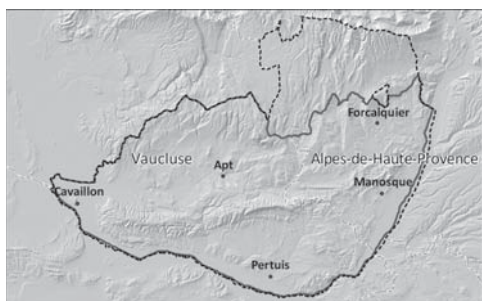




Terrasses d'oliviers abandonnées à Gault (Vaucluse) - Photo Ninon Delcourt.

Empreinte de l'occupation des sols passée sur le fonctionnement actuel des sols forestiers du Luberon : étude de la mésofaune du sol

Ninon DELCOURT¹, Amélie RINGEVAL¹, Hugo SANNIER-ALFONSI¹, Thierry TATONI¹, Catherine REBUFA¹, Nathalie DUPUY¹ & Anne-Marie FARNET-DA SILVA¹

RÉSUMÉ

L'usage des terres et notamment les activités agricoles sont connues comme étant des facteurs influençant fortement le fonctionnement des sols. Cependant les effets des usages antérieurs des sols sont peu documentés en région méditerranéenne où une anthropisation forte s'est instaurée depuis des millénaires. Dès le XIX^e siècle, l'abandon des cultures traditionnelles en France a conduit à une forte expansion forestière. Le Parc naturel régional du Luberon est un bon exemple de cette dynamique de changement d'usage : sur ce territoire coexistent des forêts présentant des continuités temporelles (historique d'usage et âge) différentes. Ces différences pourraient influencer le fonctionnement des sols actuels et notamment les organismes décomposeurs impliqués dans la dégradation de la matière organique. C'est pourquoi cette étude s'intéresse à l'effet des activités agricoles passées (cultures en terrasses) sur la mésofaune (acariens et collemboles) des sols actuels. La mésofaune des sols de forêts anciennes, récentes (développées avant 1958) et très récentes (développées après 1958) a été extraite puis identifiée en laboratoire. Pour tenir compte des contrastes pédoclimatiques et saisonniers, deux étages bioclimatiques (mésoméditerranéen *vs* supraméditerranéen) et deux saisons contrastées (hiver et été) ont été explorés dans cette étude. Un effet négatif de l'activité agricole passée a été observé sur l'abondance totale de la mésofaune du sol, cependant cet effet semble s'estomper plus de 60 ans après l'abandon de l'activité agricole. Les conditions pédoclimatiques plus arides semblent toutefois retarder la résilience des communautés d'acariens oribates dans les sols post-agricoles. Par ailleurs, les activités agricoles passées favorisent la diversité des microbi-détritivores après sécheresse estivale. Cette étude met ainsi en évidence l'importance de prendre en compte l'historique d'usage dans l'évaluation de la vulnérabilité des sols dans un contexte de changement climatique.

Mots-clés: Sols forestiers, terrasses agricoles, mésofaune, historique d'usage des terres.

TITLE

Does past land use influence soil functioning? A case study on soil micro-arthropods in forests of Luberon.

ABSTRACT

Agricultural land-use is known to strongly influence soil functioning. Nevertheless, its long-term effect remains well-documented in the Mediterranean region which is subjected to intense human activities for millennia. Since the 19th century, the abandonment of traditional crops has led to a progressive forest recovery in France. The "Parc Naturel Régional du Luberon" is a good illustration of these land-use changes since forests presenting different ages and land-use history coexist within its territory. These different past land-use thus could influence current soil functioning and notably organisms involved in organic matter decomposition (microorganisms, mesofauna). This study investigates the effect of past land-use activities (agricultural terraces) on mesofauna in current forest soils. In this way, mesofauna from soils sampling in ancient forests, recent forests (developed before 1958) and very recent forests (developed after 1958), were analysed. Two bioclimatic stages (Meso-Mediterranean vs Supra-Mediterranean) were explored to take account of different pedoclimatic conditions, and two contrasted seasons were assessed in this study (winter and summer). A negative effect of past agricultural practice is observed in soils from very recent forests. Nevertheless, this negative effect seems to be disappearing after at least 60 years of reforestation. In this study, the resilience of oribatid mites in post-agricultural soils is delayed by drier climatic conditions. Conversely, past agricultural activities promoted the microbi-detrivore diversity after the summer drought period. Regarding climate change, our results highlight that past land-use could influence soil vulnerability and should be considered as an important ecological proxy.

