

Tiphaine Chevallier, Tantely M. Razafimbelo, Lydie Chapuis-Lardy et Michel Brossard (dir.)

Carbone des sols en Afrique Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles

IRD Éditions

Chapitre 3. Évaluation des stocks de carbone organique dans les sols au Maroc

Mohamed Sabir, René Sagno, Quinette Tchintchin, Hafida Zaher et Hassan Benjelloun

DOI : 10.4000/books.irdeditions.34902
Éditeur : IRD Éditions, FAO
Lieu d'édition : Rome, Marseille
Année d'édition : 2020
Date de mise en ligne : 16 décembre 2020
Collection : Synthèses
ISBN électronique : 9782709928373



<http://books.openedition.org>

Édition imprimée

Date de publication : 1 septembre 2020

Référence électronique

SABIR, Mohamed ; et al. *Chapitre 3. Évaluation des stocks de carbone organique dans les sols au Maroc*
In : *Carbone des sols en Afrique : Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles* [en ligne]. Rome, Marseille : IRD Éditions, 2020 (généré le 18 décembre 2020). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/34902>>. ISBN : 9782709928373. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.34902>.

Évaluation des stocks de carbone organique dans les sols au Maroc

Mohamed SABIR, René SAGNO,

Quinette TCHINTCHIN, Hafida ZAHER,

Hassan BENJELLOUN

Introduction

La communauté scientifique semble arriver à un consensus sur le changement climatique à l'échelle planétaire. Elle s'accorde à attribuer ce changement à une augmentation des gaz dits « à effet de serre » (GES) dans l'atmosphère. En effet, depuis 150 ans, une concentration de plus en plus élevée des GES est observée dans l'atmosphère, notamment le CO₂ qui serait responsable d'environ 65 % de l'effet de serre (PETIT, 2003). Ces augmentations seraient principalement dues à l'utilisation des combustibles fossiles et à la déforestation. Ainsi il est de la responsabilité de tous de s'engager dans ce défi, celui de la réduction des émissions de GES.

La séquestration du carbone dans les sols et la biomasse terrestre est l'une des options énoncées dans l'article 3.4 du Protocole de Kyoto, mais très peu d'informations sont disponibles sur les capacités de stockage de carbone dans les sols. Ce manque d'informations, reconnu par la communauté scientifique internationale, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) notamment, est l'un des principaux freins à la prise en compte des sols et de leurs stocks de carbone dans les projets en lien avec le secteur de l'agriculture, foresterie et autres usages des terres (AFOLU ou LULUCF pour *land use and land use change and forestry* en anglais). Il est donc important d'identifier les puits et les sources de carbone terrestres selon les usages et les pratiques des sols.

L'importance des sols tropicaux dans le stockage de carbone est depuis longtemps soulignée (SOMBROEK *et al.*, 1993). Cependant les études s'avèrent beaucoup plus rares pour les sols méditerranéens. Or les sols des régions méditerranéennes sont très originaux et le Maroc en est un exemple parfait. Du fait de l'aridité estivale des régions méditerranéennes et du fait d'une forte présence de roches calcaires et calciques, la majorité des sols y sont dominés par la présence du calcium, voire du calcaire. Par ailleurs, les sols sont souvent argileux et naturellement riches en matières organiques et en calcium, donc bien structurés et bien drainés. Les sols appauvris en argiles (dits « lessivés ») y sont nettement plus rares que dans les régions tempérées et tropicales (BADRAOUI, 2006).

Dans le monde méditerranéen, le Maroc est probablement le pays de la plus grande diversité pédologique. Tous les types de sols et de « pédopaysages » méditerranéens y sont présents. Ceci est dû à la grande diversité des facteurs de pédogenèse : roches, reliefs, climats, couverts végétaux, temps d'évolution et occupations humaines (BADRAOUI et STITOU, 2002 ; RUELLAN, 2003). Cependant, du fait de l'ancienneté de l'occupation par l'homme qui n'a pas toujours su gérer les sols, les ressources en sol sont souvent fortement dégradées avec des appauvrissements organiques et minéraux (ROOSE, 2002 ; BADRAOUI, 2016). L'acquisition des données sur le stockage de carbone permettra de comprendre le fonctionnement des écosystèmes selon leur mode de gestion et ainsi d'éviter la progression de la dégradation des sols, voire de favoriser leur restauration.

Au Maroc, de nombreuses études sur les stocks de carbone ont été réalisées. Cependant très peu d'études existent sur l'intégration de ces données et la spatialisation des stocks de carbone des sols marocains. Ainsi, pour répondre à cette problématique, cette étude se fixe comme objectif principal, d'évaluer les stocks en carbone des sols du Maroc.

Pour atteindre cet objectif, on a (1) collecté et compilé des données pédologiques existantes, (2) estimé le stock de carbone dans le sol et (3) intégré ces données dans un système d'information géographique (SIG) afin de spatialiser les stocks de carbone du sol sur l'ensemble du territoire national.

Présentation de la zone d'étude

L'étude a concerné tout le territoire du Royaume du Maroc (71,08 Mha). La figure 1 donne les principales zones agro-écologiques (SABIR et QARRO, 2017) et montre la diversité écologique importante de cette zone méditerranéenne. En effet, la combinaison des facteurs écologiques tels que climat, substrat et relief aboutit à des milieux naturels très variés. Dans les zones de contact entre

montagnes et plaines (appelées *Dir*) et sur un espace très réduit, on peut passer d'un climat aride en plaine à un climat per-humide en altitude. La pédogénèse est alors très variable et les sols produits sont donc très diversifiés. Les sols sont de plus impactés par des usages variés allant d'une agriculture intensive en plaines et sur les plateaux à des agrosystèmes complexes, souvent de subsistance, et intégrant agriculture, arboriculture et élevage. On note souvent des incohérences entre les capacités agronomiques des terres et leurs usages effectifs. Ceci est d'autant plus accentué sur les terres en pente où les techniques culturales, notamment le travail du sol, ne sont pas appropriées. Le couvert végétal forestier, protecteur des sols en pente, est en constante régression à cause de la sur-exploitation (surpâturage, défrichage, prélèvement de bois de feu). Sur les versants dénudés, l'érosion hydrique est assez importante et les sols sont souvent dégradés. Les sols peu évolués d'érosion y sont dominants.

