



Stock de carbone organique dans des sols de la région aride de Coquimbo (Chili) : Conséquences de l'intensité du pâturage sur des parcours par des chèvres

Gerardo Soto, Ary Bruand, Jean-Robert Disnar, Audrey Gallaud

► To cite this version:

Gerardo Soto, Ary Bruand, Jean-Robert Disnar, Audrey Gallaud. Stock de carbone organique dans des sols de la région aride de Coquimbo (Chili) : Conséquences de l'intensité du pâturage sur des parcours par des chèvres. Science et changements planétaires / Sécheresse, 2011, 22 (4), pp.233-243. 10.1684/sec.2011.0324 . insu-00665500

HAL Id: insu-00665500

<https://insu.hal.science/insu-00665500>

Submitted on 22 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

sec110220 R1

Titre français de l'article : Stock de carbone organique dans des sols de la région aride de Coquimbo (Chili) : Conséquences de l'intensité du pâturage sur des parcours par des chèvres

Titre anglais de l'article : Stock of organic carbon in soils of the arid Coquimbo region (Chile) : Consequences of goat grazing practices

Stock de carbone organique dans des sols de la région aride de Coquimbo (Chili) : Conséquences de l'intensité du pâturage sur des parcours par des chèvres

Résumé

Les stocks de carbone organique ont été étudiés sous deux intensités de pâturage sur parcours par des chèvres et comparés à une situation témoin au sein de la station expérimentale de Las Cardas (région de Coquimbo, Chili). Les résultats montrent que sous pâturage d'intensité modérée ($6 \text{ UPR ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), le stock de carbone organique de 0 à 100 cm de profondeur est peu affecté avec $24,3$ à $29,3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de carbone organique total contre $31,1$ à $42,6 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ sous végétation naturelle, ces stocks n'étant pas significativement différents ($P=0,95$) en raison de la variabilité des résultats entre les répétitions. En revanche, sous parcours d'intensité élevée ($10 \text{ UPR ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), le stock de carbone organique n'est plus que de $10,2$ à $15,5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Enfin, dans ces milieux où il est particulièrement difficile d'étudier les stocks de carbone en raison de la charge souvent élevée en éléments grossiers, nos résultats indiquent qu'il est possible de prédire le stock total du carbone organique des sols à partir de la seule mesure du stock de carbone dans les 30 premiers centimètres ($R^2 = 0,89$) avec un biais $<0,1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ et une précision de $3,6 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Mots clés : carbone organique, conduite de parcours, sols, zone aride, Chili

Abstract

Stock of organic carbon in soils of the arid Coquimbo region (Chile) : Consequences of goat grazing practices

The stocks of soil organic carbon were studied under moderate ($6 \text{ SRU} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$) and intensive goat grazing ($10 \text{ SRU} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$) and compared with the stock present under native vegetation in the experimental station of Las Cardas (Coquimbo region, Chile). Results showed that under moderate goat grazing ($6 \text{ SRU} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$), the organic carbon stock to 1 m depth would be not affected with 24.3 to $29.3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ compared to 31.1 to $42.6 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ under native vegetation, these stocks being not significantly different ($P=0.95$) because of the variability between replications. On the other hand, under intense goat grazing, the organic carbon stock was not more 10.2 to $15.5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Finally, our results showed that it is possible to predict the stock of soil organic carbon by using the stock of soil organic carbon within the 0-30 cm top layer alone ($R^2 = 0.89$) with a bias $<0.1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ and a precision of $3.6 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Key words: organic carbon stock, grazing practices, soil, arid land, Chile

Les sols représentent le plus grand réservoir de carbone organique terrestre de la biosphère [1]. Les ressources mondiales totales en carbone pour l'ensemble des terres ont été estimées entre 2157 et 2293 Pg pour le premier mètre de la surface [2]. Au sein de ce stock de carbone, on peut distinguer le Carbone Organique Total des sols (COT) qui représente 684 à 724 Pg de C dans les premiers 30 cm, 1462 à 1548 Pg de COT dans les premiers 100 cm, et 2376 à 2456 Pg de COT dans les premiers 200 cm [2]. En accord avec les estimations de l'IPCC [3], la ressource totale en C pour les terres devrait être de 1750 ± 250 Pg avec 835 Pg de C inorganique.

Les variations de stock de COT (S_{COT}) ont été étudiées sous différentes zones climatiques [4,5]. Cependant, dans les régions arides et semi-arides les études du S_{COT} en fonction de l'usage des sols sont peu nombreuses. Hernanz *et al.* [6] ont étudié l'effet à long terme de systèmes de culture sur les variations de S_{COT} en contexte climatique semi-aride méditerranéen de l'Espagne centrale. Ils ont enregistré un stock moyen de COT de $40 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour les 40 premiers centimètres. Reeder *et al.* et Mills *et al.* [7,8] ont analysé l'influence du bétail en pâturages sur le carbone organique du sol des steppes de Colorado aux États-Unis, et les fourrés semi-arides du Cap Est en Afrique du Sud. Ils ont estimé de valeurs autour de $64 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de 0 à 90 cm de profondeur pour le Colorado, et $133 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ pour le Cap Est. Shrestha et Stahl [9] ont analysé les variations de S_{COT} dans les steppes du Wyoming et ont enregistré des valeurs comprises entre $5,8$ à $15,7 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de COT en fonction du système de culture pour les 15 premiers centimètres de sol. Feng *et al.* [10] ont estimé le S_{COT} de zones arides le long d'un gradient croissant de désertification. Pour le Bassin du Junggar localisé en Chine, les valeurs varient entre $1,7$ et $14,8 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, et dans le Bassin du Tarim, entre $0,6$ et $20,1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Singh *et al.* [11] ont estimé le COT de la région aride à semi-aride du Rajasthan à $2,3 \text{ Pg}$ pour les premiers 100 cm de sol. Brahim *et al.*, [12] et [13] ont analysé la distribution spatiale et le stock de COT pour les sols tunisiens. Ils ont enregistré des valeurs moyennes de $405,44 \text{ Tg}$ de COT de 0 à 30 cm, et de $1006,71 \text{ Tg}$ de COT de 0 à 100 cm de profondeur. Les estimations par type de sol montrent que pour les Luvisols tunisiens les valeurs varient entre $71,6 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (0-30 cm) et $159,2 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (0-100 cm). De plus, pour les Lithosols les valeurs vont de $18,4 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (0-30 cm) et $40,4 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (0-100 cm). Au Chili, Pérez-Quezada *et al.* [14] ont analysé les variations du stock de carbone dans les sols d'un écosystème aride de la région de Coquimbo en fonction du type de végétation. Ils ont enregistré des stocks de carbone organique variant de $21,1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ sous plantation d'*Acacia saligna* à $36,5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ sous végétation naturelle.

Cependant, on note encore un déficit de données pour les milieux arides à propos des conséquences du type d'usage des sols sur leur stock organique, en particulier pour les zones arides d'Amérique du Sud alors qu'elles représentent $445\,000 \text{ km}^2$ [15]. Les objectifs principaux de cet article sont de discuter le stock organique de sols d'une zone aride du nord du Chili en analysant l'effet de pratiques de pâturage et d'évaluer les possibilités de prédire ces stocks en se limitant à la partie superficielle.