Keywords: Forest soils, agricultural terraces, stone walls, mesofauna, land-use history

1. Aix Marseille Univ, Avignon Université, CNRS, IRD, IMBE, Marseille, France

INTRODUCTION

Le sol est un compartiment soutenant des processus clés des écosystèmes terrestres impliqués dans les cycles biogéochimiques du carbone et la fertilité des sols (Berg & McLaugherty, 2008). Son fonctionnement est influencé par de nombreux facteurs environnementaux tels que le climat, la végétation ou encore l'usage des terres (Bruand & Tessier, 2000; Delcourt *et al.*, 2019). De précédentes études ont montré que l'usage des terres, et notamment l'usage agricole, modifiait les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (Foley *et al.*, 2005; Delcourt *et al.*, 2019). La majorité de ces publications se sont concentrées sur les effets immédiats de l'activité agricole (au moment où le système est établi) mais d'autres auteurs ont montré que les effets de l'utilisation passée des terres continuent d'influencer le fonctionnement de l'écosystème même après un changement d'usage (Dupouey *et al.*, 2002; De la Peña *et al.*, 2016; Delcourt *et al.*, 2023). Pourtant, peu d'études se sont intéressées aux conséquences à plus long terme, des activités agricoles passées dans un contexte méditerranéen.

La région méditerranéenne est caractérisée par des conditions environnementales particulièrement contraignantes. Des températures élevées sont associées à de faibles précipitations pendant l'été (Larcher, 2000), faisant de la disponibilité en eau la contrainte environnementale la plus importante pour les organismes. Cette région se distingue également par une topographie complexe comportant notamment de fortes pentes ainsi que des sols généralement calcaires, pauvres en matière organique et soumis aux lessivages et à l'érosion (García-Ruiz *et al.*, 2013; Torrent, 2005). Afin de cultiver ces versants malgré ces contraintes multiples, des terrasses agricoles ont été construites, permettant à la fois de fournir des terres arables à une population rurale en expansion jusqu'à la moitié du XIX^e siècle (Tatoni, 1992) et une meilleure stabilité du sol, par conséquent une meilleure rétention de l'eau et de la matière organique (Stanchi *et al.*, 2012). Dès le XIX^e siècle, l'abandon progressif de ces cultures traditionnelles a conduit à une recolonisation des plantes pionnières et par conséquent à une reconquête forestière. Cette expansion des surfaces forestières s'est intensifiée en 1960 et a induit la coexistence de forêts présentant des continuités temporelles (âge, historique d'usage) différentes (Abadie *et al.*, 2017). Le territoire du Parc naturel régional du Luberon (PNRL) est un exemple bien repré-

sentatif de cette dynamique de changement d'usage des terres. En effet, des forêts anciennes y coexistent avec des forêts développées plus tardivement à la suite de l'abandon agricole et dont le fonctionnement a pu être modifié par l'usage agricole antérieur.

De précédentes études ont mis en évidence un effet des activités agricoles passées sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols actuels. Certains auteurs ont mis en évidence un pH plus élevé ainsi que des quantités plus importantes de phosphore dans les sols de forêts post-agricoles (de la Peña *et al.*, 2016). Une biomasse et des activités microbiennes plus faibles ont également été observées dans des sols de forêts post-agricoles (Bastida *et al.*, 2007). Cependant, aucune étude à notre connaissance ne s'est intéressée aux microarthropodes du sol malgré leur rôle dans la dégradation de la matière organique et dans la formation des sols. Par leur déplacement, leur alimentation, leurs excréments et leur mort, les organismes de la mésofaune vont, tout au long de leur vie, modifier physiquement et chimiquement les litières (Gobat *et al.*, 2010). Parmi ces organismes, les acariens oribates et les collembolés réalisent une part importante de la microfragmentation de la litière. Cette fragmentation produit des répercussions sur l'ensemble de la chaîne trophique et notamment sur les microorganismes du sol via la multiplication des surfaces de colonisation mais également la destruction des parois végétales qui rend accessible le contenu cellulaire aux microorganismes (Culliney, 2013). Cette activité dite saprophage a aussi pour effet de déplacer les microorganismes en les transportant sur la cuticule ou dans les fèces des microarthropodes (Renker *et al.*, 2005). Ainsi, si l'effet des activités agricoles antérieures influence les communautés de la mésofaune du sol, l'ensemble du réseau trophique du sol pourrait en être modifié et cela aurait une incidence sur la dégradation de la matière organique et le fonctionnement des sols.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une thèse menée à Aix-Marseille Université au sein de l'Institut méditerranéen de la biodiversité et d'écologie marine et continentale (IMBE) qui porte sur les effets de l'historique d'usage d'un sol sur sa signature chimique et son fonctionnement actuel (en prenant en compte microorganismes et mésofaune) (Delcourt, 2022). L'étude présentée ici se concentre sur les organismes de la mésofaune qui sont, comme mentionné précédemment, des acteurs clés de la décomposition de la matière organique des sols. Quatre questions structurent ainsi ce travail :

- 1) Les communautés de la mésofaune du sol sont-elles influencées par les activités agricoles passées (cultures en terrasses) ?
- 2) Cet effet dépend-t-il de l'âge de la forêt (récente ou très récente) ?
- 3) Le contexte pédoclimatique intervient-il sur l'effet de l'historique des usages ?
- 4) La sensibilité des communautés mésofauniques face aux variations saisonnières (sécheresse estivale) est-elle modifiée par l'historique des usages ?