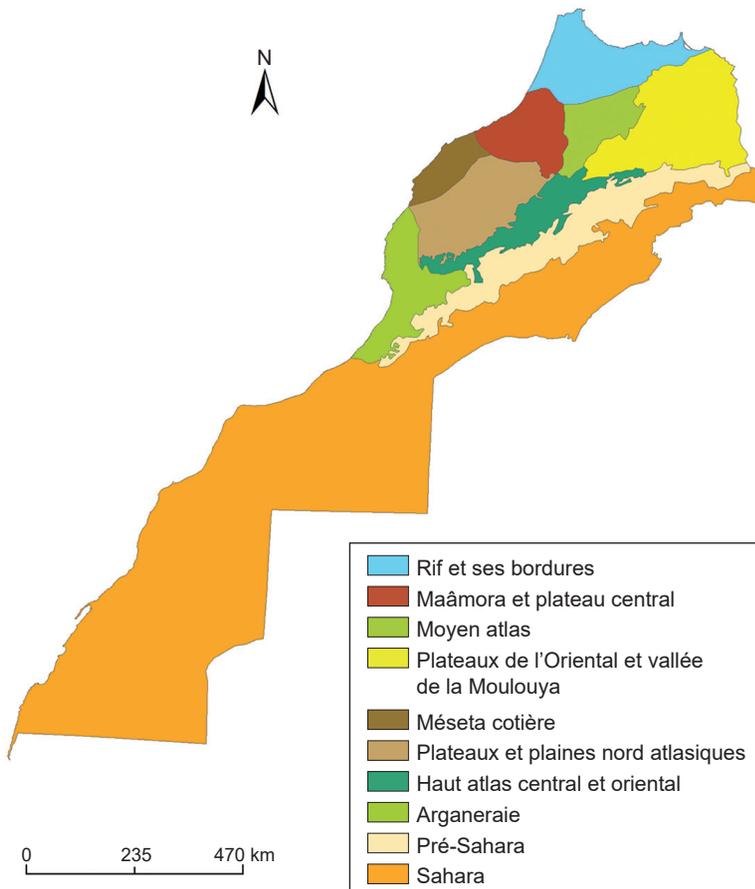


Figure 1

Carte des zones agro-écologiques du Maroc.

Source : MADREF (2000), modifié et complété par SABIR et QARRO (2017).

Traits climatiques

Le Maroc s'étend en latitude de la zone climatique méditerranéenne humide à celle saharienne. Du fait de leur situation géographique entre océan Atlantique et mer Méditerranée, ces zones climatiques sont influencées par l'opposition entre une façade atlantique fraîche vers l'ouest et l'intérieur des terres plus aride et continental (MICHARD, 1976). Ceci confère au Maroc une diversité bioclimatique assez remarquable : per-humide, humide et subhumide en altitude (au centre du pays), semi-aride dans les plaines atlantiques et l'Oriental, aride et saharien au sud et sud-atlasique. Toutes les variantes bioclimatiques – chaude, tempérée, fraîche, froide, très froide, extrêmement froide et glaciale – existent. Les pluviométries moyennes annuelles diminuent du nord (2 000 mm) au sud (100 mm).

Aspects géologiques et géomorphologiques

Le Maroc offre une grande diversité lithologique (MICHARD, 1976 ; EL GHARBAOUI, 1987). On distingue en particulier un socle précambrien et primaire, faisant partie de la plaque africaine. Il apparaît sous forme d'affleurements dans différentes régions du Maroc (Hamadas, Hauts-Plateaux, Moyen Atlas tabulaire, Moyen Atlas oriental, Haut Atlas oriental et certaines portions de l'Anti-Atlas). Les chaînes rifaines au nord sont des formes du relief complexes car certaines sont plissées, d'autres sont charriées. Ainsi certaines roches sont métamorphiques (gneiss, micaschistes) d'âge paléozoïque alors que d'autres sont d'âge secondaire (calcaire, dolomie, grès rouge) ou tertiaire (flysch schisto-gréseux, marno-schisteux). Les plaines alluviales, qui s'étendent entre les différentes chaînes des Atlas et du Rif, présentent des accumulations argileuses, limoneuses ou localement sableuses. Il y a aussi de grandes accumulations de sable au niveau du littoral et dans le Maroc saharien. Il existe par ailleurs d'autres dépôts d'argiles salifères et gypsifères du Trias ou des épandages basaltiques ou des affleurements de granites, gabbros dans les chaînes montagneuses du Moyen Atlas et du Haut Atlas.

Les végétations

La végétation du Maroc présente une grande diversité. Bien que cette végétation soit très variée dans sa composition floristique (7 000 espèces), elle est dominée par des éléments méditerranéens (QUEZEL, 1995 ; BENABID, 2000). Cette biodiversité floristique est la résultante des diversités orographique, lithologique, édaphique, climatique et bioclimatique. Les formations forestières et alfatières, qui constituent un domaine public de l'État, s'étendent sur environ 9 Mha. Les principales espèces forestières sont le chêne vert (23,4 %), le chêne-liège (6 %), l'arganier (14,3 %) et les acacias (19,4 %). Parmi les résineux, citons le cèdre (2,3 %), le thuya (10,3 %), le genévrier (4 %), le cyprès (0,1 %), le pin (1,4 %) et le sapin (0,1 %). Les autres essences et essences secondaires représentent 18,5 % (AEFCS, 1996). Les terrains de parcours, composés de steppes, de

formations arbustives et de prairies, couvrent environ 92 % de la superficie totale du Maroc. Près de 97 % de ces parcours se trouvent en zones arides et semi-arides dans les régions de l'Oriental, du pré-Sahara et dans l'immense zone saharienne (QARRO *et al.*, 2010).

Traits pédologiques

La nature des sols est très variable aussi bien entre les différentes classes de sols qu'à l'intérieur d'une même classe. Aussi, il s'avère difficile d'illustrer les caractéristiques d'un type de sol donné pour différentes régions géomorphologiques compte tenu des spécificités locales de chaque unité. D'une manière générale, sur le plan lithologique, la diversité des substrats parentaux est le résultat de phénomènes géologiques de périodes lointaines. En effet, les grands changements du climat et de la végétation de la période post-würmienne ont marqué la formation et l'évolution des sols du Maroc et ont formé des sols polycycliques (LAOUINA, 1990 ; LAOUINA *et al.*, 1993). L'effet conjugué du climat et de la végétation, est à l'origine de la formation d'une large gamme de types de sols qui se répartissent comme suit (fig. 2) :

- en altitude, l'augmentation des précipitations et la diminution des températures font évoluer les sols rouges fersiallitiques en des sols bruns fersiallitiques et bruns forestiers en altitude. Et, vers les sommets des hautes montagnes, au niveau des étages forestiers, préforestiers ou présteppiques, on observe les sols de type ranker ;
- quand les terrains sont pentus, on note l'apparition des Rendzines et des sols peu évolués d'érosion ;
- à de très hautes altitudes, dans les zones désertiques, sur les rocailles, ou dans les zones sensibles à l'érosion, on rencontre des sols bruts ou peu évolués ;
- à de basses ou moyennes altitudes, sous les bioclimats semi-aride, subhumide ou humide, on observe des sols rouges fersiallitiques caractérisés par une rubéfaction plus ou moins intense ;
- dans les plaines, on rencontre des sols isohumiques, de type marron ou châtain avec présence d'encroûtements, ou des Vertisols (ou *tirs*). En bioclimat semi-aride, les plaines sont généralement caractérisées par des croûtes calcaires et en zone aride à saharienne on a des sols gris de steppe ;
- dans les bioclimats aride et saharien, dans les lacs et estuaires, les sols halo-morphes sont fréquents.

