
MODELISATION DES STOCKS DE CARBONE

Dans le but de mieux caractériser le comportement de la matière organique et l'impact de l'usage, nous avons modélisé les stocks de carbone en profondeur de trois zones de la région de Coquimbo sur le transect ouest-est préalablement décrit. Nous avons également modélisé les stocks entre 0-30 cm et leur relation avec les stocks de 0 – 100 cm.

À ce sujet, le secteur de Las Cardas a fait l'objet d'une publication soumise et acceptée (actuellement en correction) qui est mise en annexe.

I. Méthode de calcul des stocks de carbone

Pour rappel, les équations du calcul des stocks :

Pour une couche de profil :

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

E_i = épaisseur de la couche

COT_i = carbone organique totale 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 mm)

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

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

Les résultats des calculs des stocks de carbone en fonction de l'usage sont discutés dans le Chapitre V. Une analyse complémentaire des moyennes au moyen du test de Fisher a été réalisé dans le but de déterminer des différences statistiquement significatives entre les moyennes des stocks de carbone par mode d'usage de 0 à 100 cm ($SCOT_S$), de 0 à 30 cm ($SCOT_{30}$) et de 70 à 100 cm de profondeur ($SCOT_{70}$).

II. Modélisation des rapports surface-profondeur stocks de carbone

Dans le but de tester le comportement des stocks dans les 30 premiers cm par rapport au stock à 100 cm avec un modèle de régression simple, nous avons établi la droite de régression entre ces deux stocks, toutes conditions d'usage confondues.

Afin de discuter la validité (e.g. Wösten *et al.*, 2001; Schaap, 2004) de ce comportement nous avons calculé l'erreur quadratique moyenne (*EQM*)

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

où $SCOT_{p,i}$ correspond au stock prédit du profil i , $SCOT_{m,i}$ est le stock mesuré du profil i . L'*EQM* varie à la fois avec le biais et la précision de l'estimation (Grais, 2003 ; García, 2004). Pour déterminer indépendamment ces derniers nous avons calculé l'erreur moyenne de l'estimation (*EME*) et sa déviation standard (*DSE*) (Bruand *et al.*, 2003) :

$$EME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (SCOT_{p,i} - SCOT_{m,i})$$

$$DSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} [(SCOT_{p,i} - SCOT_{m,i}) - EME]^2 \right\}^{1/2}$$

L'*EME* mesure le biais et indique les stocks surestimés (positive) ou sous-estimés (négative) alors que la *DSE* mesure la précision de l'estimation.

III. Stock de carbone de la zone de Las Cardas

III.1. Distribution du carbone organique total COT_S et des stocks de carbone organique total ($SCOT_S$) en profondeur

La distribution des COT_S en profondeur pour chaque profil et chaque mode d'usage peut être appréciée dans la figure 6.1. La distribution des $SCOT_S$ moyens pour chaque mode d'usage est représentée dans la figure 6.2. Les $SCOT_S$ varient entre 31,1 et 42,6 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 24,3 à 29,3 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour le secteur sous usage extensif et de 10,2 à 15,5 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la situation sous usage intensif (tableau 6.1). Les valeurs du secteur sans

usage sont proches des valeurs trouvées pour des écosystèmes semi-arides de la zone centrale de l'Espagne (Hernandez *et al.*, 2002) et supérieures aux valeurs trouvées pour des écosystèmes semi-arides de Etats-Unis par Shrestha et Stahl (2008).

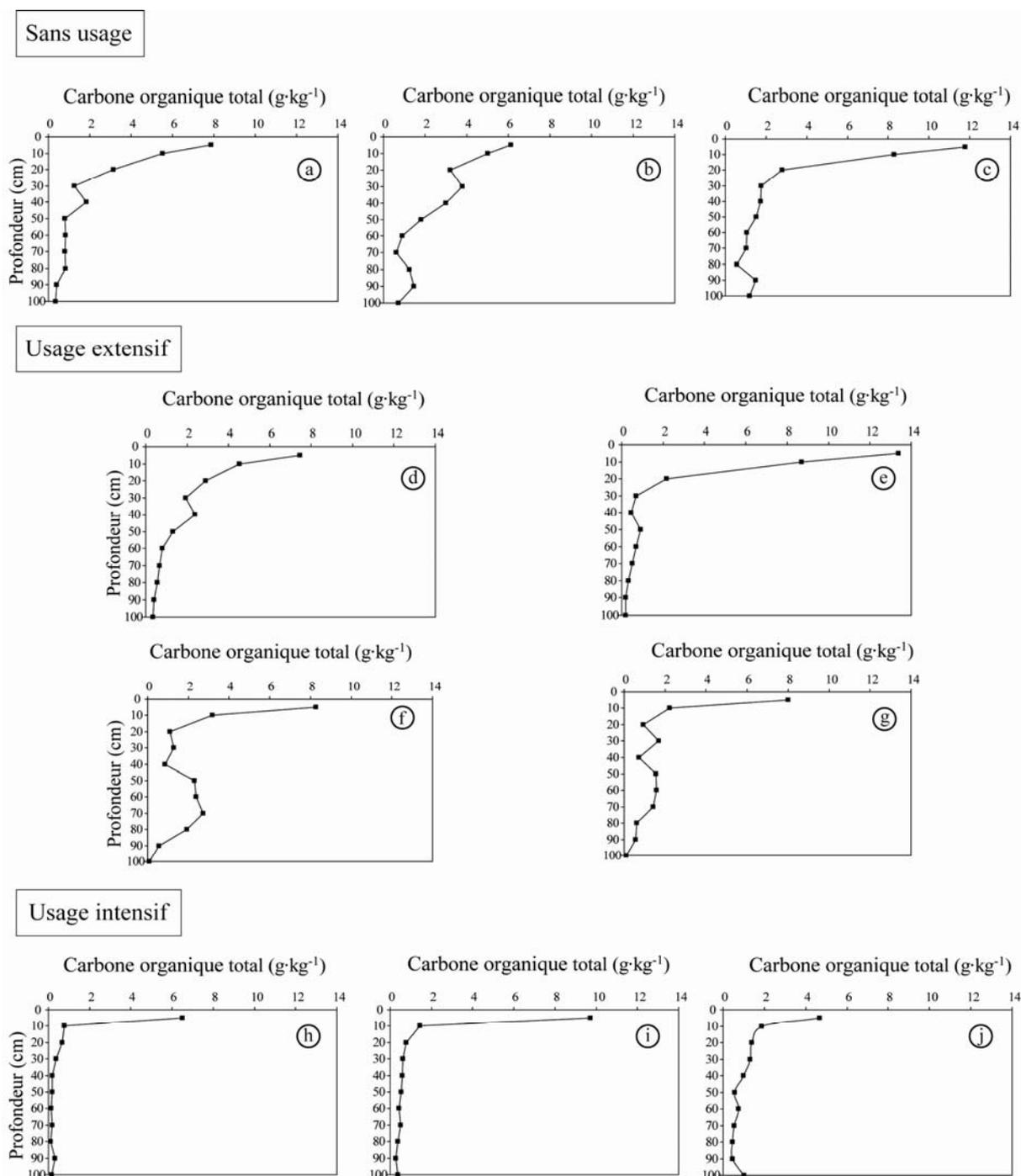


Figure 6.1. Distribution du carbone organique des profils (COTS) en profondeur pour chaque mode d'usage dans la zone de Las Cardas.