La zone d'étude

La zone d'étude fait partie de la station expérimentale de Las Cardas qui appartient à l'Université du Chili [16]. Sa surface totale est de 4 873 ha et elle est localisée dans la Région de Coquimbo (29°00' S ; 32°10' S) qui est une zone aride du Nord du Chili de 40 462 km² [17]. Cette région est l'une des 25 zones avec la plus grande biodiversité mondiale. La végétation est composée de 1478 espèces naturelles et de 244 espèces introduites. Les espèces dominantes sont des herbacées pérennes (45%), des arbustes (27%) et enfin des herbacées annuelles et biennuelles (23%) [18].

Le site d'étude de Las Cardas est situé à 23 km à l'est de la côte et à 45 km au nord de la ville d'Ovalle dans la Province d'Elqui, région de Coquimbo (71°15' S ; 30°13' W, 220 m d'altitude) [14]. Géomorphologiquement, le site de Las Cardas se retrouve dans la frange littorale, cependant, il correspond à une terrasse en fond de vallée. Le relief est relativement plat avec des pentes maximales autour de 2 %. La pluviométrie et la température moyenne annuelle sont respectivement de 100 mm et 16,5°C [19]. La végétation est dominée par des arbustes sclérophylles et des espèces caduques estivales, associées à des herbacées de prairie (pâturage natif) et à des cactacées dans les zones d'exposition nord. Les espèces dominantes d'arbustes xérophytes sont représentées par *Alcaparra* (*Senna cumingii* (Hook. et Arn.) H.S Irwin et Barneby), *Cuerno de Cabra* (*Haplopappus foliosus* (D.C)), *Quisco* (*Echinopsis chilensis* (Colla) Friederich et G.D. Rowley), *Pichanilla* (*Gutierrezia resinosa* (Hook. Et Arn). S.F.Blake), *Incienso* (*Flourensia thurifera* (Molina) DC.), *Chilco* (*Baccharis linearis* (Ruiz et Pav.) Pers.), et *Cardón* (*Puya chilensis* Molina) [20]. Les sols de la station expérimentale sont à rattacher à des Typic Haplodurids de la Soil Taxonomy [21,22] (Figure 1).

Méthodes d'étude des sols

Sur le site expérimental, trois types de traitement ont été sélectionnés pour l'étude : Végétation Naturelle (VN ; parcelle mise en défend depuis 1973 et considérée ici comme témoin), Pâturage d'intensité Modérée sur parcours par des chèvres (PM ; 6 Unités Petits Ruminants (UPR) ha⁻¹an⁻¹), Pâturage Intensif sur parcours par des chèvres (PI ; 10 UPR ha⁻¹ an⁻¹). Trois sols ont été étudiés dans la zone sous Végétation Naturelle, quatre sous Pâturage Modéré et trois sous Pâturage Intensif. Les sols sont développés dans des matériaux très grossiers correspondant soit à des dépôts de piémont, soit des alluvions qui sont surmontées matériaux sableux contenant très peu d'éléments grossiers correspondant vraisemblablement à des dépôts de fin de crue.

Pour chaque sol, nous avons décrit le profil, identifié les différents horizons, et quantifié la proportion d'éléments grossiers au moyen de la planche présente dans la charte des couleurs

Munsell [23]. Ensuite, pour chaque horizon, nous avons mesuré la densité apparente (D_a) du matériel <2 mm présent entre les éléments grossiers à l'aide de mottes de 5 à 10 cm³ de volume chacune à l'aide de la méthode utilisant du kérosène [24]. Les valeurs moyennes de D_a ont été calculées à partir de 5 à 7 mottes pour chaque horizon. Nous avons également prélevé du matériel <2 mm dans chaque horizon pour des déterminations physico-chimiques. La distribution granulométrique a été déterminée grâce à la méthode de la pipette de Robinson après un prétraitement des échantillons avec du peroxyde et de l'hexametaphosphate de sodium [25]. La capacité d'échange cationique (CEC, en cmol₊·kg⁻¹ de sol < 2mm séché à 105°C) a été déterminée en utilisant la méthode du trichloride hexamine-cobalt [26].

Afin d'étudier la distribution verticale de la teneur en carbone organique dans les sols sélectionnés, nous avons échantillonné chaque profil tous les 5 cm pour les premiers 10 cm (0 à 5 cm et 5 à 10 cm), et ensuite tous les 10 cm jusqu'à 1 m de profondeur. La méthode d'analyse utilisée pour doser le carbone organique a été la méthode Rock-Eval [27] qui permet de ne doser que le carbone appartenant à la matière organique, même en présence de carbonates.

Résultats et discussion

Composition minérale des sols

Avant de nous intéresser à la distribution du carbone organique, il est utile de préciser la composition minérale des sols étudiés. La proportion en éléments grossiers dans ces sols varie de 0,03 à 0,80 m³·m⁻³ selon les horizons (Tableau 1). Elle est par conséquent extrêmement variable, très généralement faible dans les premiers décimètres et particulièrement élevée en profondeur, en lien avec la nature des matériaux dans lesquels les sols étudiés se sont différenciés. La teneur en sable varie de 415 à 874 g·kg⁻¹, mais seulement de 587 à 743 g·kg⁻¹ pour l'horizon de surface. La teneur en argile, quant à elle, varie de 41 à 335 g·kg⁻¹ mais seulement de 61 à 94 g·kg⁻¹ pour l'horizon de surface (Tableau 1). De telles compositions correspondent à des sols très caillouteux dont le matériel fin présente des textures de type limon sableux [28].

La CEC varie de 6,7 à 28,6 cmol₊·kg⁻¹ et elle est étroitement liée à la teneur en argile granulométrique ($r^2 = 0.87$) (Figure 2). En raison des faibles teneurs en carbone organique des sols, nous avons fait l'hypothèse que la contribution de la matière organique à la CEC pouvait être considérée comme étant négligeable comparée à celle des minéraux argileux présents dans la fraction granulométrique argile. Nous avons ainsi calculé la capacité d'échange cationique du matériel argileux (CEC_{arg} , en cmol₊·par kg⁻¹ d'argile granulométrique) de la manière suivante :

$$CEC_{arg} = (CEC / \text{teneur en argile}) \times 1000$$

Les résultats montrent que la CEC_{arg} varie de 70,2 à 141,0 $\text{cmol}_+ \cdot \text{kg}^{-1}$. De telles valeurs de CEC_{arg} indiquent la présence en proportion élevée de minéraux argileux développant des capacité d'échange cationique élevées comme c'est le cas pour des smectites. Un tel résultat est en accord avec ceux obtenus antérieurement sur des sols similaires [29]. Nos valeurs de CEC_{arg} sont comparables aussi à celles calculées à partir des résultats enregistrés pour d'autres sols de la station expérimentale de Las Cardas et qui conduisent à des CEC_{arg} comprises entre 92,9 et 101,3 $\text{cmol}_+ \cdot \text{kg}^{-1}$ [22].

