($\delta S_2 \cdot \delta COT^{-1}$) pour les valeurs de COT comprises entre 0 et 4,68 g·kg⁻¹ (entre 0-30 cm), puis une pente positive au-delà de 30 cm. Ceci correspond bien à une diminution de l'IH sur les 30 premiers cm puis à une augmentation. Toutefois que ce soit dans le secteur sous usage extensif ou le secteur sous usage intensif, on peut décrire une tendance générale à l'augmentation des valeurs en S₂ et COT. Cette évolution est en accord avec une tendance croissante des taux de minéralisation avec la profondeur.

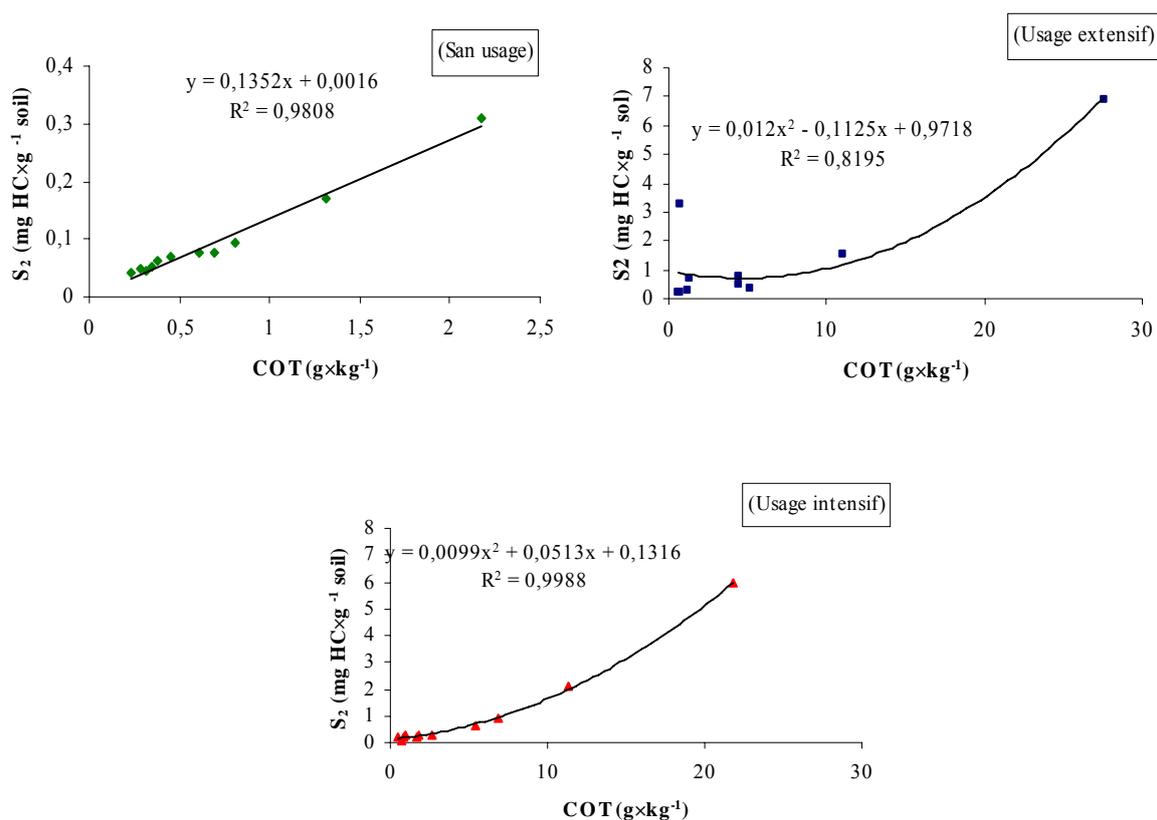


Figure 5.6. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de San Pedro de Pichasca.

Les valeurs de l'indice IO, témoignent toujours d'une certaine dégradation de la MO. Sur les trois secteurs, on observe une augmentation des valeurs d'IO avec la profondeur. De plus, une nette augmentation des IO est à noter, vers 40-50 cm dans le secteur préservé et celui sous usage extensif, et vers 60-70 cm pour le secteur sous usage intensif.