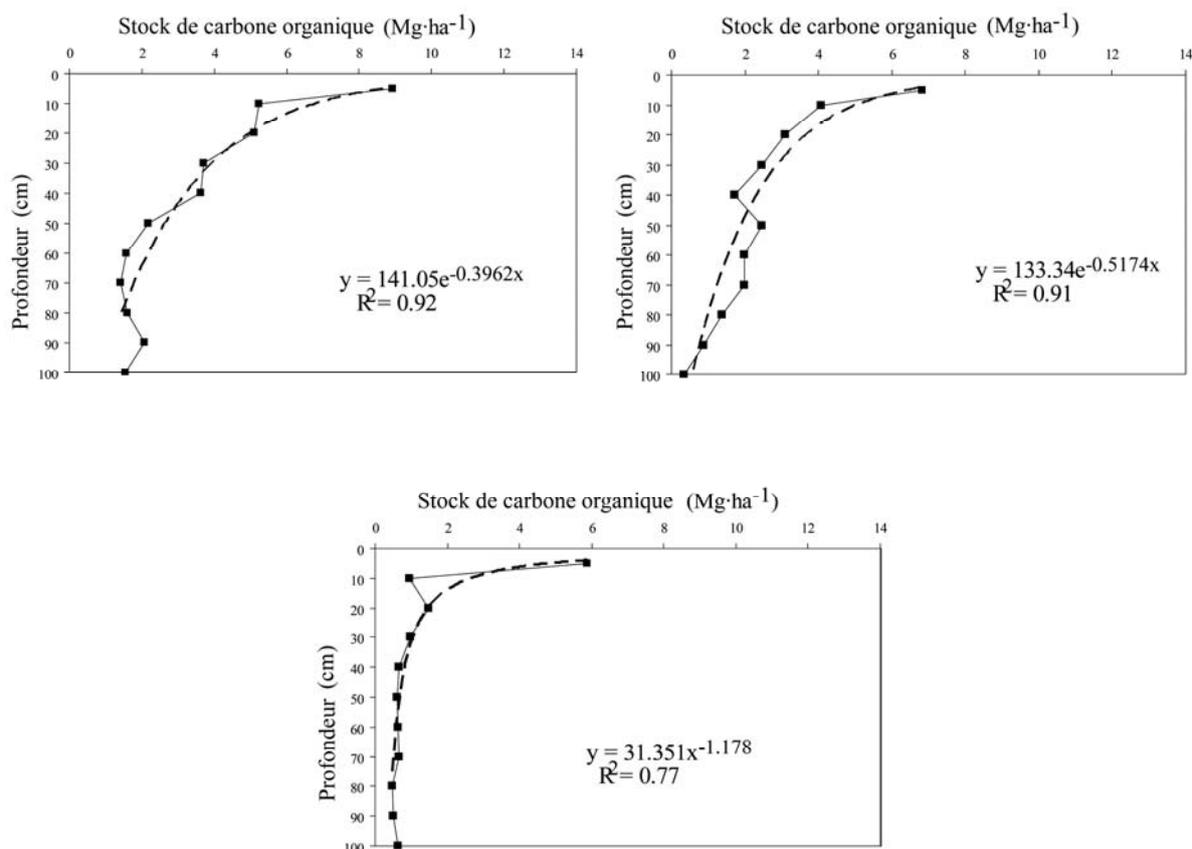


Figure 6.2. Distribution en profondeur des stocks de carbone organique totaux moyens par mode d'usage.

Tableau 6.1. Stock de carbone organique total (SCOT) 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 total (Mg·ha ⁻¹)		
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm
Secteur sans usage			
Profil 1	31.1	19.4	11.7
Profil 2	42.6	26.3	16.2
Profil 3	37.7	23.3	14.4
Moyenne	37.1	23.0 (62 %)	14.1 (38 %)
Secteur usage extensif			
Profil 4	29.1	17.2	11.9
Profil 5	29.3	22.9	6.4
Profil 6	24.3	12.2	12.1
Profil 7	26.2	13.6	12.6
Moyenne	27.2 (73 %)*	16.5 (61 %)	10.7 (39 %)
Secteur usage intensif			
Profil 8	10.2	8.1	2.1
Profil 9	14.7	9.0	5.8
Profil 10	15.5	10.9	4.6
Moyenne	13.5 (36 %)*	9.3 (69 %)	4.2 (31 %)

L'analyse des valeurs de $SCOT_s$ au moyen du test de Fisher montre qu'il existe une différence statistiquement significative entre les trois situations d'usage ($P = 0,95$).

Le stock de carbone organique total à 30 cm ($SCOT_{30}$) varie de 19,4 à 26,3 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 12,2 à 22,9 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage extensif et de 8,1 à 10,9 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage intensif (tableau 6.1). L'analyse des moyennes par le test de Fisher montre des différences statistiquement significatives entre les trois types d'usage ($P = 0,95$).

Le stock de carbone organique total entre 30 et 100 cm ($SCOT_{70}$) varie entre 11,7 et 16,2 $Mg \cdot ha^{-1}$ dans le secteur sans usage, de 6,4 à 12,6 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage extensif et entre 2,1 et 5,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sous usage intensif (tableau 6.1). L'analyse statistique des moyennes des $SCOT_{70}$ montre qu'il existe des différences statistiquement significatives entre la condition sans usage et l'usage extensif et intensif.