Teneur en carbone organique des sols

La teneur en carbone organique de la fraction <2 mm varie dans les premiers 5 cm de 6,13 à 11,79 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ sous Végétation Naturelle, de 7,45 à 13,39 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ sous Pâturage Modéré, et de 4,67 à 9,72 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ sous Pâturage Intensif (Figure 3). La Figure 4 représente, pour chaque traitement, la valeur moyenne d'un même horizon pour les différents profils. Ces teneurs moyennes en carbone organique décroissent de plus en plus rapidement en profondeur dans le sens Végétation Naturelle, Pâturage Modéré, et enfin Pâturage intensif. (Figure 4). Le pâturage a par conséquent pour effet de diminuer non seulement la teneur en carbone organique dans les premiers 5 cm mais aussi de le concentrer dans les premiers centimètres. La zone la plus intensivement pâturée (i.e. Pâturage Intensif) accusant la diminution de restitutions végétales au sol la plus marquée, c'est elle qui possède les teneurs en carbone organique les plus faibles dans les premiers 5 cm. La très faible teneur en carbone organique en profondeur dans cette même zone serait liée au plus faible développement des appareils racinaires et de la production d'exsudats à la suite du pâturage intensif. Les apports organiques d'origine animale (déjections), associés à la densité d'animaux par hectare (6 et 10 $\text{UPR} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$) sont marginaux et n'ont eu aucune influence sur les teneurs de carbone organique des sols.

Stock de carbone organique total dans les sols

Le stock de carbone organique total (S_{COT}) en $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de chaque sol étudié a été calculé de la façon suivante :

$$S_{COT} = 10^{-1} \times \left[\sum_n (T_i \times CO_i \times D_{ai}) \right]$$

avec T_i l'épaisseur de l'horizon i en cm, CO_i la teneur en carbone organique de l'horizon i en $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, et D_{ai} la densité apparente de l'horizon i en $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Le S_{COT} varie de 31,1 à 58,5 $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ sous Végétation Naturelle, de 24,3 à 29,3 $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ sous Pâturage Modéré, et de 10,2 à 15,5 $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$

sous un Pâturage Intensif (Tableau 2). Les S_{COT} mesurés sous Végétation Naturelle sont similaires à ceux enregistrés par Hernanz *et al.*, [6] dans une zone semi-aride de l'Espagne Centrale, et supérieures aux stocks enregistrés pour des écosystèmes semi-arides de Etats-Unis par Shrestha et Stahl [9]. Les trois secteurs d'étude se distinguent immédiatement par leurs stocks moyens respectifs en carbone organique (Figure 5) avec 37,1, 27,2 et 13,5 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour respectivement Végétation Naturelle, Pâturage Modéré et Pâturage Intensif. Néanmoins, après avoir appliqué le test de Fisher pour comparer les S_{COT} moyens pour chaque intensité d'usage, les résultats montrent que les S_{COT} moyens ne sont pas significativement différents entre le secteur Végétation Naturelle et le secteur Pâturage Modéré ($P = 0,95$) en raison de la variabilité des résultats au sein de chaque usage. Les S_{COT} sont en revanche significativement plus faibles ($P=0,95$) sous Pâturage Intensif comparé à Végétation Naturelle et Pâturage Modéré. Ces résultats indiquent que la capacité de l'écosystème étudié à supporter le pâturage sans que les stocks de carbone organique ne soient affectés serait supérieure à celle proposée par González *et al.* [19] qui considèrent que la capacité de charge moyenne de l'écosystème n'est que de 0,25 UPR $\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{année}^{-1}$.

Par ailleurs, on note aussi que les trois secteurs se distinguent assez mal par les teneurs maximales de carbone organique enregistrées au sommet des profils alors que la diminution de teneur en carbone organique dans les niveaux immédiatement sous-jacents, passés les 20 ou 30 premiers centimètres de profondeur, apparaît d'autant plus marquée que l'intensité de pâturage est élevée. Ceci nous a conduit, à l'instar de Franzluebbbers [30], 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 2). L'absence de différence significative de S_{COT} entre les secteurs Végétation Naturelle et Pâturage Modéré se caractérise aussi par une répartition similaire entre ces deux secteurs du stock de carbone organique entre les profondeurs 0-30 cm et 30-100 cm un peu plus de 60% de ce stock dans les 30 cm supérieurs du sol. En revanche, près de 70 % de S_{COT} est présent dans les 30 cm supérieurs du sol dans le secteur Pâturage Intensif. Cette répartition indiquerait une plus faible colonisation du sol par les racines des végétaux sous PI en raison de l'intensité du pâturage.

Prédiction des stocks de carbone organique total

Dans des milieux aussi difficiles à prospector en raison de leur grande hétérogénéité et de leur teneur en éléments grossiers souvent élevée, il est opportun de s'interroger sur la possibilité de prédire les stocks de carbone organique des sols à partir de mesures effectuées sur la seule partie superficielle des sols. Nous avons testé un modèle de régression simple utilisant comme variable explicative soit le stock calculé pour les premiers 20 cm, soit celui calculé pour les premiers 30 cm,

et comme variable expliquée le stock en carbone en carbone organique de la surface à 100 cm de profondeur. Les régressions ont été établies toutes conditions d'usage des sols confondues.

Ne disposant pas d'un ensemble de sols pour tester la qualité de la prédiction dans l'un et l'autre cas, celle-ci a été étudiée en prédisant le S_{COT} de l'un des 13 profils de sols étudiés après avoir établi une relation linéaire avec les 12 profils restants. Ceci a été réalisé 13 fois en prédisant le S_{COT} pour un seul profil de sol à chaque fois.

Afin de discuter la validité de la prédiction, l'erreur quadratique moyenne (EQM) de la façon suivante [31,32] :

$$EQM = \left[\frac{1}{13} \sum_{i=1}^{i=13} (S_{COT\ p,i} - S_{COT\ m,i})^2 \right]^{1/2}$$

où $S_{COT\ p,i}$ est le S_{CO} prédit pour le sol i , $S_{COT\ m,i}$ est le S_{COT} mesuré pour le sol i . L'EQM varie à la fois avec le biais et la précision de l'estimation [33-35]. Pour déterminer indépendamment ces derniers nous avons calculé l'erreur moyenne de l'estimation (EME) et sa déviation standard (DSE) :

$$EME = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{i=13} (S_{COT\ p,i} - S_{COT\ m,i})$$

$$DSE = \left\{ \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{i=13} [(S_{COT\ p,i} - S_{COT\ m,i}) - EMP]^2 \right\}^{1/2}$$

L'EME mesure le biais et indique que les stocks sont surestimés lorsqu'il est positif ou sous-estimés lorsqu'il est négatif.