La tendance générale des valeurs de R400 est une croissance avec des valeurs supérieures pour le secteur sans usage. Dès la surface, les valeurs observées sur les trois secteurs sont proches. Sur cette zone d'étude, le niveau d'altération de la MO en profondeur reste toujours conséquent.

Tableau 5.19. Proportion de carbone labile libérée entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de San Pedro de Pichasca.

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage extensif	R400 Usage intensif
0 - 5	0,32	0,29	0,34
5 - 10	0,35	0,25	0,29
10 - 20	0,40	0,29	0,29
20 - 30	0,41	0,30	0,31
30 - 40	0,43	0,29	0,34
40 - 50	0,45	0,34	0,36
50 - 60	0,47	0,36	0,36
60 - 70	0,47	0,31	0,45
70 - 80	0,49	0,35	0,43
80 - 90	0,50	0,37	0,46
90 - 100	0,48	-	0,46

VI.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

Comme nous l'avons signalé dans le paragraphe précédent, les valeurs d'IH diminuent sur les 30 premiers cm puis augmentent. Cependant, on observe des valeurs relativement homogènes pour le secteur sans usage, ce qui peut être expliqué par des conditions d'altitude (~900 m) proches de la haute montagne et donc une action négative de la température sur la dégradation de la MO.

Les valeurs des IO du sol du secteur sans usage sont plus élevées sur l'ensemble du profil, en comparaison avec les secteurs exploités. De plus, plus l'usage est important plus les valeurs en IO augmentent avec la profondeur. Comme pour la zone Flor del Norte, ceci peut s'expliquer par la forte décroissance des stocks de carbone, faisant ainsi augmenter les valeurs de cet indice.

Les stocks de carbone sont d'autant plus élevés que l'usage est important, ce qui exprime immédiatement l'impact de la production végétale sur le stock de carbone du sol. Ainsi, les proportions des stocks de C comprises entre 0-30 et 30-100 cm sont nettement différentes entre le secteur sans usage (quotient de 1,4) et les secteurs exploités (quotient de 3,2). Dans le secteur sans usage, la valeur relativement faible de ce quotient (1,4) nous indique un certain équilibre entre la surface et la profondeur (tableau 5.20). En revanche, en

ce qui concerne les secteurs exploités, quelque soit l'usage du sol, les $\frac{3}{4}$ du stock de carbone demeure concentrés dans les 30 premiers cm. Ainsi, en plus de la très forte augmentation des stocks de carbone entre le secteur préservé et les secteurs exploités (facteur 6), on observe un fort déséquilibre entre la surface et la profondeur, probablement lié d'une part à un apport en MO dû aux cultures, mais d'autre part aussi à un effet climatique. En effet, des températures plus basses peuvent accentuer ce déséquilibre par une plus faible dégradation de la MO en surface et donc une concentration relative de cette dernière.

Tableau 5.20. Carbone organique total (COT) sous les trois modes d'usage pour la zone de San Pedro de Pichasca. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*Proportion par rapport au stock de carbone organique total du secteur préservé.

	Stock de carbone organique (Mg-ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	10,43	5,81 (56 %)	4,07 (39 %)	1,4
Secteur usage extensif	58,34 (604 %)*	44,50 (76 %)	13,84 (24 %)	3,2
Secteur usage intensif	62,98 (559 %)*	47,44 (75 %)	14,74 (23 %)	3,2

VI.5. Conclusions sur la zone de San Pedro de Pichasca

Les teneurs en COT qui sont globalement faibles dans les 3 secteurs d'étude, enregistrent aussi une forte diminution dans les 30 premiers cm des profils.

Les faibles valeurs de IH et les valeurs de IO assez élevées enregistrées dès la surface du sol indiquent une MO d'emblée très dégradée.

Les teneurs et stock de MO présentent un comportement inverse à ceux trouvés dans les autres sites : les teneurs moyennes en COT (et les stocks de carbone) du sol augmentent avec l'intensité croissante de l'exploitation du territoire. Ceci indique un stockage dans le sol, et plus particulièrement dans sa partie supérieure, d'une part de la production végétale.