Si l'on regarde la distribution du carbone, on s'aperçoit que les proportions de ces stocks restent *a priori* identiques entre la partie superficielle du sol et la profondeur, et ce entre les secteurs sans usage et usage extensif, soit plus de 60% entre 0 et 30 cm dans les 2 cas. En revanche, la forte décroissance des stocks de carbone dans les sols des secteurs sous usage intensif s'accompagne d'une plus forte diminution relative dans la partie profonde du profil, qui tombe alors à 31%, celle de la partie superficielle s'élevant donc à près de 70%. Ces résultats peuvent s'interpréter de la manière suivante : dans le secteur extensif, l'usage a pour résultat immédiat une diminution des restitutions végétales au sol. Ceci entraîne très certainement une réduction de la production végétale brute, ce qui se ressent au niveau racinaire (racines elles-mêmes, plus exsudats). Un équilibre semble déplacé mais cependant préservé entre production et apports superficiels/profonds. En revanche dans le secteur intensif, cet équilibre n'est vraisemblablement plus préservé et la végétation n'arrive plus à se renouveler.

III.2. Prédiction des $SCOT_s$

L'étude des SCOT nécessite généralement de creuser une fosse pour échantillonner le sol. L'utilisation d'une tarière étant le plus souvent impossible en raison de pourcentages élevés en éléments grossiers. Cela nous pousse à essayer d'établir une relation entre le SCOT en surface et celui du profil total (0-100 cm). Pour déterminer la profondeur minimale

représentative du sol, nous avons testé 20 et 30 cm. Les résultats montrent que la relation entre le $SCOT_{20}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,76$) est moins bonne que celle entre le $SCOT_{30}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,89$). Ces relations ont été démontrées par l'estimation des $SCOT_S$ sur les 10 profils déjà analysés. La comparaison entre les $SCOT_S$ mesurés et ceux estimés le montre clairement (figure 6.3).

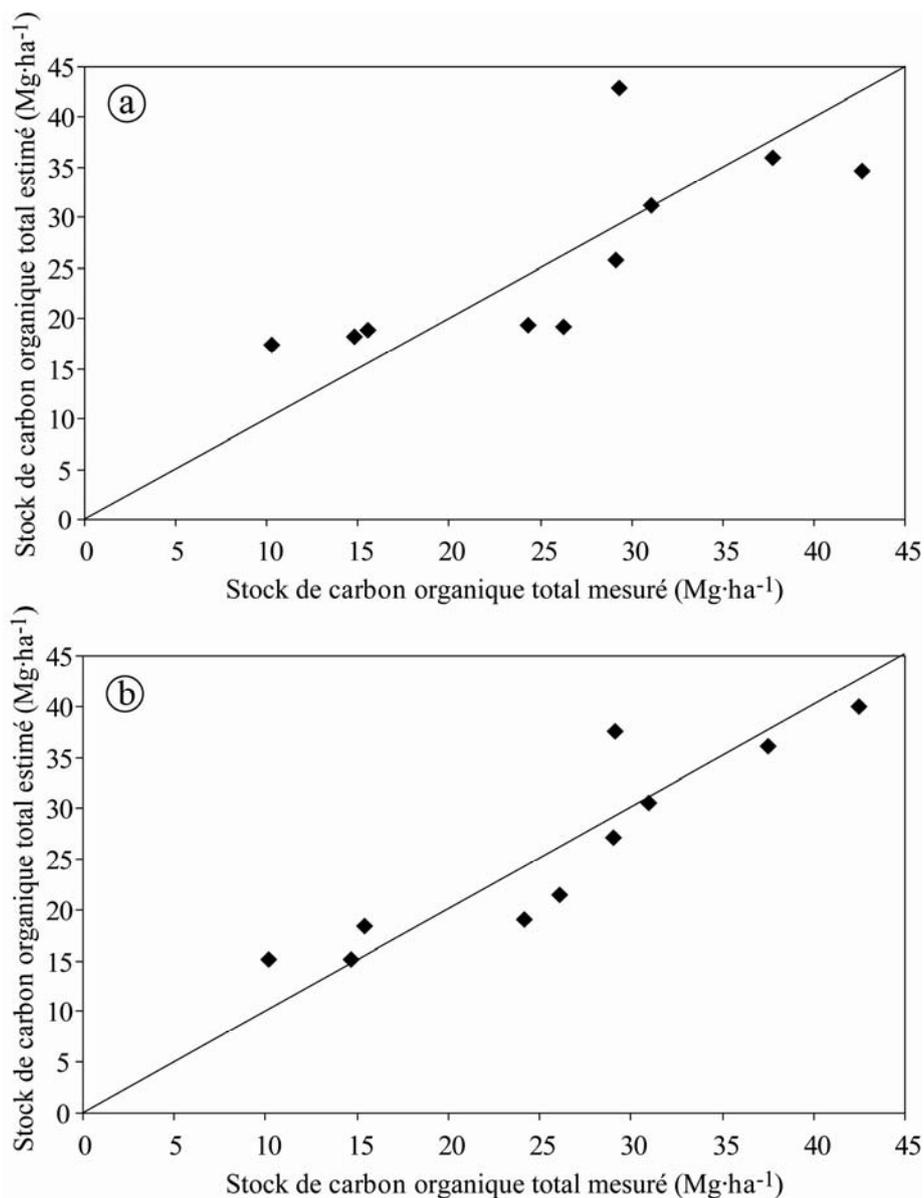


Figure 6.3. Relation entre les $SCOT_S$ mesurés et les $SCOT_S$ estimés pour a) 0-20 cm et b) 0-30 cm.

Le résultat de l'*EQM* pour le site de Las Cardas est de $5,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'épaisseur 0-20 cm et de $1,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour 30 cm. L'estimation des *SCOT* est donc meilleure pour la profondeur de 30 cm. Les *SCOT*₃₀ ont été moins surestimés ($EME < 0,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) que les *SCOT*₂₀ ($EME = 0,2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). De plus la précision est supérieure ($DSE = 3,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pour les *SCOT*₃₀ ($SCOT_{20} - DSE = 5,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

III.3. Conclusion des estimations à Las Cardas

L'ensemble de nos résultats montre que l'usage intensifie la décroissance du *SCOT*. Nous avons observé une différence significative entre les usages extensif et intensif et que ces derniers dépassent la capacité de charge de cet écosystème aride.

Nous avons ainsi pu estimer, avec une qualité relativement satisfaisante, le *SCOT* d'un sol en utilisant le *SCOT* de la surface 0-30 cm. Ceci permet de se soustraire à aux creusements des fosses, mais surtout d'augmenter le nombre de profils de sol étudié et donc la précision et l'échelle.

L'impact de l'intensité de l'usage sur le *SCOT* est observable sur la couche superficielle (0-30 cm) du sol. L'effet n'est pas quantifiable en profondeur (*SCOT*₇₀).