Nos résultats montrent que le stock de carbone organique dans les 30 cm supérieurs du sol est beaucoup plus étroitement lié au stock de carbonique de la surface à 100 cm de profondeur ($R^2 = 0,868$) que ne l'est le stock présent dans les 20 cm supérieurs du sol ($R^2 = 0,741$). La conséquence en est une différence élevée de qualité de la prédiction en fonction de l'épaisseur prise en compte. Ainsi, l'EQM est de $6,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ lorsque l'on utilise le stock présent dans les 20 cm supérieurs alors qu'il n'est que de $1,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ lorsque l'on utilise le stock présent dans les 30 cm supérieurs. Pour la même raison, le stock de carbone organique du sol est plus surestimé lorsque l'on utilise le stock présent dans les 20 cm supérieurs ($EME = 0,25,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) qu'il ne l'est lorsque l'on utilise le stock présent dans les 30 cm supérieurs ($EME < 0,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Il en va de même pour la précision de la prédiction avec $DSE = 5,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ lorsque l'on utilise le stock présent dans les 20 cm supérieurs et $DES = 4,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ lorsque l'on utilise le stock présent dans les 30 cm supérieurs.

Conclusion

Nos résultats montrent que sous pâturage d'intensité modérée ($6 \text{ UPR ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), le stock de carbone organique est peu affecté avec $24,3$ à $29,3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de carbone organique total contre $31,1$ à $42,6 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ sous végétation naturelle, ces stocks n'étant pas néanmoins significativement différents ($P=0,95$) sur la base de l'échantillonnage réalisé. Il est possible qu'un plus grand nombre de situations échantillonnées aurait permis de mettre en évidence que le stock était effectivement significativement plus faible sous pâturage modéré que sous végétation naturelle. En revanche, sous parcours d'intensité élevée ($10 \text{ UPR ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), le stock de carbone organique est significativement plus faible que sous végétation naturelle et n'est plus que de $10,2$ à $15,5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Enfin, dans les milieux arides où il est fréquemment particulièrement difficile d'étudier les stocks de carbone en raison de la charge élevée en éléments grossiers, nos résultats indiquent qu'il est possible de prédire le stock total du carbone organique des sols à partir de la seule mesure du stock de carbone dans les 30 premiers centimètres ($R^2 = 0,89$) avec un biais $<0,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ et une précision de $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$.

BIBLIOGRAPHIE

1. Jobbágy E, Jackson R. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 2000 ; 10 : 423-436.
2. Batjes NH. Total carbon and nitrogen in the soil of world. *European Journal of Soil Science* 1996 ; 47 : 151-163.
3. IPCC. Summary for policy makers. In : Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Nougier M, Van der Liden PJ, Xiaosu D, eds *The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 2001.
4. Bernoux M, Arrouays D, Cerri C, De Alencastro Graça PM, Volkoff B, Trichet J. Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie Brésilienne). *Étude et Gestion des Sols* 1998 ; 5 : 31-42.
5. Lemenih M, Itanna F. Soil carbon stocks and turnovers in various vegetation types and arable lands along an elevation gradient in southern Ethiopia. *Geoderma* 2004 ; 123 : 177-188.
6. Hernanz JL, López R, Navarrete L, Sánchez-Girón V. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *Soil & Tillage Research* 2002 ; 66 : 129-141.
7. Reeder JD, Schuman GE, Morgan JA, Lecain DR. Response of organic and inorganic carbon and nitrogen to long-term grazing of the shortgrass steppe. *Environmental Management* 2004 ; 33 : 485-495.
8. Mills AJ, Cowling RM, Fey MV, Kerley GIH, Donaldson JS, Lechmere-Oertel RG, Sigwela AM, Skowno AL, Rundel P. Effects of goat pastoralism on ecosystem carbon storage in semiarid thicket, Eastern Cape, South Africa. *Austral Ecology* 2005 ; 30 : 797-804.
9. Shrestha G, Stahl PD. Carbon accumulation and storage in semi-arid sagebrush steppe : Effects of long-term grazing exclusion. *Agriculture Ecosystems & Environment* 2008 ; 125 : 173-181.
10. Feng Q, Endo KN, Guodong C. Soil carbon in desertified land in relation to site characteristics. *Geoderma* 2002 ; 106 : 21-43.
11. Singh SK, Singh AK, Sharma BK, Tarafdar JC. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India. *Journal of Arid Environments* 2007 ; 68 : 408-421.
12. Brahim N, Bernoux M, Blavet D, Gallali T. Tunisian soil organic stocks. *Int. J. Soil Sci.* 2010 ; 5 : 34-40.
13. Brahim N, Gallali T, Bernoux M. Carbon stocks by soils and departments in Tunisia. *J. Applied Sci.* 2011 ; 11 : 46-55.

14. Pérez-Quezada JF, Delpiano CA, Snyder KA, Johnson DA, Franck N. Carbon pools in an arid shrubland in Chile under natural and afforested conditions. *Journal of Arid Environments* 2011 ; 75 : 29-37.
15. Reynolds. Desertification. Encyclopedia of Biodiversity. S. Levin. San Diego, CA, Academic Press : 61-78, 2001.
16. Casanova P., M., W. Luzio L., C. Benavides Z., A. Carrasco R., et J. Haberland A. Informe de práctica profesional estación experimental Las Cardas, IV región. Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile, 1995.
17. Sánchez A, Morales R. Las regiones de Chile. Espacio físico y humano-económico. 2ª ed. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, 1998.
18. Squeo FA, Arancio G, Marticorena C, Muñoz M, Gutiérrez JR. Diversidad vegetal de la IV región de Coquimbo, Chile. In : Squeo FA, Arancio G, Gutiérrez J.R, Ed. *Libro Rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación : región de Coquimbo*. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile, 2001.
19. González C, Santibáñez F, Soto G. *Compendio de información ambiental, socioeconómica y silvoagropecuaria de la IV región de Coquimbo*, La Serena, Chile, INDAP-PRODECOP and AGRIMED-Universidad de Chile, 2001.
20. Lailhacar S. Las grandes formaciones vegetales de las zonas desérticas y mediterráneas perárida y árida de Chile : con énfasis en sus aptitudes forrajeras. *Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 1985 ; 5 : 145-231.
21. Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd ed.* Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook 436, 1999.
22. Aburto F, Hernández C, Pfeiffer M, Casanova M, Luzio W. Northern field-guide between 30° S and 33° 30' S. In : Casanova M, Luzio W, eds *The international conference and field workshop on soil classification. Soil : A work of art of Nature*. Universidad de Chile, Santiago, Ovalle and Tongoy, Chile. 2008.
23. Color, Munsell M. soil color charts, 2000.
24. Assouline S, Tessier D, Bruand A. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research* 2000 ; 36 : 3769-3769.
25. Baize, D. Guide des analyses en pédologie. INRA, Paris, 258, 2000.
26. Ciesielski H, Sterckeman T. Determination of cation exchange capacity and exchangeable cations in soils by means of cobalt hexamine trichloride. Effects of experimental conditions. *Agronomie* 1997 ; 17 : 1-7.