Du fait des contraintes bioclimatiques et de végétation, la grande majorité de la couverture édaphique est constituée de sols peu évolués. Quelques types de sols dominants sont décrits ci-après.

Les principaux types de sols rencontrés dans ces régions sont :

- sur la côte atlantique : sols fersiallitiques à sesquioxydes de fer à texture sablonneuse légère sur grès calcaire dunaire ;

- dans les plaines irriguées : Vertisols à texture argileuse, le long des côtes plutôt des sols récents peu évolués à texture limono-argileuse ;
- sur le plateau des Zaïers : sols brunifiés (ayant de bonnes aptitudes agricoles) sous forêts et sols vertiques et isohumiques ailleurs. Sur les formations calcaires, les sols bruns calcaires se dégradent sous l'effet combiné de la pente et de la disparition du couvert végétal ;
- les sols minéraux bruts se localisent sur des formations gréseuses et dorsales calcaire-dolomitiques ;
- les sols peu évolués d'érosion se rencontrent sur des formations marneuses et marno-schisteuses ;
- les sols fersiallitiques à sesquioxydes de fer et de manganèse se situent sur des formations gréseuses. Ces types de sols, peu profonds, se trouvant sur des terrains accidentés à forte pente, subissent une érosion intense.

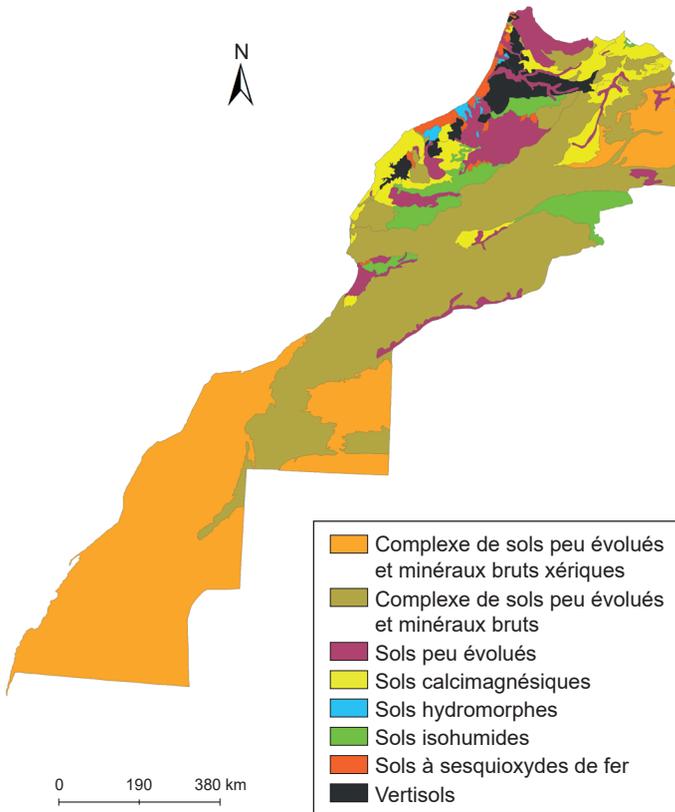


Figure 2

Carte des types de sols du Maroc.

La superficie des sols sodiques, brunifiés et des Podzols est trop faible pour qu'ils soient représentés sur la carte.

Source : ANCFCC, 1996.

Statut organique

Plusieurs auteurs s'accordent pour dire que les teneurs en matière organique et en carbone organique sont très faibles dans les sols marocains et que celles-ci sont très sensibles aux modes d'usage des terres. En effet, selon MRABET *et al.* (2002), 80 % des sols marocains sont très fragiles à la mise en culture avec des taux de matière organique inférieur à 1 %. Des études montrent des chutes des taux de matière organique dans les sols cultivés, par exemple de 1,8 % en 1987 à 0,8 % en 1997 dans un sol fersiallitique cultivé dans la plaine des Doukkala (SOUDI *et al.*, 2000) ; de 4,7 % sous des forêts de chêne-liège à 2,2 % sous des cultures de blé dur (céréales/jachère) dans le Rif occidental et pour divers sols (SABIR *et al.*, 2004).

Les stocks de carbone organique du sol (COS) sur les 30 premiers centimètres ont été estimés à 95 Mg C.ha⁻¹ sous des forêts, 70 Mg C.ha⁻¹ sous des matorrals surpâturés (- 26 %) et 53 Mg C.ha⁻¹ sous des cultures (- 46 %). Les stocks de carbone organique mesurés sont également très variables pour un même écosystème. Dans le Moyen Atlas, les stocks de carbone du sol sous des chênes verts varient de 80 à 56 Mg C.ha⁻¹ (BOULMANE *et al.*, 2010) et dans le Moyen Atlas central, ils sont respectivement de 284, 303, 277 et 143 Mg C.ha⁻¹ sous des chênes verts, chênes zéens (zéenaies), cèdres et pins maritimes de montagne (EL MDERSSA *et al.*, 2019). Ces variations sont fortement corrélées à la densité des arbres et à la nature du matériel lithologique.

Spatialisation des stocks de carbone

L'estimation des stocks de carbone organique des sols a été réalisée par la collecte, la compilation et l'analyse de données pédologiques recueillies auprès de laboratoires et de centres de documentation (SAGNO, 2008 ; TCHINTCHIN, 2008) :

- des établissements dépendants du ministère de l'Agriculture : Institut national de recherche agronomique, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, École nationale d'agriculture de Meknès, École nationale forestière d'ingénieurs et les Offices régionaux de mise en valeur agricole du Tadla, Haouz, Gharb et de l'Oriental ;
- du centre de recherche forestière ;
- de quelques facultés.

Cette opération a nécessité le traitement d'une masse importante de données d'où la conception et la mise en place d'une base de données pour le stockage des données d'analyses du sol et des données cartographiques.

Base de données

Cette base a regroupé des données d'analyses physicochimiques des sols et des données graphiques des sites recensés dans la documentation. Le modèle conceptuel et le modèle physique de la base de données ont été conçus à l'aide du logiciel *Power design* 12.1 (fig. 3). La structuration de la base a été réalisée sous *Microsoft Access* 2003.

Cartes utilisées

Deux cartes ont été utilisées : la carte des types des sols à l'échelle 1/2 000 000 produite par l'Agence nationale de la conservation foncière, du cadastre et de la cartographie (ANCFCC, 1996) et la carte des zones agro-écologiques du Maroc (SABIR et QARRO, 2017). Ces cartes ont été digitalisées sous *Arc Gis* 9.2. Les plages cartographiques des sols représentent des grands groupes de sols dont un type est dominant.