IV. Stock de carbone de la zone intermédiaire (Talhuén – Flor del Norte)

IV.1. Distribution du carbone organique total COT_S et des stocks de carbone organique total ($SCOT_S$) en profondeur

La distribution des COT_S en profondeur pour chaque profil et chaque mode d'usage peut être appréciée dans la figure 6.4. La distribution des $SCOT_S$ moyens pour chaque mode d'usage est représentée dans la figure 6.5 Les $SCOT_S$ varient entre 17,1 et 104,4 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 27,7 à 97,9 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour le secteur sous usage intensif (tableau 6.2). Lemenih et Itanna (2004) ont pu calculer également pour une zone proche au niveau climatique et végétation, des valeurs voisines de stocks variant entre 40 et 97 $Mg \cdot ha^{-1}$.

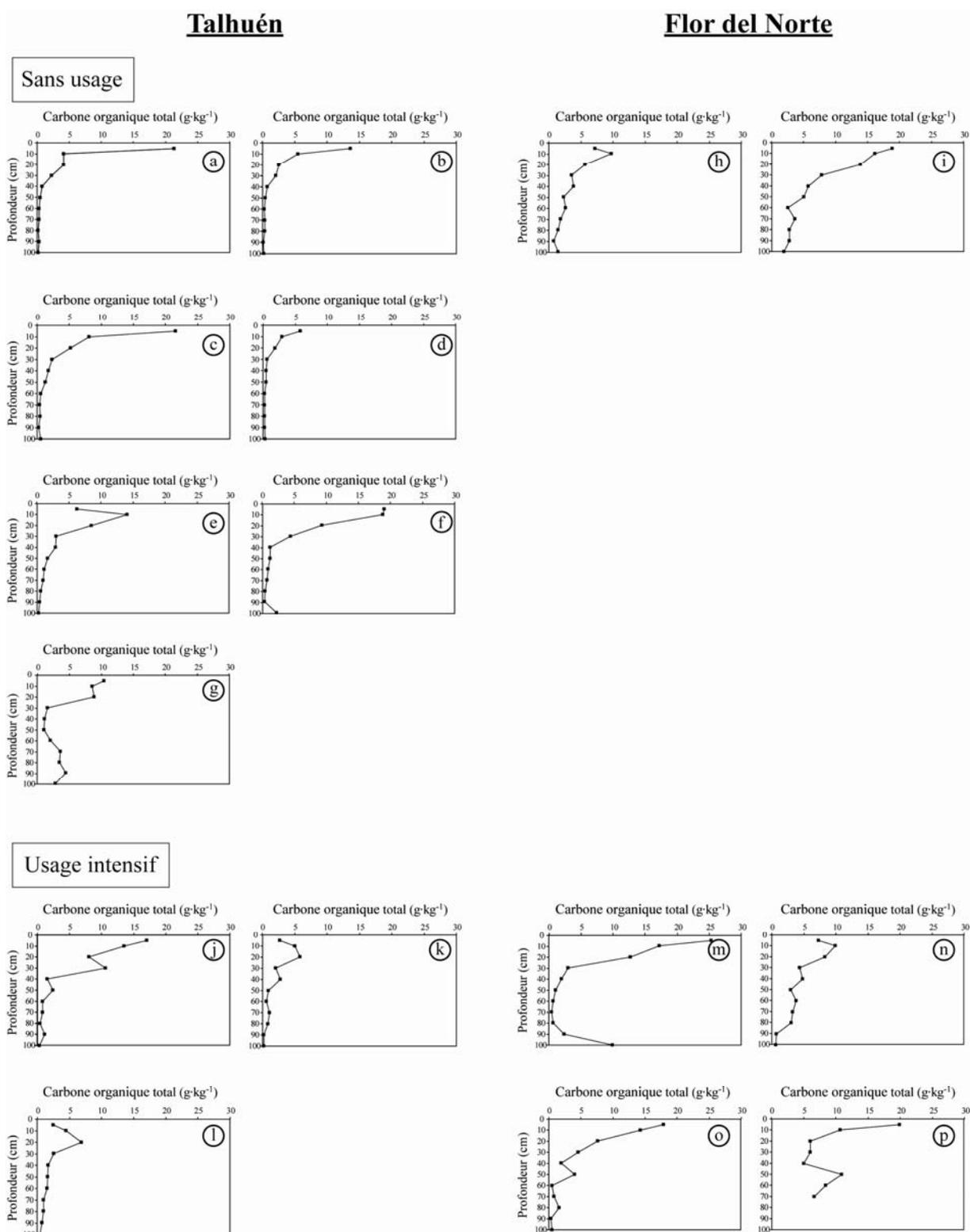


Figure 6.4. Distribution du carbone organique des profils (COT_S) en profondeur pour chaque mode d'usage dans la zone intermédiaire.

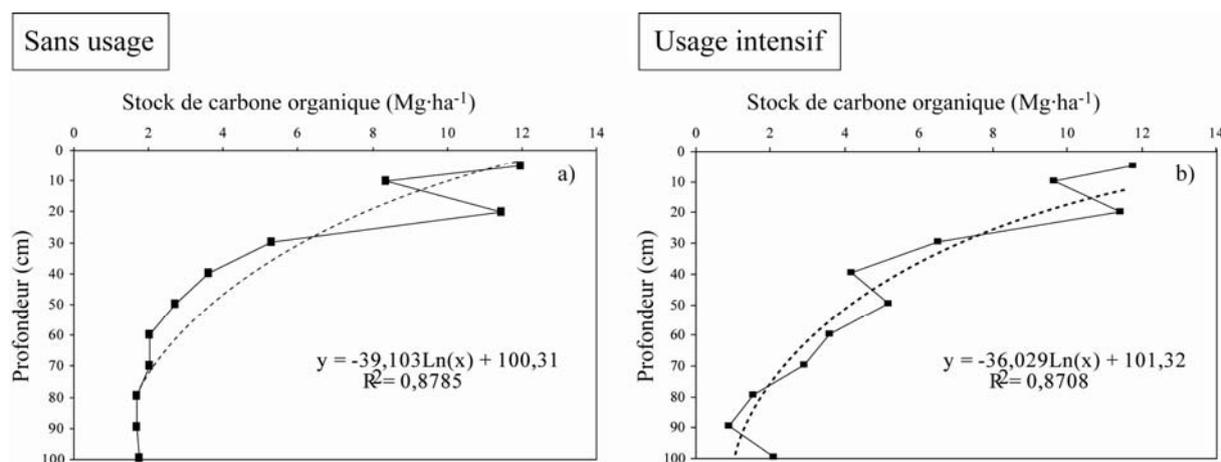


Figure 6.5. Distribution en profondeur des stocks de carbone organique totaux moyens par mode d'usage.