27. Disnar JR, Guillet B, Keravis D, Di-Giovanni C, Sebag D. Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis : scope and limitations. *Organic Geochemistry* 2003 ; 34 : 327-343.
28. Soil Survey Staff. *Soil survey manual*. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Handbook 18, Washington D.C., USA, 1993.
29. Flores R. Pedogénesis de cuatro Aridisols en el secano costero de la IV Región de Chile. Tesis de Licenciado en Ciencias Agrícolas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Santiago, Chile, 1983.
30. Franzluebbers AJ. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 2002 ; 66(2) : 95-106.
31. Grais B. *Méthodes statistiques. Techniques statistiques -2*. Paris, France : DUNOD, 2003.
32. García R. *Inferencia estadística y diseño de experimentos*. Buenos Aires, Argentina : Universitaria de Buenos Aires, 2004.
- 33 Wösten JHM, Pachepsky YA, Rawls WJ. Pedotransfer functions : bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 2001 ; 251 : 123-150.
34. Bruand A, Pérez Fernández P, Duval O. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management* 2003 ; 19 : 232-242.
35. Schaap MG. Accuracy and uncertainty in PTF predictions. In : Pachepsky WJRY, eds *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*, Volume 30. Elsevier, 2004.

Figure 1. Localisation du site d'étude de Las Cardas et distribution des sols de la région de Coquimbo (modifié d'après Alcayaga and Luzio, 1986).

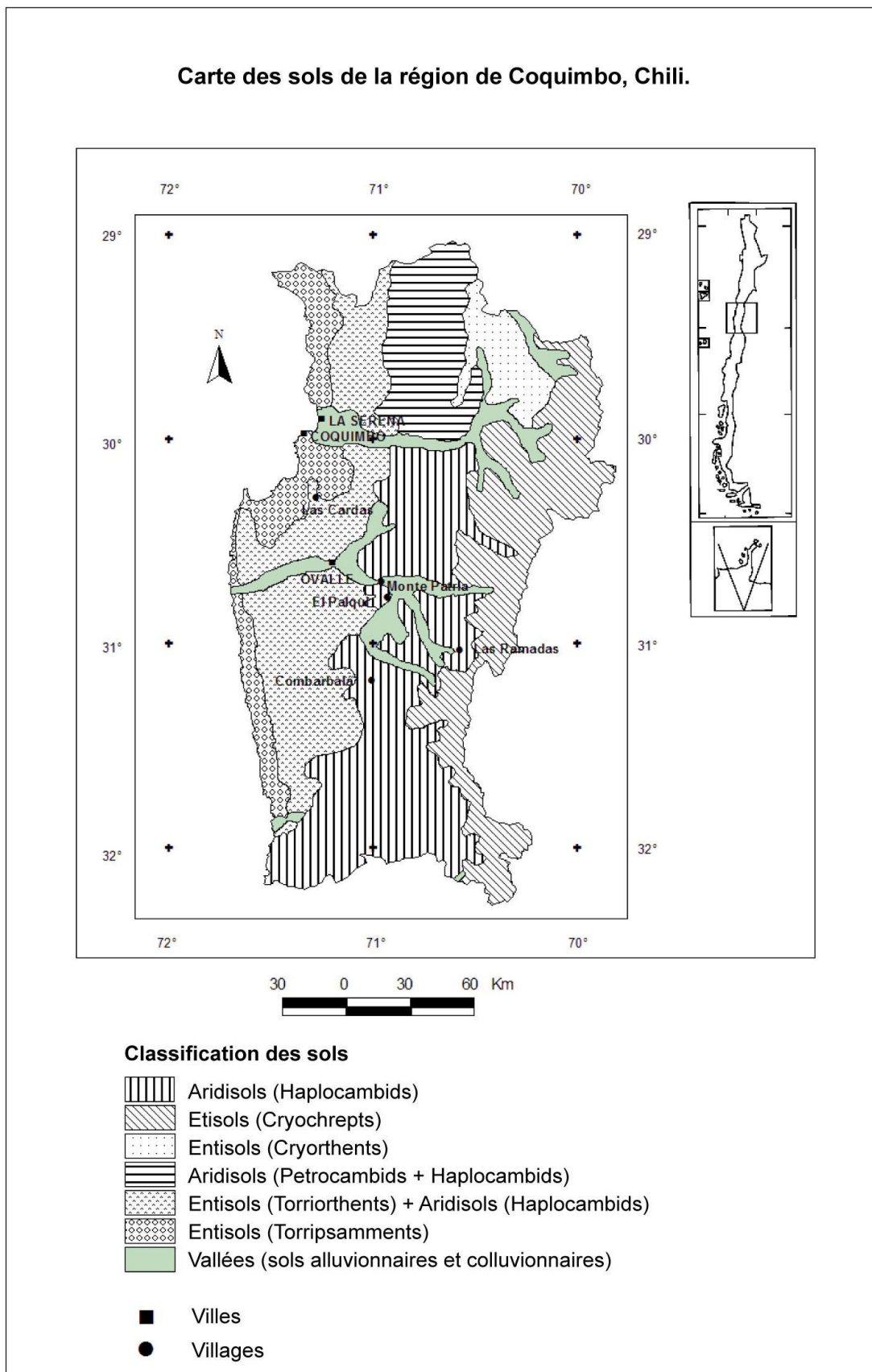
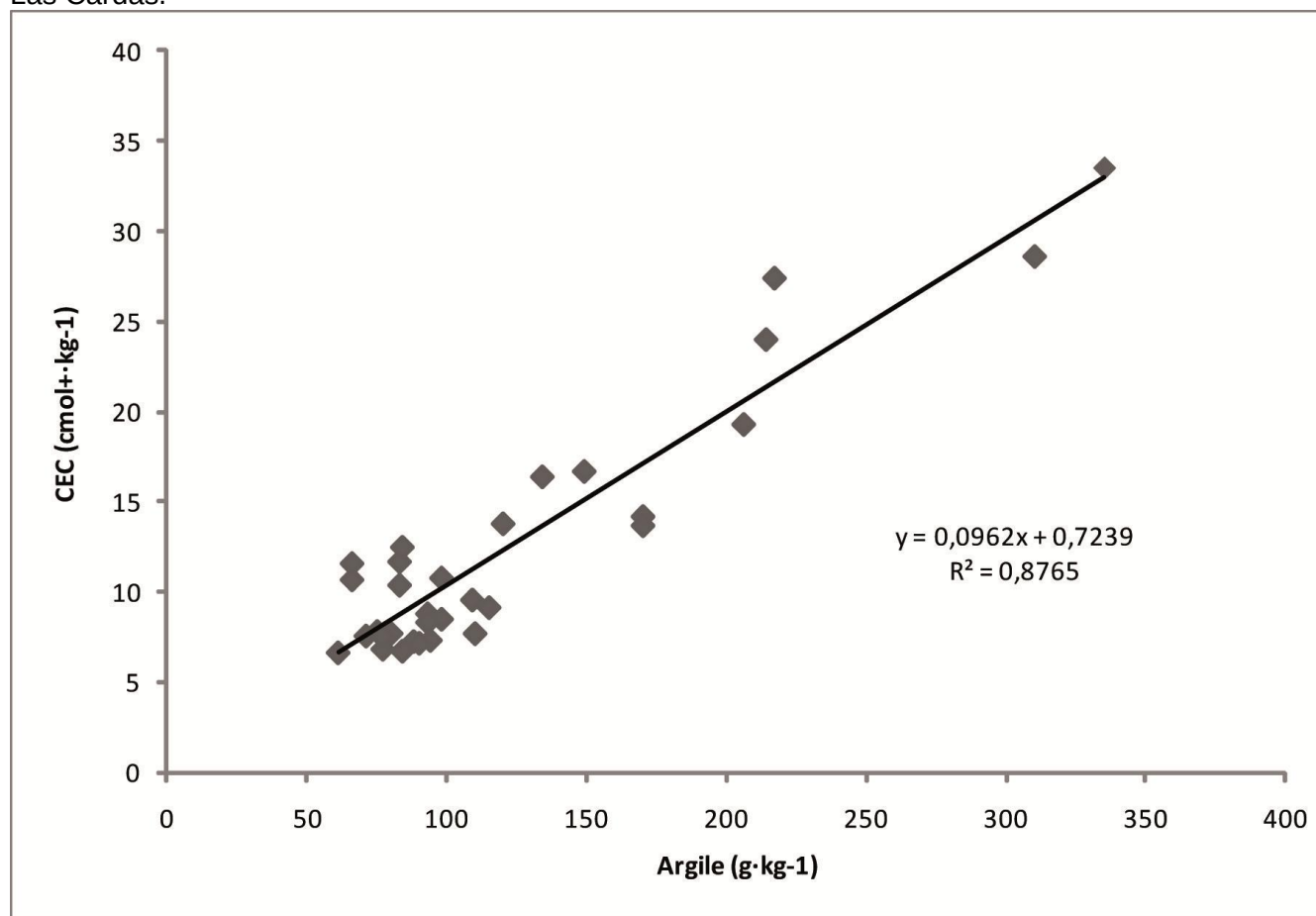