Calcul des stocks de COS

Le stock de carbone organique du profil d'un sol composé de k horizons a été calculé comme suit :

$$StockC = \sum_{i=1}^k C_i \times Da_i \times E_i$$

Où $StockC$ est le stock de carbone de l'ensemble du profil (kg C.m⁻² ou 10 Mg C.ha⁻¹), Da la densité apparente de l'horizon i en kg.dm⁻³, C la teneur en carbone organique de l'horizon i en g C.kg⁻¹ sol, et E est l'épaisseur de l'horizon i en mètres.

La couche de sol retenue pour les calculs du stock de COS est 0-30 cm. Il faut noter qu'il n'a pas été tenu compte des taux des éléments grossiers dans le sol, information non disponible pour la majorité des horizons. Pour les couches de sols dont on dispose de cette information, le taux de matière fine varie de 30 à 100 %. La proportion de terre fine est relativement faible dans les sols peu évolués et minéraux bruts des zones montagneuses. Elle est élevée et atteint 100 % dans les plaines agricoles à sols fersiallitiques, isohumiques et les Vertisols.

Représentation spatiale des stocks de COS

Les stocks ainsi calculés ont été intégrés dans un SIG afin de les cartographier. La représentation spatiale a été effectuée en se basant sur les deux cartes, des types des sols et des zones agro-écologiques.

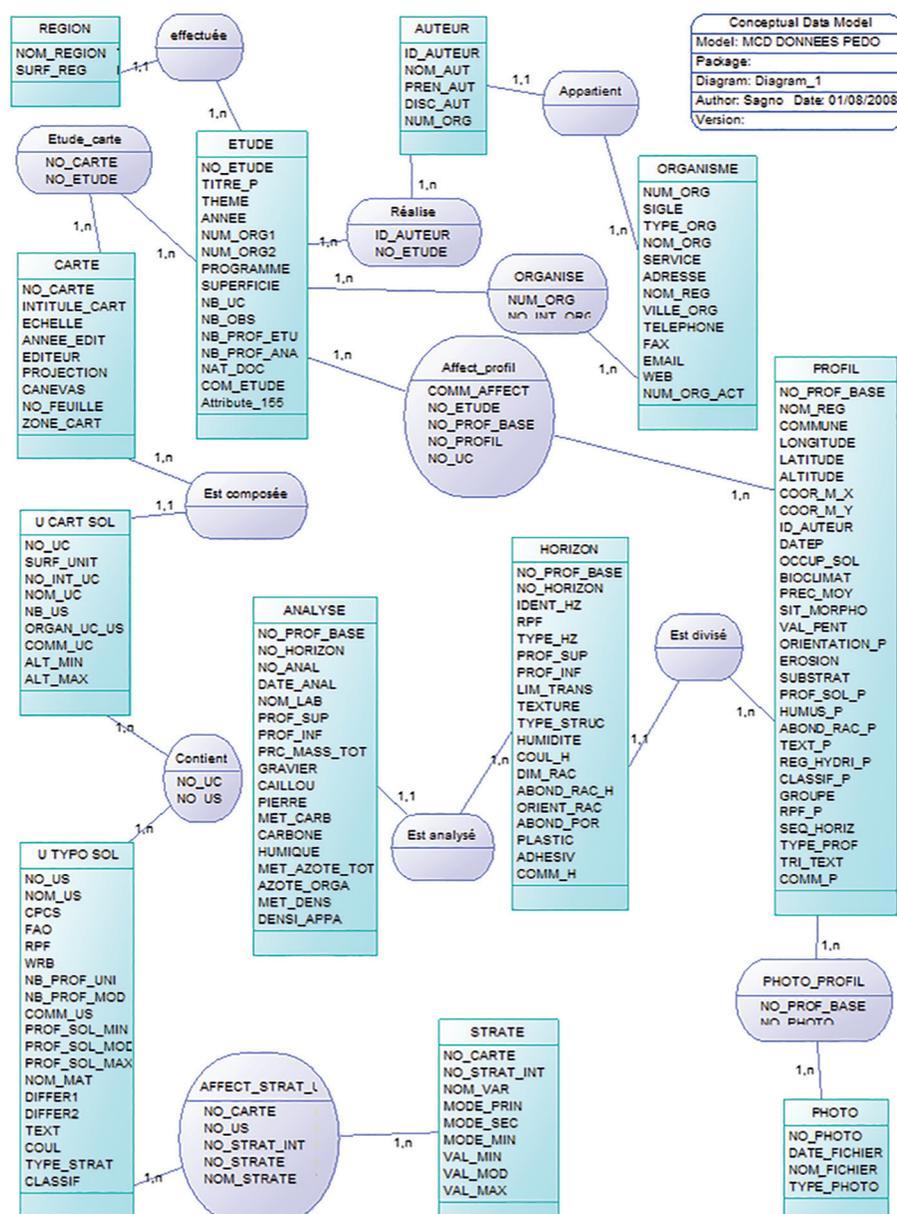


Figure 3

Schéma du modèle conceptuel de la construction de la base des données.

Source : SAGNO, 2008.

Résultats et discussion

Base de données

La base de données construite pour ce travail regroupe pour l'ensemble du Maroc un total de 912 profils. Le tableau 1 et la figure 4 donnent leur répartition par zone agro-écologique. On constate une densité faible de profils par rapport aux surfaces de ces zones alors que, en principe, les études pédologiques requièrent un profil pour 100 ha. Ceci est dû au fait que ces études pédologiques ont porté essentiellement sur les zones à fort potentiel agricole, notamment celles irriguées. Ceci confirme le constat avancé par BADRAOUI (2016), à savoir seuls 30 % de la ressource en sol sont connus au Maroc, essentiellement les plaines agricoles, c.-à-d. les zones d'action des offices régionaux de mise en valeur agricole : Loukkous, Basse Moulouya, Gharb, Doukkala, Tadla, Haouz et Souss. La montagne et les zones considérées – à tort – sans valeur ajoutée pour les investissements financiers, n'ont pas été incluses dans les investigations. Les résultats de la collecte de l'information pédologique à l'échelle nationale montrent une disparité flagrante. En effet, pour tout le Haut Atlas central et oriental, un seul profil utilisable (géoréférencé) a été trouvé, alors que pour les plaines, notamment celle du Loukkous, il existe 281 profils. Cette disparité du nombre de profils utilisables a certainement un effet sur les résultats du calcul du stock de COS par zone.

Tableau 1
Surfaces des zones agro-écologiques du Maroc et nombre de profils utilisés pour le calcul du stock du COS par zone.