VII. Évolution quantitative et qualitative de la matière organique de la zone de Las Ramadas

VII.1. Généralités

La zone de Las Ramadas se trouve à 76,2 km au sud-est de la ville d'Ovalle, province de Limarí, région de Coquimbo (30°12' S ; 70°34' W).

L'échantillonnage a été fait sur trois modes d'usage : (a) le secteur sans usage, (b) un secteur sous usage extensif (plantation de noyer de 9 mois et (c) un secteur sous usage intensif (noyers de 4 et 8 ans).

VII.2. Teneurs en Matière Organique (MO) des sols de la zone de Las Ramadas et évolution dans les profils

Les profils de sols de cette zone montrent les valeurs de MO les plus importantes de toute la séquence altitudinale choisie et ce quelque soit l'usage. En effet, les valeurs varient de 3,38 à 57,8 g·kg⁻¹ pour le secteur sans usage, de 1,99 à 19 g·kg⁻¹ pour l'usage extensif et de 2,72 à 62,84 g·kg⁻¹ dans le secteur sous usage intensif (tableau 5.21).

Tableau 5.21. Données quantitatives (COT, stock de C) et qualitatives (IH, IO, S₂) de trois secteurs sous trois modes d'usage différents à Las Ramadas.

Profondeur (cm)	COT (g×kg ⁻¹)	Stock de C (Mg×ha ⁻¹)	S ₂ (mg HC×g ⁻¹ sol)	IH (mg HC×g ⁻¹ COT)	IO (mg CO ₂ ×g ⁻¹ COT)
Secteur sans usage					
0 - 5	57,80	36,54	19,34	333	168
5 - 10	37,14	23,15	9,89	263	189
10 - 20	23,13	29,69	4,57	197	209
20 - 30	15,87	20,84	2,59	164	220
30 - 40	8,19	11,75	0,87	110	313
40 - 50	7,76	11,55	1,01	128	323
50 - 60	10,12	10,36	1,36	129	311
60 - 70	4,93	5,42	0,67	135	369
70 - 80	5,76	6,16	0,80	137	354
80 - 90	3,38	3,65	0,45	133	455
90 - 100	10,13	9,62	1,82	180	241
Secteur à usage extensif (noyers de 9 mois)					
0 - 5	18,14	11,85	11,24	182	281
5 - 10	19,00	12,50	6,59	182	268
10 - 20	15,12	20,13	3,75	169	277
20 - 30	10,25	13,73	2,10	140	316
30 - 40	8,49	11,42	1,10	120	334
40 - 50	5,43	7,75	0,89	116	478
50 - 60	4,11	5,97	1,22	107	567
60 - 70	3,28	4,77	0,50	95	631
70 - 80	2,89	4,69	0,66	92	629
80 - 90	2,16	2,54	0,40	128	702
90 - 100	1,99	3,48	1,82	109	742
Secteur à usage intensif (noyers de 8 ans)					
0 - 5	62,84	40,92	22,92	356	139
5 - 10	23,71	22,73	5,36	226	167
10 - 20	15,73	22,63	2,91	181	185
20 - 30	10,76	15,89	1,72	179	215
30 - 40	9,52	14,04	1,27	317	279
40 - 50	9,65	14,25	1,13	296	254
50 - 60	10,57	15,64	1,07	216	338
60 - 70	7,32	10,62	0,77	162	241
70 - 80	6,34	8,39	0,62	123	221
80 - 90	5,65	7,89	0,66	227	385
90 - 100	2,72	3,76	0,36	175	364

Les profils de carbone indiquent le même comportement que dans les zones déjà analysées : un apport essentiel de MO au sol *via* les parties aériennes des végétaux, puis une dégradation progressive de ce matériel en profondeur.

Les fortes teneurs en carbone des sols de cette zone de Las Ramadas, les plus élevées, de l'ensemble des zones étudiées, peuvent s'expliquer par le fait que l'on se situe au niveau de la Cordillère où les précipitations plus abondantes (neige et pluie, ~172 mm/an), associées à une altitude élevée et des températures plus fraîches (1500 m - ~15°C), permettent le développement et la pérennisation d'une couverture végétale particulière, responsable de forts apports en carbone, mais aussi d'un ralentissement de la dégradation de la MO.