Tableau 6.2. Stock de carbone organique total (SCOT) sous les trois modes d'usage pour la zone intermédiaire. 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 total (Mg·ha ⁻¹)		
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm
Secteur sans usage			
Profil 1	39,9	35,2	4,7
Profil 2	28,8	24,3	4,5
Profil 3	48,7	39,4	9,3
Profil 4	17,1	12,8	4,3
Profil 5	53,3	38,6	14,7
Profil 6	66,8	53,6	13,2
Profil 7	63,1	31,6	31,5
Profil 8	51,6	29,9	21,7
Profil 9	104,4	68,5	35,9
Moyenne	52,6	37,1 (71 %)	15,5 (29 %)
Secteur usage intensif			
Profil 10	56,7	49,3	7,4
Profil 11	22,7	15,7	7,0
Profil 12	24,1	16,3	7,8
Profil 13	85,8	63,7	22,0
Profil 14	66,9	35,7	31,2
Profil 15	64,8	48,9	16,0
Profil 16	97,9	36,9	61,8
Moyenne	59,8 (114 %)*	38,1 (63 %)	21,9 (37 %)

L'analyse des valeurs de $SCOT_S$ au moyen du test de Fisher montre qu'il n'existe pas une différence statistiquement significative entre les trois situations d'usage ($P = 0,95$).

Le stock de carbone organique total à 30 cm ($SCOT_{30}$) varie de 12,8 à 68,5 Mg·ha⁻¹ pour la condition sans usage, de 15,7 à 63,7 Mg·ha⁻¹ sous usage intensif (tableau 6.2).

L'analyse des moyennes par le test de Fisher montre qu'il n'existe pas des différences statistiquement significatives entre les deux types d'usage ($P = 0,95$).

Le stock de carbone organique total entre 30 et 100 cm ($SCOT_{70}$) varie entre 4,3 et 35,9 $Mg \cdot ha^{-1}$ dans le secteur sans usage, de 7,4 à 61,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sous usage intensif (tableau 6.2). L'analyse statistique des moyennes des $SCOT_{70}$ montre qu'il n'existe pas des différences statistiquement significatives entre la condition sans usage et l'usage extensif et intensif.

IV.2. Prédiction des $SCOT_S$

Les résultats montrent que la relation entre le $SCOT_{20}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,6$) est moins bonne que celle entre le $SCOT_{30}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,69$). Ces relations ont été démontrées par l'estimation des $SCOT_S$ sur les 16 profils analysés (Talhuén-Flor del Norte). La comparaison entre les $SCOT_S$ mesurés et ceux estimés le montre clairement (figure 6.6).

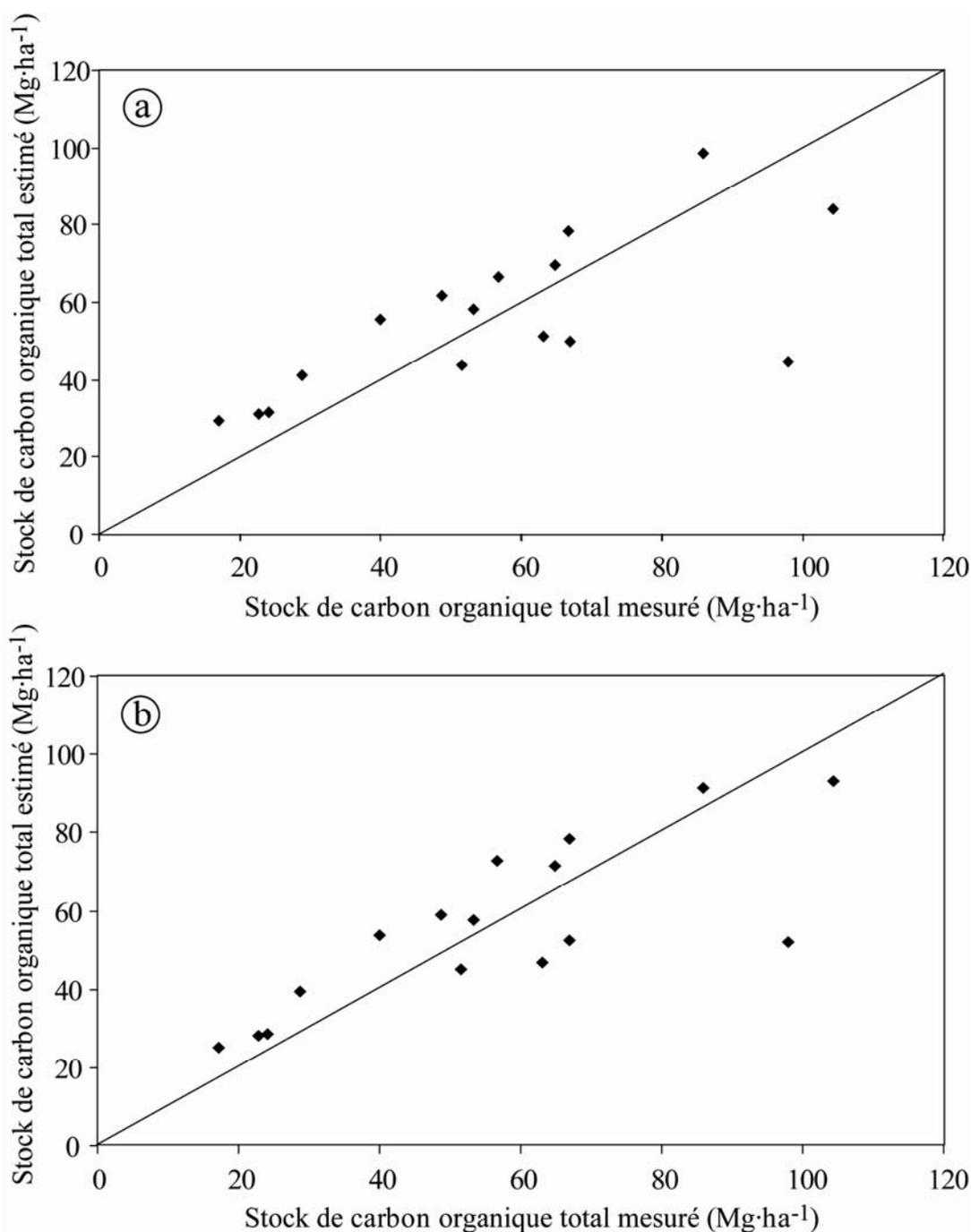


Figure 6.6. Relation entre les SCOT_S mesurés et les SCOT_S estimés pour a) 0-20 cm et b) 0-30 cm.