Zones agro-écologiques	Superficie (ha)	Nombre de profils
Arganeraie	2 961 146	60
Haut Atlas central et oriental	2 536 505	1
Meseta côtière	1 260 920	45
Maâmora et Plateau central	2 391 561	96
Moyen Atlas	1 911 358	37
Plateaux de l'Oriental et vallée de la Moulouya	5 974 999	84
Plateaux et plaines nord atlasiques	3 886 785	188
Rif et ses bordures	3 743 185	281
Pré-Sahara	5 266 904	5
Sahara	41 066 637	
Total	71 000 000	797

Seuls 797 de ces profils sont géoréférencés. Parmi ces derniers, 155 n'étaient pas renseignés sur le type de sol, mais ils ont été utilisés pour le calcul du stock de carbone sur la profondeur 0-30 cm. Pour les profils dont la densité apparente n'a pas été renseignée, une estimation a été faite sur la base des types des sols et de leur texture. Les descriptions de profils et les stocks de carbone ont été réalisés entre 1996 et 2018. Les stocks de COS étant évolutifs, notamment pour les sols cultivés, la réalisation des mesures sur plus de 20 ans joue certainement sur les résultats présentés.

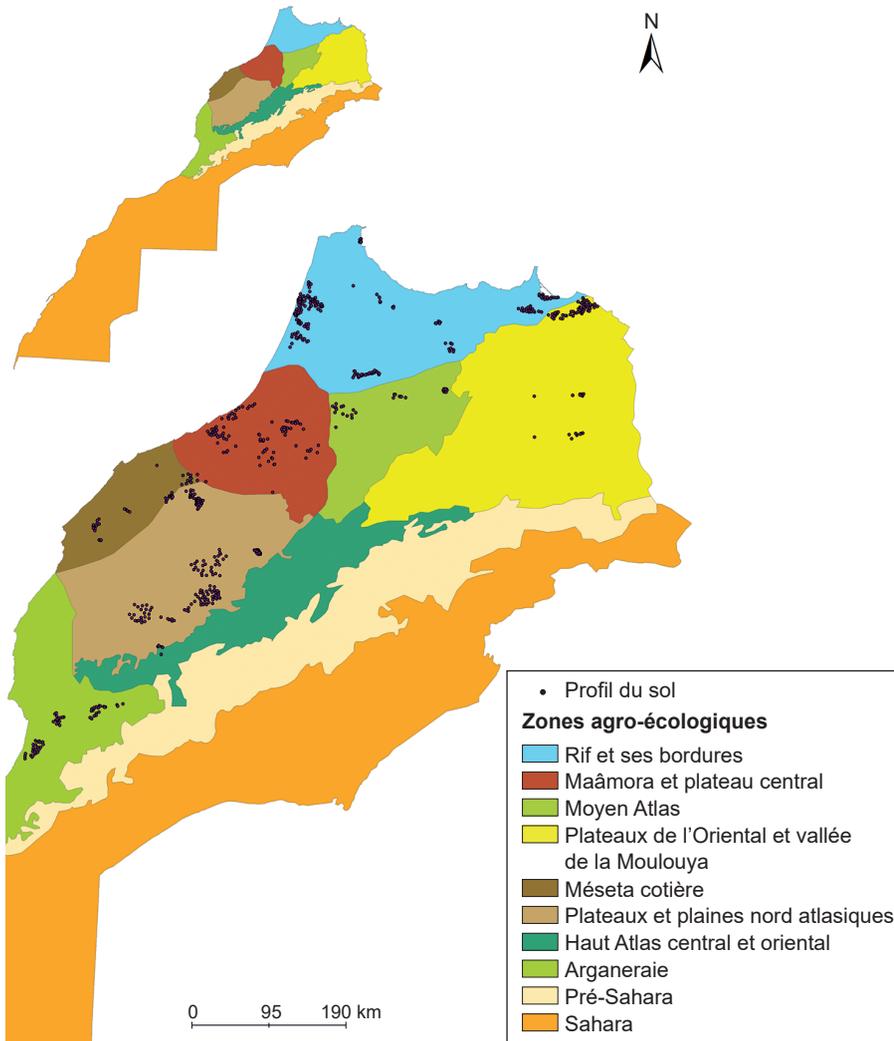


Figure 4
Carte de répartition des profils par zone agro-écologique.

Le stock du COS au Maroc (0-30 cm)

Stock moyen par type de sol

Pour les profils dont la densité apparente n'existait pas, une fonction de pédotransfert a été utilisée. La valeur de densité apparente inconnue a été estimée à partir de valeurs connues d'autres propriétés du sol, notamment la texture. Seuls les stocks de COS sont considérés. Le carbone inorganique n'est pas comptabilisé dans les stocks de carbone présentés dans ce chapitre.

Le calcul des stocks moyens de COS entre 0 et 30 cm par type de sol varient de 46 à 24 Mg C.ha⁻¹ respectivement pour les sols sodiques et les Podzols avec des coefficients de variation entre 8,7 % et 69,9 % (tabl. 2). Ce calcul ne tient pas compte du stock du COS des profils pour lesquels aucun type de sol n'a pu être affecté. Le nombre de profils utilisés dans le calcul a certainement joué sur ces valeurs, notamment pour les sols sodiques. Cependant ces sols ne concernent que peu de surface au Maroc (fig. 2). En ne considérant pas les sols sodiques, on peut dire que les sols isohumiques sont les plus riches en COS, viennent ensuite les sols brunifiés, les Vertisols et les sols calcimagnésiques. Les Podzols ont les stocks de COS les moins élevés, mais sont peu étendus au Maroc (fig. 2). Globalement, ces valeurs de stocks de COS sont du même ordre de grandeur que celles mesurées en Tunisie (NADHEM, 2011 ; tabl. 3). Néanmoins, cette étude montre une grande variabilité des stocks mesurés. Les amplitudes entre les valeurs minimales et maximales sont assez élevées et les coefficients de variation sont souvent supérieurs à 50 %. Ceci pourrait être dû aux disparités du nombre de profils selon leur localisation géographique et de l'usage de ces sols (forêt, agriculture ou parcours). Ainsi, les sols calcimagnésiques du Rif occidental, peuvent avoir des valeurs assez élevées, de l'ordre de 90 Mg C.ha⁻¹ sous forêt et de 29 Mg C.ha⁻¹ sous céréales (SABIR *et al.*, 2004). Dans le Moyen Atlas central, des valeurs très élevées de stocks du COS ont été enregistrées dans les sols fersiallitiques sous des forêts des feuillus (264 Mg C.ha⁻¹ sur 0-30 cm) (EL MDERSSA *et al.*, 2019).

Stock moyen par type d'usage des sols

Pour les profils dont les usages des sols sont connus (n=254), le stock du COS par type d'usage a pu être calculé.