VII.3. Qualité de la matière organique

Sur l'ensemble des secteurs étudiés, les valeurs d'IH diminuent fortement dans les 30 premiers cm, puis plus lentement en profondeur.

Si l'on compare ces valeurs d'IH avec celles des autres zones d'études, on note qu'elles sont supérieures et cela est notamment plus flagrant en surface. Ceci confirme les arguments évoqués précédemment, i.e. une plus faible dégradation de la MO dans cette zone.

Les diagrammes S_2 vs COT de la Figure 5.7 montrent que les points de données s'alignent selon une courbe. On remarque que sur l'ensemble des profils, l'altération de la MO semble être plus importante en profondeur qu'en surface. En effet, ceci se corrèle à la diminution générale des IH en profondeur mais également à celle des COT.

Globalement les valeurs d'IO sont plus faibles dans cette zone : 196 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT en surface et 449 mg de $\text{CO}_2 \times \text{g}^{-1}$ de COT en profondeur. Ces valeurs basses sont voisines de celles observées dans la zone de Camarico. Ici encore, les évolutions inverses du COT et de l'IO en fonction de la profondeur, nous indiquent une augmentation des teneurs en groupements oxygénés de la MO en parallèle à sa minéralisation progressive.

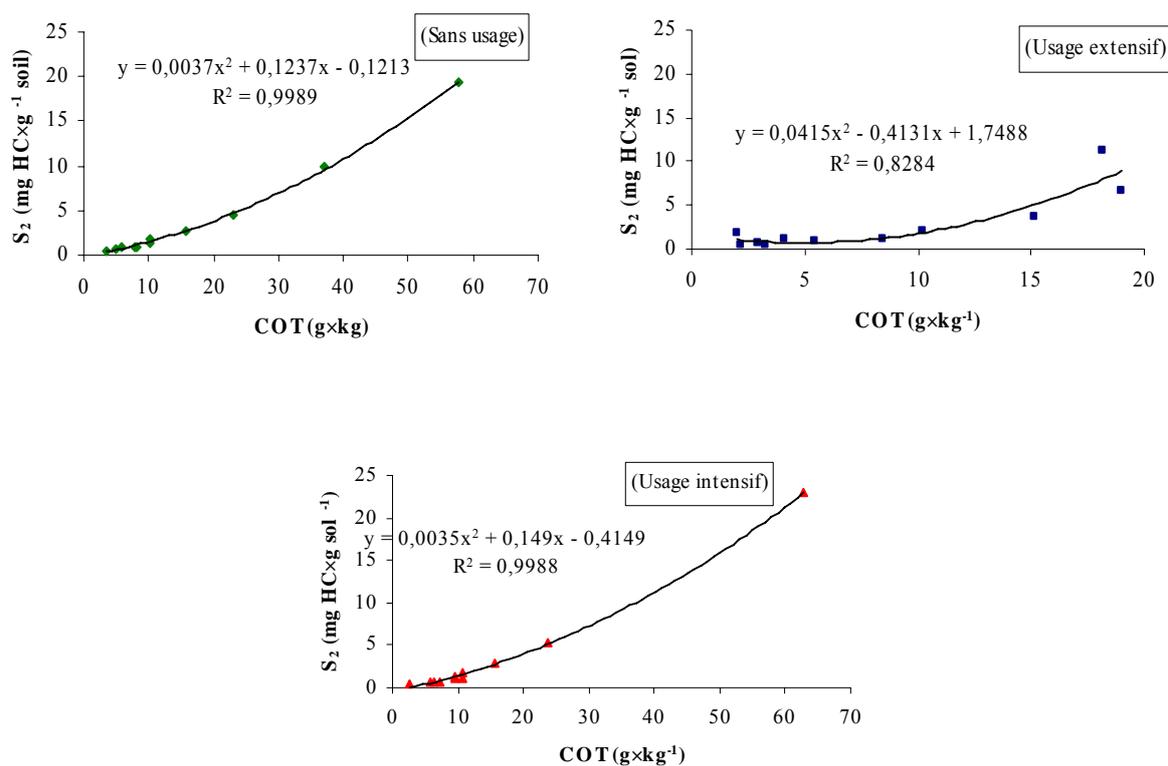


Figure 5.7. Relation S_2 vs COT par type d'usage, zone de Las Ramadas.