Le résultat de l'*EQM* pour le site de la zone intermédiaire est de 8,3 Mg·ha⁻¹ pour l'épaisseur 0-20 cm et de 15,3 Mg·ha⁻¹ pour 30 cm. L'estimation des *SCOT* est moins biaisée pour la profondeur de 20 cm. Les *SCOT*₂₀ ont été moins surestimés (*EME* = 0,16 Mg·ha⁻¹) que les *SCOT*₃₀ (*EME* = 0,2 Mg·ha⁻¹). De plus la précision est supérieure (*DSE* = 8,2 Mg·ha⁻¹) pour les *SCOT*₃₀ (*SCOT*₃₀ - *DSE* = 15,3 Mg·ha⁻¹).

IV.3. Conclusion des estimations dans la zone intermédiaire

On ne peut pas distinguer une influence du type d'usage par rapport au $SCOT_s$, $SCOT_{30}$ et $SCOT_{70}$.

L'usage n'a aucune conséquence sur la distribution de stocks entre la couche 0-30 cm et 70-100 cm.

Le $SCOT_{30}$ est mieux corrélé que le $SCOT_{20}$. En revanche le $SCOT_{30}$ a un biais plus important que le $SCOT_{20}$.

Nous avons ainsi pu estimer, avec une qualité relativement satisfaisante, le $SCOT$ d'un sol en utilisant le $SCOT$ de la surface 0-30 cm. Ceci permet de se soustraire au creusement des fosses, mais surtout d'augmenter le nombre de profils de sol étudiés et donc la précision et l'échelle.

V. Stock de carbone de la zone de Las Ramadas

V.1. Distribution du carbone organique total COT_S et des stocks de carbone organique total ($SCOT_S$) en profondeur

La figure 6.7 montre la distribution des COT_S avec la profondeur, pour chaque profil et chaque mode d'usage. La distribution des $SCOT_S$ moyens par mode d'usage est présentée dans la figure 6.8. Les $SCOT_S$ varient entre 112,8 et 215 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 95,84 à 98,31 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour le secteur sous usage extensif et de 58,11 à 242,32 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la situation sous usage intensif (tableau 6.3). Quelque soit l'usage, la zone de Las Ramadas possède les valeurs les plus élevées de $SCOT_S$ de toute la région.

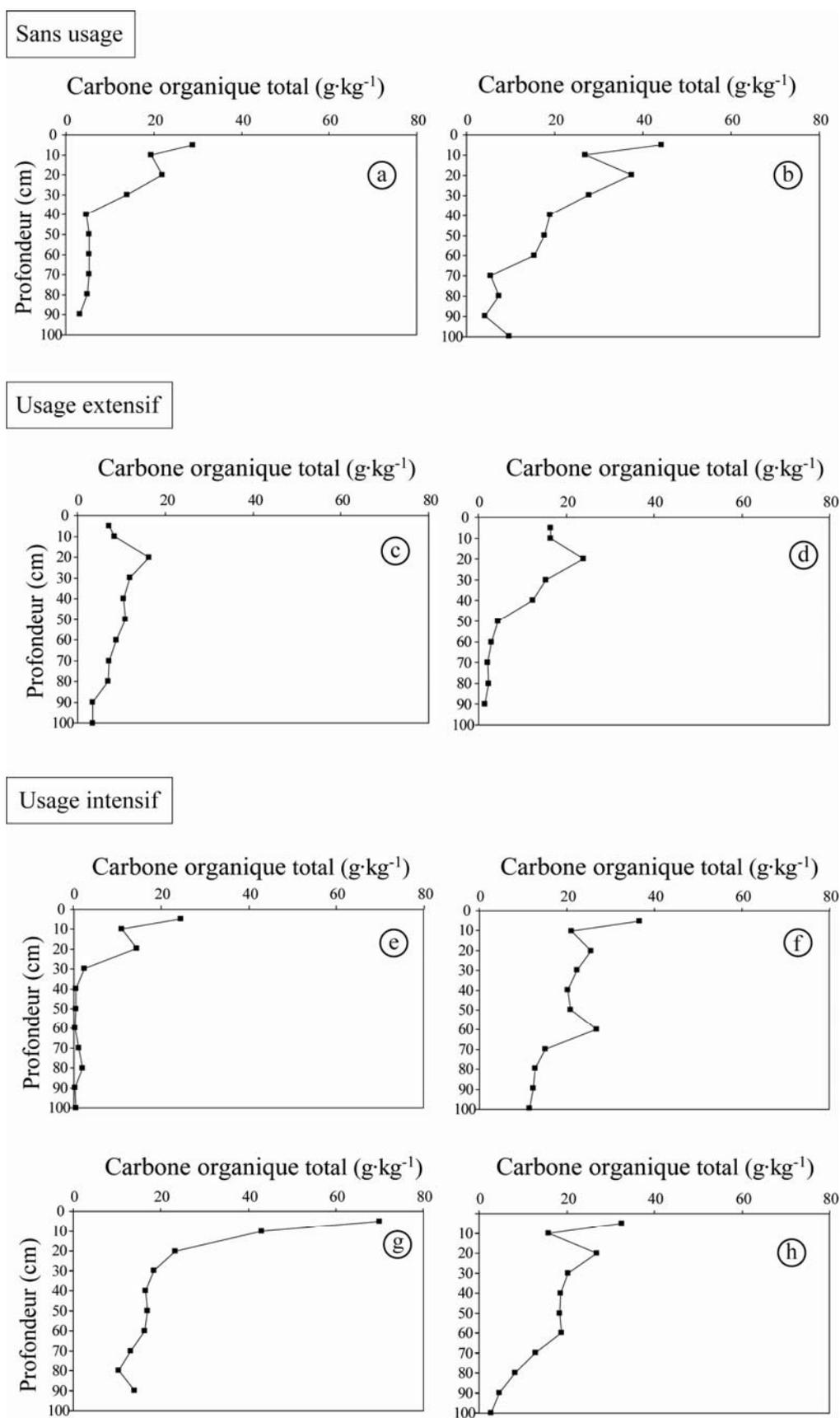


Figure 6.7. Distribution du carbone organique des profils (COT_S) en profondeur pour chaque mode d'usage dans la zone de Las Ramadas.