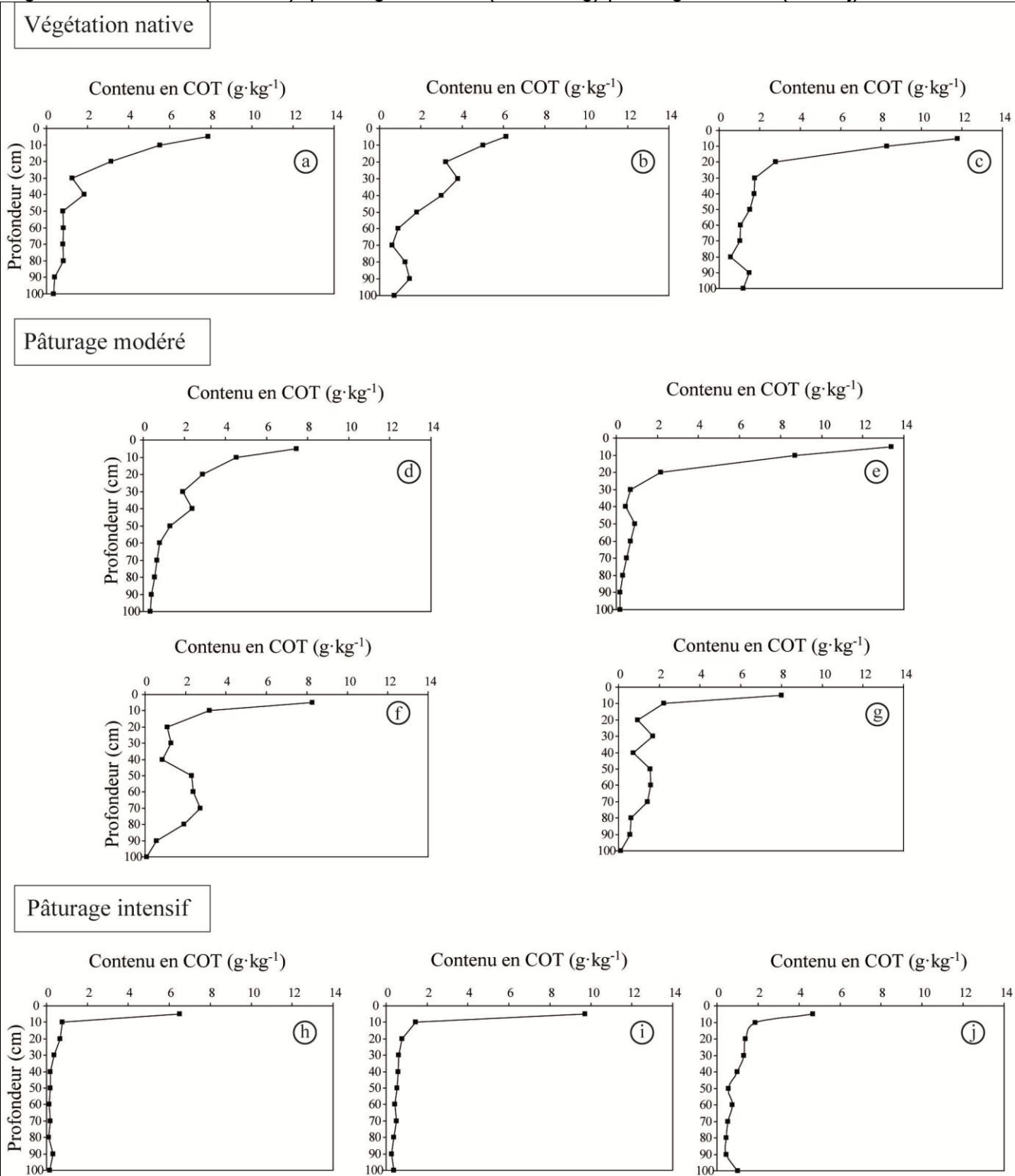
Tableau 1. Caractéristiques des profils de sols étudiés.