Les R400 de la zone de Las Ramadas évoluent de manière opposée à toutes les autres zones d'étude. En effet, il existe une diminution en surface puis une stabilisation des valeurs de R400 en profondeur. Il existerait donc une diminution de la part de MO labile à la base du profil. Les études sur différents types de sols dans plusieurs pays (podzol au Canada, andosol en France, cambisol en Grande-Bretagne, ...) menées par Disnar *et al.*, (2003) montrent une décroissance des R400 associée à une diminution des COT et de l'IH, comme dans notre cas. Ces auteurs expliquent cette évolution par un changement de la structure de la MO, du fait de la formation de composés humiques à partir de biopolymères (tableau 5.22).

Tableau 5.22. Proportion de carbone labile libérée entre 200 et 400°C (R400) pour la zone de Las Ramadas.

Profondeur (cm)	R400 Sans usage	R400 Usage extensif	R400 Usage intensif
0 - 5	0,48	0,37	0,45
5 - 10	0,44	0,36	0,37
10 - 20	0,40	0,36	0,36
20 - 30	0,37	0,36	0,36
30 - 40	0,36	0,35	0,32
40 - 50	0,35	0,37	0,30
50 - 60	0,37	0,37	0,33
60 - 70	0,36	0,38	0,32
70 - 80	0,37	0,37	0,31
80 - 90	0,38	0,34	0,33
90 - 100	0,33	0,35	0,34

VII.4. Influence de l'usage des sols sur la qualité et la quantité de la matière organique

Les valeurs d'IH sont proches pour les conditions sans usage et usage intensif. On observe une diminution sur les 30 à 40 premiers cm puis à une réaugmentation. Sur le secteur sous usage extensif la diminution de l'IH se fait sur les 80 premiers cm.

Pour le secteur sous usage extensif les valeurs d'IO sont plus élevées sur l'ensemble du profil que dans les secteurs sans usage et sous usage intensif. Ceci peut s'expliquer par la forte décroissance des stocks de carbone sous ce mode d'usage, faisant ainsi augmenter les valeurs de cet indice.

Au contraire des autres zones déjà analysées on ne peut pas établir une relation claire entre l'effet de l'usage et les stocks de carbone, la condition sous usage intensif étant la plus riche (176 Mg·ha⁻¹), suivie de la condition sans usage (163,9 Mg·ha⁻¹), puis de la condition sous usage extensif (98,8 Mg·ha⁻¹). Les proportions des stocks entre 0-30 et 30-100 cm sont nettement différentes entre le secteur sans usage (2,1) et les secteurs sous usage extensif et intensif (1,4). Contrairement à toutes les autres zones échantillonnées tout au long de notre transect régional, les proportions des stocks entre 0-30 et 30-100 cm pour les secteurs sous usage extensif et intensif présentent une meilleure répartition de stocks entre la surface et la profondeur par rapport à la situation sans usage (tableau 5.23). Cela peut s'expliquer

partiellement par la position topographique des profils du secteur sans usage. En effet, ces profils sont proches du sommet de la montagne où les horizons A, E et B sont presque inexistantes, favorisant en surface et en profondeur les ruissellements qu'entraînent les précipitations.

Tableau 5.23. Carbone organique total (COT) sous les trois modes d'usage pour la zone de Las Ramadas. Proportion du COT de 0-30 et 30-100 cm.

*Proportion par rapport au stock de carbone organique total du secteur préservé.