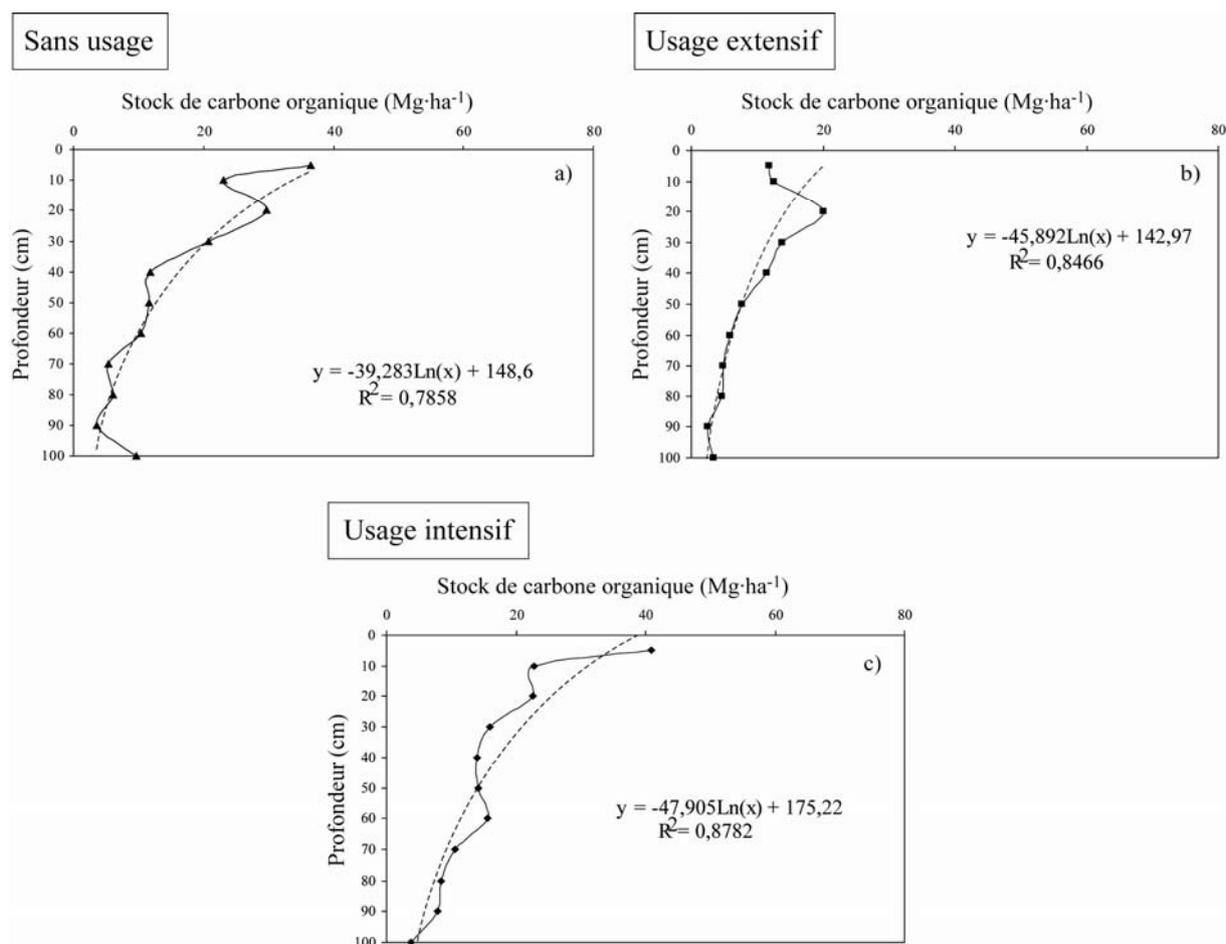


Figure 6.8. Distribution en profondeur des stocks de carbone organique totaux moyens par mode d'usage.

Tableau 6.3. Stock de carbone organique total (SCOT) 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 total (Mg·ha ⁻¹)		
	0-100 cm	0-30 cm	30-100 cm
Secteur sans usage			
Profil 5	112,8	84,2	28,6
Profil 6	215	136,2	78,8
Moyenne	163,9	110,2 (67%)	53,7 (33%)
Secteur usage extensif			
Profil 7	95,8	44,2	51,7
Profil 8	98,3	72,2	26,1
Moyenne	98,8 (60%)*	58,2 (59%)	40,6 (41%)
Secteur usage intensif			
Profil 1	59,1	52,8	6,3
Profil 2	225,4	105,6	119,8
Profil 3	242,3	154,8	87,5
Profil 4	180,2	95,5	84,8
Moyenne	176,8 (108%)*	102,2 (58%)	74,6 (42%)

Le test de Fisher réalisé sur les valeurs de $SCOT_S$ montre qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les trois situations d'usage ($P = 0,95$). Sur cette zone on voit plutôt l'effet de la position sur le gradient ouest-est, que l'effet de l'usage. Cela peut s'expliquer du fait qu'en haute-montagne, avec des températures moyennes inférieures et des précipitations moyennes plus importantes, le ralentissement de la dégradation de la MO masque l'effet de l'usage, qui lui amplifie ce ralentissement (Chapitre V).

Le stock de carbone organique total à 30 cm ($SCOT_{30}$) varie de 84,2 à 136,2 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sans usage, de 44,2 à 72,2 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage extensif et de 52,8 à 154,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage intensif (tableau 6.3). L'analyse des moyennes par le test de Fisher montre qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les trois types d'usage ($P = 0,95$). Le comportement des stocks de la couche 0-30 cm est le même que le comportement du stock de la totalité du profil. L'explication à ce comportement a été faite dans le paragraphe précédent.

Le stock de carbone organique total entre 30 et 100 cm ($SCOT_{70}$) varie entre 28,6 et 78,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ dans le secteur sans usage, de 26,1 à 51,7 $Mg \cdot ha^{-1}$ sous usage extensif et entre 6,3 et 119,8 $Mg \cdot ha^{-1}$ pour la condition sous usage intensif (tableau 6.3). L'analyse statistique des moyennes des $SCOT_{70}$ montre qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre la condition sans usage et les usages extensif et intensif. Le comportement du $SCOT_{70}$ est le même que celui du $SCOT_{30}$ et du $SCOT_S$.

Les proportions des stocks entre 0-30 et 30-100 cm sont nettement différentes entre le secteur sans usage et les secteurs sous usage extensif et intensif. 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 (60%) et la profondeur (40%) par rapport à la situation sans usage (67% surface – 33% profondeur) (tableau 6.3). 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.