Le tableau 4 montre des valeurs de stocks de COS sous forêts globalement plus faibles que celles trouvées par BOULMANE *et al.* (2010) sous des forêts de chênes verts dans le Moyen Atlas (80 à 56 Mg C.ha⁻¹) et SABIR *et al.* (2004) sous les forêts de chênes-lièges (105 Mg C.ha⁻¹). Elles sont cependant comparables à celles trouvées par MONTÈS (1999) sous des forêts de genévriers rouges dans le Haut Atlas (26 Mg C.ha⁻¹). La variabilité de ces valeurs pourrait être liée à la diversité des sols mais aussi à la diversité des forêts en termes d'âge, de gestion forestière (taillis ou futaies), de densité d'arbres, de type de formation végétale et de leur vigueur. Au Maroc, les forêts sont généralement dégradées. Des études similaires réalisées dans des forêts tempérées non dégradées ont évalué des

Tableau 2
Stocks de carbone organique du sol (0-30 cm) par type de sol au Maroc.

Types de sols	Nombre de profils	Stocks de COS (Mg C.ha ⁻¹)				
		Moy.	Min.	Max.	Écart type	Coefficient de variation (%)
Sols sodiques	2	45,9	43,1	48,8	4,0	8,7
Sols isohumiques	67	42,4	10,9	147,0	25,2	59,5
Sols brunifiés	32	37,4	4,1	92,6	25,9	69,3
Vertisols	51	36,9	4,2	94,3	21,9	59,4
Sols calcimagnésiques	128	36,0	4,9	88,7	24,3	67,5
Sols hydromorphes	44	34,7	5,2	92,6	20,6	59,3
Sols fersiallitiques	62	32,3	0,3	74,3	19,5	60,4
Sols peu évolués	94	28,5	1,5	154,0	22,7	79,6
Sols peu évolués et minéraux bruts	3	25,1	21,1	28,2	3,7	14,6
Podzols	5	23,8	4,7	35,3	16,6	69,9

Tableau 3
Stocks de carbone organique du sol par type de sol (0-30 cm) en Tunisie.

Types de sols	Nombre de profils	Stocks moyens de COS (Mg C.ha ⁻¹)
Sols très peu évolués	10	18
Sols peu évolués	56	32
Sols calcimagnésiques	76	42
Vertisols et paravertisols	14	46
Sols isohumiques	3	37
Sols fersiallitiques	11	72
Podzols	19	62
Sols sodiques	15	28

Source : NADHEM, 2011.

stocks de COS bien plus élevés. Le stock de COS sous cinq types de formations végétales différentes d'une forêt canadienne enregistre des valeurs variant de 61 à 133 Mg C.ha⁻¹ pour les 20 premiers centimètres de sol, la plus élevée étant observée sous des feuillus (LAGACÉ BANVILLE, 2009). Dans des forêts bretonnes (France), pour des couches de sol toutefois plus épaisses (0-90 cm), les stocks sont de 136 à 153 Mg C.ha⁻¹ (EGLIN, 2005 ; LECOINTE *et al.*, 2005). Des études spécifiques des stocks de COS sous différents types de forêts marocaines, selon leur gestion et leur état de dégradation, sont donc nécessaires pour comprendre la variabilité des stocks observée (tabl. 4).

Pour les sols agricoles, les valeurs sont comparables à celles trouvées par SOUDI *et al.* (2000) dans les plaines de Doukkala (36 Mg C.ha⁻¹) ou par SABIR *et al.* (2004) pour le Rif Occidental (46 Mg C.ha⁻¹) sous céréaliculture pour des sols peu évolués et 45 Mg C.ha⁻¹ pour des sols brunifiés.

Pour les sols utilisés pour l'agriculture irriguée et l'arboriculture (4 profils étudiés seulement), les valeurs de stocks sont plus homogènes que pour les usages des sols sous des végétations naturelles (forêts ou matorrals).

Tableau 4
Stocks de carbone organique du sol (0-30 cm) par usage des sols au Maroc.

Usages des sols	Nombre de profils	Stocks de COS (Mg C.ha ⁻¹)				
		Moyenne	Min.	Max.	Écart type	Coefficient de variation
Forêts de feuillus	41	24,2	0,6	92,6	27,0	111,7
Forêts de résineux	24	27,4	6,4	77,1	21,2	77,5
Matorrals	27	33,2	3,5	259,6	49,4	148,6
Agriculture irriguée	21	37,2	4,5	72,9	16,7	44,9
Agriculture pluviale	137	45,9	0,3	222,1	31,2	67,8
Arboriculture	4	38,0	23,6	58,7	14,8	39,0

Spatialisation des stocks de COS

Les stocks de COS sont variables selon la zone agro-écologique (tabl. 5 ; fig. 5). On observe des valeurs assez élevées, de l'ordre de 40 Mg C.ha⁻¹ et plus dans le Rif, Moyen Atlas et Haut Atlas ; des valeurs moyennes, de l'ordre de 30 Mg C.ha⁻¹, dans les zones centrales et semi-arides du Maroc (Maâmora, Meseta côtière) ; des valeurs plus faibles, environ 20 à 25 Mg C.ha⁻¹, dans les zones arides (Oriental, Arganeraie) et des valeurs très faibles (inférieures à 2 Mg C.ha⁻¹) dans les zones sahariennes. Ces résultats sont conformes à ceux émanant d'organismes internationaux, notamment le Centre international de référence et d'information pédologiques¹. Cependant, le stock de COS estimé entre 0-30 cm sur tout le territoire national du Maroc s'élève à environ 938 millions de tonnes (ou Mg), ce qui est nettement plus faible que l'estimation de BERNOUX *et al.* (2006) sur l'ensemble du territoire également, à savoir 1 309 millions de tonnes de carbone. Cette dernière estimation a été obtenue à partir de la carte des sols de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) au 1/5 000 000 et donc à une échelle différente de la nôtre (1/2 000 000). Ceci pourrait être également dû à la différence des approches utilisées.

¹ <https://data.isric.org/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/home>

Tableau 5
Stocks de carbone organique du sol (0-30 cm) par zone agro-écologique du Maroc.

Zones agro-écologiques	Stocks de COS (Mg C.ha ⁻¹)				
	Moyenne	Min.	Max.	Écart type	Coefficient de variation (%)
Rif et ses bordures	41,3	0,3	77,1	15,6	80,6
Plateaux de l'Oriental et vallée de la Moulouya	25,6	7,0	64,5	12,8	49,9
Maâmora et Plateau central	32,2	4,1	101,2	21,7	41,7
Plateaux et Plaines nord-atlasiques	27,5	4,8	259,6	29,8	73,5
Meseta côtière	28,8	4,9	84,4	17,6	42,1
Moyen Atlas	45,5	1,5	81,9	22,6	87,4
Haut Atlas central et oriental	39,6	32,6	32,6	-	-
Arganeraie	21,4	7,0	39,3	8,6	40,3
Pré-Sahara	1,8	1,5	2,4	0,4	23,9
Sahara	1,8	1,5	2,4	0,4	23,9

La carte confirme l'intégration des facteurs écologiques (sol, climat, végétation) dans la constitution du stock de COS (0-30 cm) et donc dans sa répartition spatiale. En effet, les sols relativement profonds des zones subhumides et humides des montagnes rifaines et atlasiques, renferment des stocks de COS relativement élevés, entre 38 et 46 Mg C.ha⁻¹. Les zones semi-arides centrales, constituées essentiellement de plaines et de plateaux, sont dotées de stocks relativement élevés, entre 26 et 38 Mg C.ha⁻¹. Les zones semi-arides, dominées par les arganeraies, ont des stocks moyens, entre 14 et 26 Mg C.ha⁻¹. Les zones arides steppiques ont des stocks faibles, entre 2 et 14 Mg C.ha⁻¹. Enfin, dans les zones désertiques (sahariennes), du fait de la nature des sols et du climat, les stocks sont très faibles, inférieurs à 2 Mg C.ha⁻¹.