Profil	Profondeur	Couleur		Densité apparente	Proportion d'éléments grossiers	Granulométrie (mm)			Capacité d'échange cationique	Capacité d'échange cationique (argile)
	(cm)	Sèche	Humide	(g·cm ⁻³)		<0,002	0,002- 0,05	0,05-2	(cmol ₊ ·kg ⁻¹)	(cmol ₊ ·kg ⁻¹)
							<i>g·kg⁻¹</i>			
Végétation naturelle										
9	0 - 5	10YR 4/4	7.5YR 3/3	1,69	0,10	77	229	694	6,9	89,1
	5 - 30	7.5YR 4/4	7.5YR 3/4	1,98	0,05	93	212	695	8,3	89,7
	30 - 55	7.5YR 4/3	7.5YR 3/3	2,01	0,03	134	163	703	16,4	122,4
	55 - 90	7.5YR 4/3	7.5YR 3/4	2,09	0,02	217	195	588	27,4	126,3
	90 - 100	7.5YR 5/4	7.5YR 3/4	-	0,02	29	97	874	27,8	958,6
12	0 - 5	7.5YR 5/4	7.5YR 3/4	1,85	0,05	90	256	654	7,2	79,9
	5 - 20	7.5YR 4/4	7.5YR 3/3	1,56	0,05	115	236	649	9,2	79,7
	20 - 57	7.5YR 4/6	7.5YR 3/4	2,05	0,25	170	219	611	13,7	80,6
	57 - 100	7.5YR 5/4	7.5YR 3/4	2,04	0,10	214	232	554	24,0	112,2
13	0 - 6	7.5YR 4/3	7.5YR 3/3	1,58	0,05	77	236	687	7,6	98,4
	6 - 35	7.5YR 4/4	7.5YR 2.5	1,76	0,05	98	210	692	10,8	110,2
	35 - 85	7.5YR 4/3	7.5YR 3/3	-	0,30	149	156	695	16,7	112,1
	85 - 100	7.5YR 4/4	7.5YR 4/6	-	0,05	310	198	492	28,6	92,3
Pâturage d'intensité modérée (6 UPR·ha ⁻¹ ·année ⁻¹)										
1	0 - 5	10YR 4/4	7.5YR 3/2	1,47	0,03	94	252	654	7,4	78,2
	5 - 12	10YR 4/4	10YR 3/3	1,73	0,03	88	227	685	7,3	82,7
	12 - 40	10YR 3/4	7.5YR 3/3	1,73	0,03	93	229	678	8,8	94,8
	40 - 100	10YR 3/6	7.5YR 3/3	1,99	0,03	170	239	591	14,2	83,5
2	0 - 5	10YR 4/4	7.5YR 3/2	1,55	0,03	98	262	640	8,5	86,9
	5 - 39	10YR 4/6	7.5YR 3/2	1,83	0,03	110	264	626	7,7	70,2
	39 - 100	10YR 3/6	7.5YR 3/2	2,05	0,03	206	226	568	19,3	93,7
4	0 - 7	10YR 4/4	7.5YR 3/2	1,52	0,08	80	276	644	7,7	96,6
	7 - 24	7.5YR 4/3	7.5YR 3/2	1,77	0,03	75	233	692	7,8	104,5
	24 - 45	10YR 4/6	7.5YR 3/2	1,77	0,15	83	217	700	10,4	125,3
	45 - 77	10YR 3/4	7.5YR 3/2	1,87	0,50	83	185	732	11,7	141,0
	77 - 100	10YR 5/4	7.5YR 3/3	2,05	0,00	77	221	702	21,8	283,1
6	0 - 5	7.5YR 4/6	7.5YR 2.5	1,64	0,05	-	-	-	-	-
	5 - 35	7.5YR 4/6	7.5YR 3/3	2,05	0,03	-	-	-	-	-
	35 - 60	7.5YR 3/3	7.5YR 2.5	-	0,25	-	-	-	-	-
	60 - 100	7.5YR 4/4	7.5YR 4/3	-	0,03	-	-	-	-	-
Pâturage intensif (12 UPR·ha ⁻¹ ·année ⁻¹)										
5	0 - 10	10YR 4/4	7.5YR 2.5/2	1,78	0,07	61	196	743	6,66	109,2
	10 - 40	7.5YR 4/6	7.5YR 2.5/3	2,02	0,03	71	187	742	7,59	106,9
	40 - 60	10YR 4/4	7.5YR 2.5/3	2,14	0,25	66	123	811	10,7	162,1
	60 - 85	10YR 3/4	7.5YR 2.5/2	-	0,10	66	130	804	11,6	175,8
	85 - 100	10YR 3/6	7.5YR 4/3	-	0,55	84	119	797	12,5	148,8
7	0 - 5	7.5YR 4/6	7.5YR 3/4	1,68	0,05	84	329	587	6,8	80,4
	5 - 35	7.5YR 4/4	7.5YR 4/3	1,88	0,70	109	244	647	9,6	87,9
	35 - 50	7.5YR 4/6	7.5YR 3/3	2,08	0,15	120	236	644	13,8	115,0
	50 - 80	7.5YR 4/3	7.5YR 3/4	2,19	0,02	335	250	415	33,5	100,0
	80 - 100	7.5YR 4/2	7.5YR 3/2	2,05	0,02	41	226	733	23,3	568,3
8	0 - 25	10YR 5/4	7.5YR 3/3	1,99	0,03	-	-	-	-	-
	25 - 95	7.5YR 4/3	7.5YR 3/3	1,62	0,40	-	-	-	-	-
	95 - 100	7.5YR 3/1	7.5YR 2.5/1	-	0,15	-	-	-	-	-

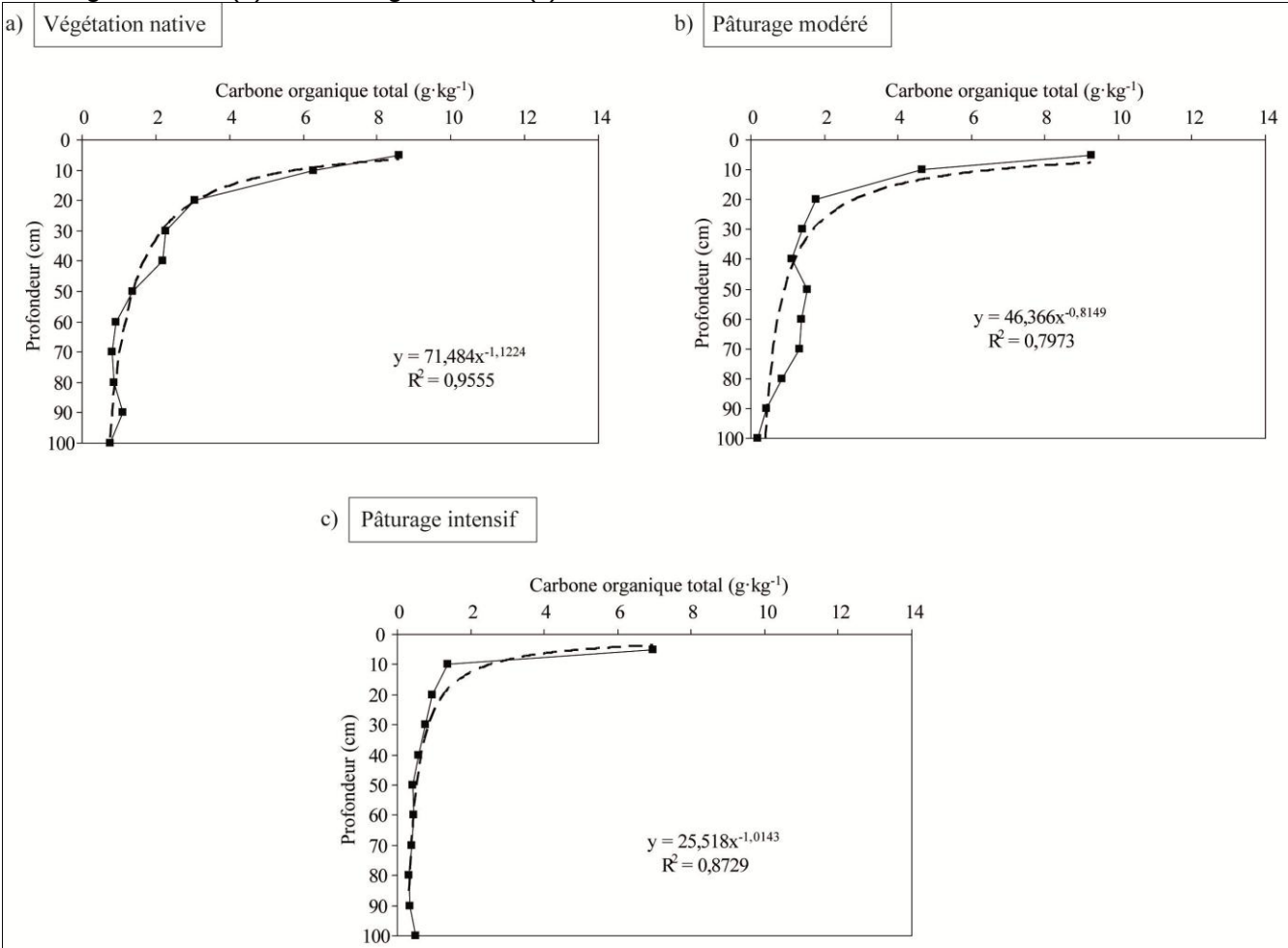
1 **Figure 2.** Relation entre le contenu en argile et la capacité d'échange cationique (CEC) des sols de
 2 Las Cardas.