V.2. Prédiction des $SCOT_S$

Les résultats de la prédiction des $SCOT_S$ montrent que la relation entre le $SCOT_{20}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,75$) est moins bonne que celle entre le $SCOT_{30}$ et le $SCOT_S$ ($R^2 = 0,83$). Ces relations ont été démontrées par l'estimation des $SCOT_S$ sur les 8 profils. La figure 6.9 montre la comparaison entre les $SCOT_S$ mesurés et ceux estimés.

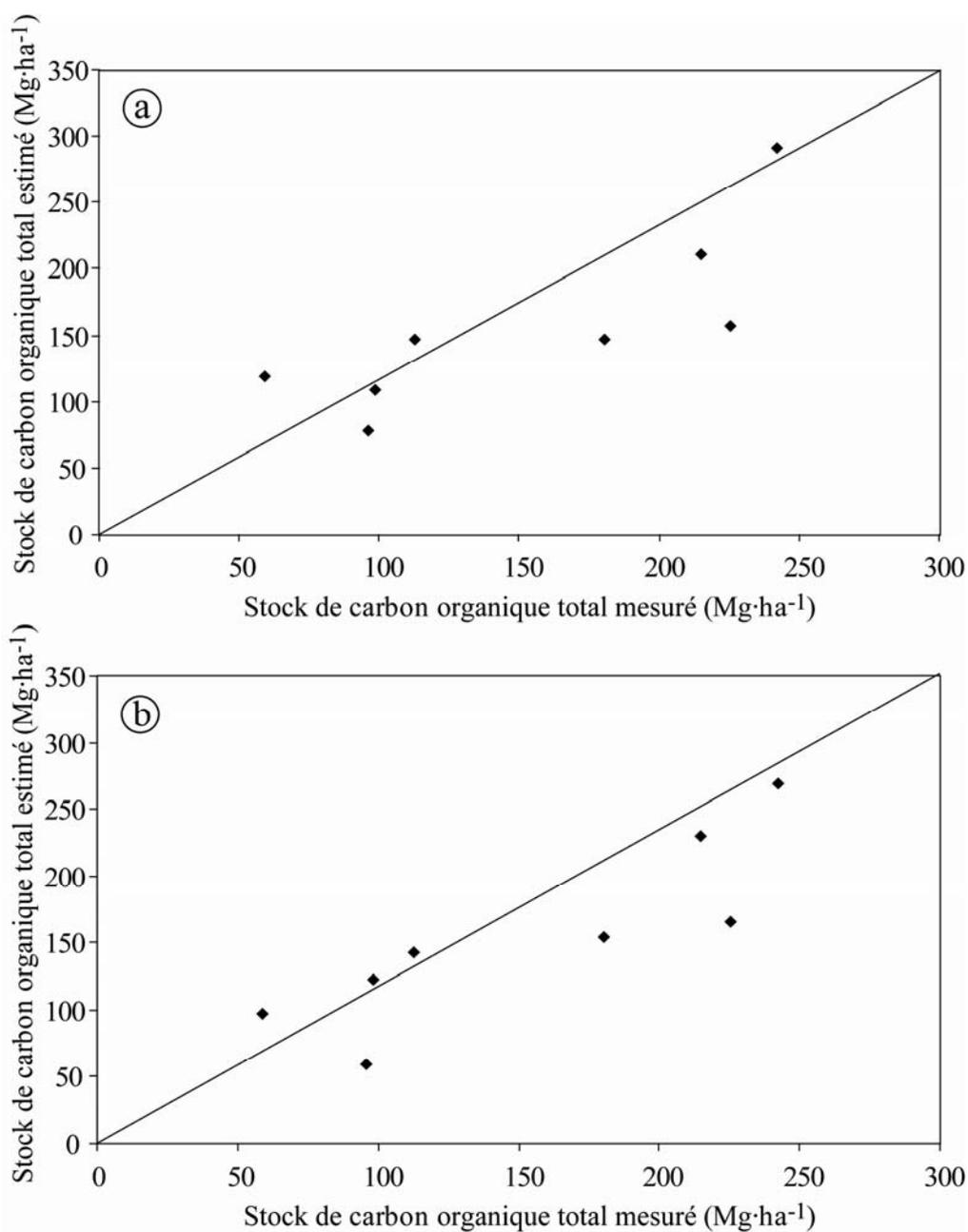


Figure 6.9. Relation entre les $SCOT_S$ mesurés et les $SCOT_S$ estimés pour a) 0-20 cm et b) 0-30 cm.

Le résultat de l'*EQM* pour le site de Las Ramadas est de $40,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour l'épaisseur 0-20 cm et de $34,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour 0-30 cm. L'estimation des *SCOT* est donc meilleure pour la profondeur de 30 cm. Les *SCOT*₃₀ ont été moins surestimés ($EME = 1,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) que les *SCOT*₂₀ ($EME = 3,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). De plus la précision est supérieure ($DSE = 34,4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pour les *SCOT*₃₀ ($SCOT_{20} - DSE = 40,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

V.3. Conclusion des estimations à Las Ramadas

Nous n'avons pas observé une différence significative entre les usages extensif et intensif pour les trois types de stocks : *SCOT*₃₀, *SCOT*₇₀ et *SCOT*₅. Ceci s'explique par le fait que l'impact de l'usage sur les stocks de carbone est fonction de la vitesse de dégradation de la MO, c'est-à-dire que pour des vitesses de dégradation moindres, l'effet de l'usage tend à s'effacer.

On note également un second effet : l'usage n'a pas d'impact sur la distribution des stocks de carbone en profondeur.

Pour une zone de haute montagne nous avons pu estimer, avec une qualité relativement satisfaisante, le *SCOT* d'un sol en utilisant le *SCOT* de la surface 0-30 cm. Ceci permet de se soustraire au creusement des fosses, mais surtout d'augmenter le nombre de profils de sol étudié et donc la précision et l'échelle.

VI. Conclusions générales du chapitre

Les $SCOT_S$ augmente dans un gradient est-ouest.

Le $SCOT_S$ peut être estimé correctement au moyen d'un modèle de régression linéaire à partir du $SCOT_{30}$.

La zone proches de la côte (Las Cardas) présentent des $SCOT_S$ inversement proportionnel à l'intensité de l'usage. En direction de l'est (Talhuén-Flor del Norte et Las Ramadas) cet effet tend à s'inverser : les $SCOT_S$ sous usage intensifs sont les plus élevés.

Pour toutes les zones l'effet de l'usage tend à s'effacer avec la profondeur.