Il faut noter que cette carte (fig. 5) est relativement peu précise pour plusieurs raisons :

- l'échelle de 1/2 000 000 ne permet pas de montrer toute la diversité des sols. Plusieurs zones ayant des stocks de COS pourtant différents ont été regroupées dans une même classe cartographique ;
- les profils utilisés pour la cartographie sont très mal répartis sur l'ensemble du territoire national. En effet, dans certaines zones, le nombre de profils est très faible, ce qui n'est pas le cas dans d'autres zones, avec plusieurs centaines de profils ;
- les profils sont souvent regroupés dans la même localité, notamment dans les plaines. L'extrapolation sur les autres zones moins dotées en profils pourrait être erronée ou imprécise ;

– le résultat pour les deux zones présaharienne et saharienne du sud doit être considéré avec prudence. En effet, seuls cinq profils ont été utilisés et ils montrent des valeurs très faibles de carbone en surface (de l'ordre de 0,1 %).

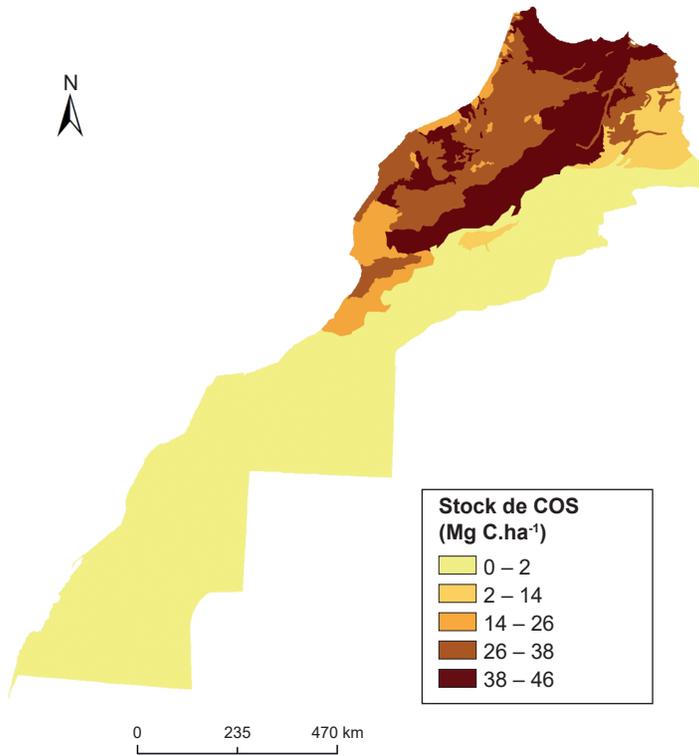


Figure 5
Carte du stock de carbone organique du sol (0-30 cm) au Maroc.

Conclusions

Les stocks de COS au Maroc sont relativement faibles du fait, très probablement, des conditions climatiques de l'Afrique du Nord. Le stock global pour le pays est estimé à 938 millions Mg C, sur une profondeur de 30 cm, en utilisant la carte des unités cartographiques du sol (fig. 2).

Ce résultat doit être considéré comme un ordre de grandeur plutôt que comme une valeur exacte. Dans ce travail, plusieurs profils ne disposaient pas de

densités apparentes ni des taux des éléments grossiers. Ces deux paramètres sont indispensables pour obtenir une estimation précise des stocks de carbone contenu dans les sols. De plus, la faible densité des profils par rapport à la superficie du pays et leur répartition spatiale inégale peuvent induire des erreurs dans l'interprétation des résultats de la carte. De même, le pourcentage de la superficie des types de sols n'était pas bien connu et engendre des erreurs lors de la pondération de stocks moyens de carbone pour le calcul global du stock de carbone des sols du Maroc. Ceci montre les limites liées à l'utilisation de la carte pédologique à une très petite échelle dans l'estimation des stocks de COS.

Ces résultats obtenus à l'échelle globale du pays donnent une idée des stocks de COS entre 0 et 30 cm de profondeur et constituent une première détermination du stock du carbone des sols marocains qui devrait être complétée par des investigations plus approfondies. Par exemple, l'augmentation du nombre de profils permettrait l'utilisation de méthodes géostatistiques et améliorerait ainsi la précision des estimations des stocks de COS. La mesure de la densité apparente devrait être faite d'une manière systématique pour toutes les études pédologiques. Une localisation exacte des profils, via l'utilisation de GPS, est un élément essentiel de la description de ces profils précédant l'analyse spatiale. La standardisation des observations sur le terrain et des analyses pédologiques effectuées au laboratoire est requise. Se référer à plusieurs nomenclatures des sols (les classifications françaises, telles que la classification CPC² ou Référentiel pédologique, la classification de la FAO ou classification internationale WRB et *Soil Taxonomy*) complique l'utilisation des données. À ce propos, il est vivement souhaité que l'Association marocaine des sciences des sols, en étroite collaboration avec les laboratoires d'analyse des sols (publiques et privés), puisse recommander une unification des méthodes de description des profils, d'échantillonnage des sols, d'analyse et d'écriture de l'information pédologique.

La connaissance et la caractérisation de la ressource en sol sont fondamentales pour la gestion durable des terres, que ce soit pour des enjeux environnementaux ou agronomiques. L'ensemble des spécificités des sols du Maroc sont encore peu étudiées. Les stocks de COS des zones montagneuses et désertiques sont peu décrits et les dynamiques du COS des sols calcaires, qui contiennent à la fois du carbone organique et du carbone inorganique, sont mal connues. Il serait souhaitable de renforcer les investigations pédologiques sur ces sols peu décrits.

² La classification des sols CPC² a été mise au point de 1964 à 1967 par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols. Le référentiel pédologique est un travail récent (1992) de la CPC². Le site de l'Association française pour l'étude du sol (AFES) présente les différentes classifications : www.afes.fr/referentiel-pedologique

Bibliographie

AEFCS, 1996

Étude nationale sur les aires protégées du Maroc. Rabat, Maroc, Administration des eaux et forêts et la conservation des sols.

ANCFCC, 1996

Carte des sols du Maroc. Rabat, Maroc, Agence nationale de la conservation foncière du cadastre et de la cartographie.