4 **Figure 3.** Distribution des concentrations du carbone organique total dans les sols étudiés sous
5 végétation naturelle (a, b et c) ,pâturage modéré (d, e, f et g) pâturage intensif (h, i et j).



7 **Figure 4.** Teneurs moyennes en carbone organique total des sols sous Végétation Naturelle (a),
8 Pâturage Modéré (b) et Pâturage Intensif (c).

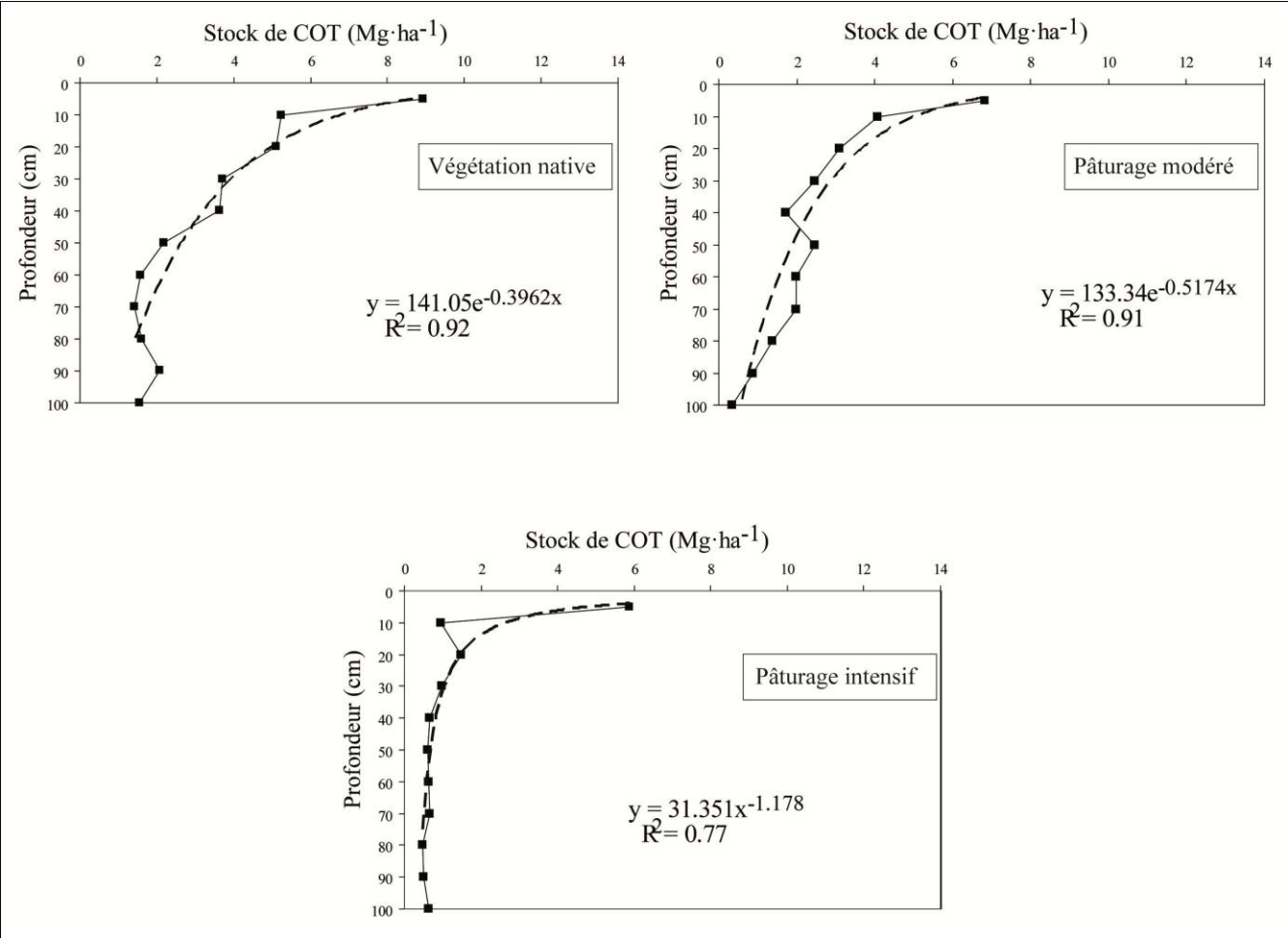


10 **Tableau 2.** Stocks de carbone organique dans les sols sous végétation naturelle, sous pâturage
 11 modéré et sous pâturage intensif de 0 à 100 cm, de 0 à 30 cm et de 30 à 100 cm de profondeur.

Stock de carbone organique total (Mg·ha ⁻¹)			
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm
Secteur sous végétation naturelle			
	31,1	19,4	11,7
	42,6	26,3	16,2
	37,7	23,3	14,4
Moyenne	37,1	23,0	14,1
Secteur sous pâturage d'intensité modérée			
	29,1	17,2	11,9
	29,3	22,9	6,4
	24,3	12,2	12,1
	26,2	13,6	12,6
Moyenne	27,2	16,5	10,7
Secteur sous pâturage intensif			
	10,2	8,1	2,1
	14,7	9,0	5,8
	15,5	10,9	4,6
Moyenne	13,5	9,3	4,2

12

13 **Figure 5.** Stock de carbone organique total (COT) sous végétation naturelle (a), pâturage modéré (b)
14 et pâturage intensif (c).



15