	Stock de carbone organique (Mg·ha ⁻¹)			Quotient des stocks de C 0-30 / 30-100 cm
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm	
Secteur sans usage	163,9	110,2 (67 %)	53,7 (33 %)	2,1
Secteur usage extensif	98,8 (60 %)*	58,2 (59 %)	40,6 (41 %)	1,4
Secteur usage intensif	176,8 (108 %)*	102,2 (58 %)	74,6 (42 %)	1,4

VII.5. Conclusions sur la zone de Las Ramadas

Les teneurs en COT sont relativement importantes quelque soit l'usage du sol, mais on ne peut pas établir de relation directe entre les teneurs et stocks de MO et l'usage des sols.

Les valeurs élevées en S₂ et la distribution en profondeur des R400, IH et IO montrent une MO moins dégradée que dans les autres sites analysés.

VIII. Conclusions générales

Globalement les teneurs et stocks de MO augmentent régionalement selon un axe ouest-est. Ce comportement va dans le même sens qu'une augmentation des altitudes et des précipitations moyennes, à l'opposé des températures moyennes.

Les teneurs et stocks de MO du sol dépendent de la position sur cet axe ouest-est, en fonction de l'intensité de l'usage des terres. Les zones plus proches de la côte, à de plus basses altitudes, avec des précipitations moyennes inférieures et des températures plus élevées, présentent un comportement inversement proportionnel à l'intensité de l'usage (Las Cardas, Talhuén), i.e. un stock maximal pour les secteurs sans usage. Pour les zones situées en moyenne et haute montagne le comportement s'inverse (Pichasca, Las Ramadas) : un stock maximal pour les secteurs sous culture intensive. De plus le type d'usage de Las Cardas (pâturages) accentue encore plus les conséquences de l'intensité de l'usage : le pâturage étant une activité plutôt extractive de MO, où les apports en surface sont marginaux (excréments) et les apports racinaires inexistant.

Par ailleurs, le rapport des stocks entre 0-30 et 30-100 cm s'accroît avec l'intensité de l'usage : on a ainsi un déséquilibre accru dont les valeurs sont plus élevées en surface qu'en profondeur.

Les IH présentent une légère croissance d'ouest en est : ils sont directement proportionnels à l'altitude et inversement proportionnels aux précipitations et aux températures. On constate donc que le niveau de dégradation de la MO diminue d'est en ouest, et qu'il se corrèle avec la température et la précipitation. Par ailleurs, les IH augmentent également en fonction de l'intensité de l'usage du sol et ce quelque soit la position sur le transect ouest-est. On en conclut que l'usage quel qu'il soit : pâturages ou culture (noyers, vignes, artichauts) ralentit la dégradation de la MO.

Les valeurs d'IH qui sont faibles en surface et qui diminuent avec la profondeur quelque soit la zone et l'intensité de l'usage révèlent une MO d'emblée très dégradée, avec un taux de dégradation qui s'accroît encore en profondeur.

La diminution globale des IO d'ouest vers l'est marque plutôt un accroissement de la qualité de la MO, i.e vraisemblablement d'une combinaison d'un accroissement de sa production et d'un ralentissement de sa dégradation dans les sols.

A proximité de la côte les valeurs d'IO sont proportionnelles à l'intensité de l'usage, le phénomène tend à s'inverser vers l'est. On constate que les phénomènes d'oxydation et donc de dégradation de la matière organique sont plus sensibles à l'usage lorsque la température moyenne augmente. Au contraire, vers la cordillère, le comportement s'inverse : la dégradation de la MO se ralentit en fonction de l'intensité de l'usage, c'est-à-dire ici plus précisément de la mise en culture.

Les R400 croissant généralement avec la profondeur. Cette croissance semble s'atténuer, voir disparaître vers l'est du transect (Pichasca et Las Ramadas). On en conclut que les proportions de MO labile entre la surface et la profondeur tendent à s'équilibrer au fur et à mesure que l'on monte en altitude avec l'augmentation des précipitations moyennes et la décroissance des températures.

L'ensemble de ces observations et notamment celles qui concernent la diminution des stocks de carbone et leur répartition au sein des profils de sols, dans des secteurs dont la mise en exploitation ne date que de quelques décennies, implique une très forte dynamique de la MO, ce qui semble de prime abord étonnant dans une région semi-aride et où les grands agents habituels du recyclage du carbone organiques tels que lombrics et/ou termites, semblent absents.