BADRAOUI M., 2006

« Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc. » In Lhafi A. *et al.* (éd.) : *50 ans de développement humain & perspectives 2025. Cadre naturel, environnement et territoires*, Rabat, Maroc, Cinquantenaire de l'indépendance du Royaume du Maroc-IRES.

BADRAOUI M., 2016

Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc. Rabat, Maroc, Institut national de la recherche agronomique, 27 p.

BADRAOUI M., STITOU M., 2002

« Status of soil survey and soil information system in Morocco. » In Badraoui B. P. (éd.) : *Proceedings de l'atelier sur les bases de données SOTER pour les pays de l'Union du Maghreb Arabe*, Rabat, Maroc, FAP/SNEA : 21-28.

BENABID A., 2000

Flore et écosystème du Maroc: évaluation et préservation de la biodiversité, Paris, France & Rabat, Maroc, Ibis Press & Éditions Kalila Wa Dimna.

BERNOUX M., FELLER C., CERRI C. C., ESCHENBRENNER V., CERRI C. E. P., 2006

« Soil carbon sequestration ». In Roose R. L. E. J. *et al.* (éd.) : *Soil erosion and carbon dynamics*, Boca Raton, Floride, USA, CRC Press : 13-22.

BOULMANE M., MAKHLOUFI M., BOUILLET J.-P., SAINT-ANDRÉ L., SATRANI B., HALIM M., ELANTRY-TAZI S., 2010

Estimation du stock de carbone organique dans la chênaie verte du Moyen Atlas marocain. *Acta Botanica Gallica*, 157 (3) : 451-467.

EGLIN T., 2005

Impact de l'hydromorphie et la topographie sur la variabilité spatiale des stocks de carbone en forêt de Fougères (Ille-et-Vilaine) : étude

à l'échelle des versants. Mémoire de DAA, Institut national agronomique Paris-Grignon.

EL GHARBAOUI A., 1987

« Le milieu physique ». In GEM (éd.) : *Vol. Géogr. Phys., Rabat. La grande encyclopédie du Maroc. Volume 3. Géographie physique et géologie.* Rabat, Maroc-Bergamo, Italie, GEM-Gruppo Walk Over, 231 p.

EL MDERSSA M., BENJELLOUN H., ZAHER H., ZENNOUHI O., NASSIRI L., IBLJBIEN J., 2019

Estimating the sequestration potential of organic carbon in forest soils in the Central Middle Atlas: a tool to fight climate change. *Journal Atlas of Biology*, 2019 : 603-610.

LAGACÉ BANVILLE J., 2009

Caractérisation des stocks de carbone de 5 types de formations végétales dans un secteur du bassin versant de la rivière Eastmain, Baie James. Mémoire de maîtrise, université du Québec, Montréal, Canada, disponible en ligne: <https://archipel.uqam.ca/2264/1/M10921.pdf>.

LAOUIA A., 1990

Le Maroc nord-oriental, relief, modelés et dynamique du calcaire. Oujda, Maroc, Publication du rectorat de l'université Mohammed 1^{er}, 590 p.

LAOUIA A., CHAKER M., NACIRI R., NAFAA R., 1993

L'érosion anthropique en pays méditerranéen : le cas du Maroc septentrional. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 70 (5) : 384-398.

LECOINTE S., NYS C., WALTER C., FORGEARD F., HUET S., RECENA P., FOLLAIN S., 2006

Estimation of carbon stocks in a beech forest (Fougères Forest–W. France): extrapolation from the plots to the whole forest. *Ann. For. Sci.*, 63 (2) : 139-148.

MADREF. 2000

Stratégies d'adaptation à la sécheresse Colloque national de l'agriculture, ministère de l'agriculture, du développement rural et pêches maritimes, Rabat, juillet 2000.

MICHARD A., 1976

Éléments de géologie marocaine. *Notes et Mém. Serv. Carte géol. Maroc*, 252, 408 p.

MONTÈS N., 1999

Potentialités, dynamique et gestion d'une formation arborée à genévrier thurifère (Juniperus thurifera L.) des Atlas marocains : le cas de la vallée de l'Azzaden. Thèse de doctorat, écologie, environnement, université Toulouse le Mirail-Toulouse II, France.

MRABET R., LAHLOU S.,

LE BISSONNAIS Y., DUVAL O., 2002

« Estimation de la stabilité structurale des sols semi-arides marocains. Influence des techniques culturales simplifiées ». In *Land use, erosion & carbon sequestration*, 23-28 novembre 2002. Montpellier, IRD : 405-415.

NADHEM B., 2011

Réchauffement climatique et vulnérabilité des sols méditerranéens : spatialisations et séquestration du carbone en Tunisie. Thèse de doctorat, université de Tunis.

PETIT M., 2003

Qu'est-ce que l'effet de serre ? Ses conséquences sur l'avenir du climat. Paris, Vuibert.

QARRO M., ROOSE E., SABIR M., 2010

« Zones de parcours ». In E. Roose et al. (éd.) : *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes.* Marseille, France, IRD Éditions : 261-275.

QUÉZEL P., 1995

La flore du bassin méditerranéen : origine, mise en place, endémisme. Marseille (1/2). *Ecologia mediterranea, revue d'écologie terrestre et limnique*, 20 (1) : 19-39.

ROOSE E., 2002

Influence de la gestion de la biomasse sur l'érosion et la séquestration du carbone. Résumé des conclusions du colloque « Érosion du carbone », Montpellier, 23-28 sept. 2002. *Bulletin du réseau érosion*, 22 (4) :4-14.

RUELLAN A., 2003

Évaluation du système de recherche scientifique et technique au Maroc : sols et environnement. Rabat : ministère de l'Enseignement supérieur de la formation des cadres et de la recherche scientifique (MESFCRS/SERS).

SABIR M., BARTHÈS B., ROOSE E., 2004

Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols de montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse : Science et Changements planétaires*, 15 (1) : 105-110.

SABIR M., QARRO M., 2017

Assessment of traditional agroforestry practices in Morocco and promotion of their adoption in the Near East and North Africa region. Cairo, Egypt: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Regional Office for the Near East and North Africa FAO-NRE. 152 p.

SAGNO R., 2008

Cartographie des stocks de carbone du sol dans la zone Nord du Maroc. Rabat, Maroc, mémoire de fin d'étude, Enfi.

SOMBROEK W. G.,

NACHTERGAELE F. O., HEBEL A., 1993

Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio*, 22 (7) : 417-426.

SOUFI B., NAAMAN F., CHIANG C. N., 2000

« Problématique de gestion de la matière organique des sols : cas des périmètres irrigués du Tadla et des Doukkala. » In *Intensification agricole et qualité des sols et des eaux*, 2-3 novembre 2000. Rabat, Maroc, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II.

TCHINTCHIN A. Q., 2008

Cartographie des stocks de carbone du sol dans la zone centrale du Maroc. Rabat, Maroc, mémoire de fin d'étude, Enfi.