MÉTHODES

L'étude a été conduite sur le territoire du Parc naturel régional du Luberon et se concentre sur deux des trois étages bioclimatiques qui y sont présents : l'étage méso-méditerranéen situé dans le sud et l'ouest et l'étage supra-méditerranéen situé au nord-est (figure 1). L'étage méso-méditerranéen se caractérise par un hiver plus doux et une sécheresse estivale plus intense que l'étage supra-méditerranéen. Les variables des données climatiques de chaque étage bioclimatique sont résumées dans le tableau 1. Les

Tableau 1 :
Variables bioclimatiques issues des données Wordclim (<https://www.worldclim.org>) sur la période 1970-2000, pour les deux étages bioclimatiques considérés (méso-méditerranéen et supra-méditerranéen).

	Étage méso-méditerranéen	Étage supra-méditerranéen
Précipitations annuelles (mm)	695	772
Précipitations du mois le plus sec (mm)	25	32
Précipitations du mois le plus humide (mm)	86	88
Température annuelle moyenne (°C)	12	11
Température minimum du mois le plus froid (°C) : a	0	-1
Température maximum du mois le plus chaud (°C) : b	27	25
Variation annuelle de la température (°C) : a - b	27	26

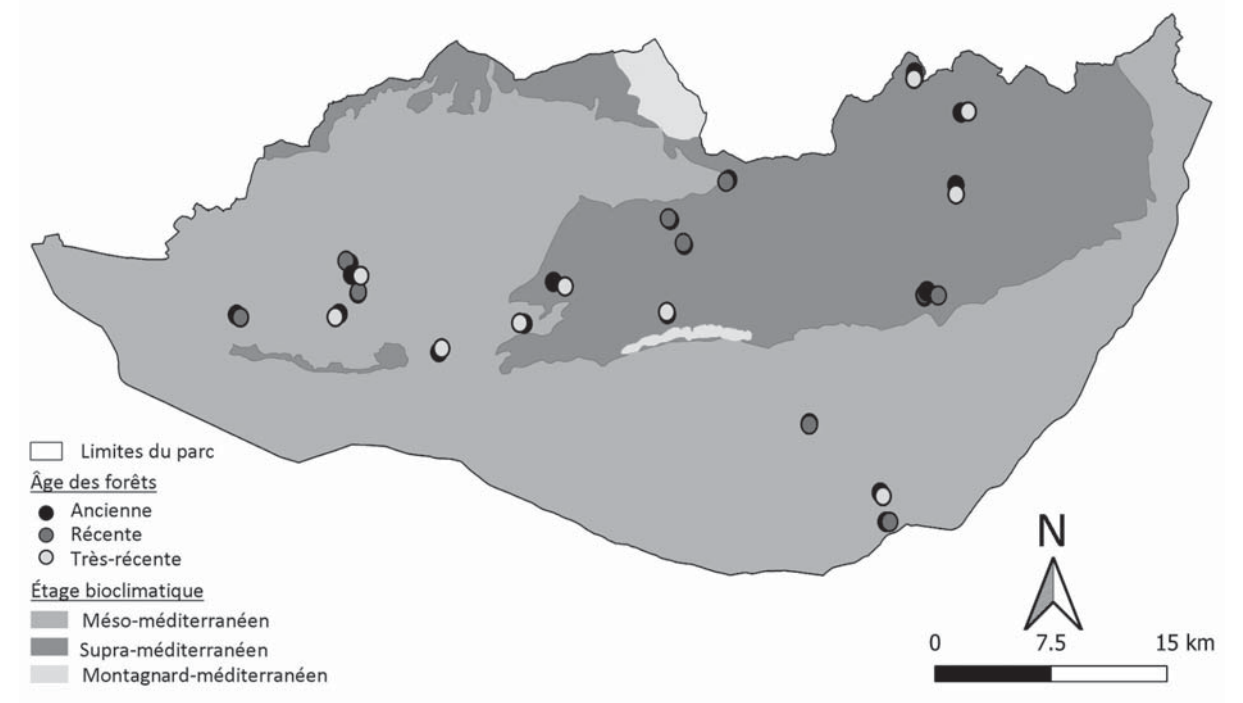


Fig. 1 : Délimitation des étages bioclimatiques du Parc naturel régional du Luberon et localisation des sites étudiés. Source Parc du Luberon

parcelles forestières sélectionnées présentent des peuplements de *Quercus pubescens* Will. comme espèce dominante (à hauteur d'au moins 80% du recouvrement forestier). Cette dernière a été choisie car elle est présente sur l'ensemble du territoire du PNRL et correspond à une espèce de fin de succession.

Détermination de l'historique d'usage

Sur la base de précédents travaux (Abadie *et al.*, 2018), deux outils de cartographie ont permis de déterminer l'usage historique des parcelles à deux dates différentes :

- **1860** : Les cartes d'État-Major (1858-1861) numérisées dans les travaux d'Abadie *et al.* (2018)

- **1958** : Les orthophotographies (photographies aériennes) prises entre 1953 et 1958 et numérisées dans l'étude d'Abadie *et al.* (2018) à partir desquelles l'usage des terres a pu être interprétée pour chaque parcelle.

Ainsi, une forêt est dite ancienne si la parcelle était déjà boisée en 1860 et en 1958, récente si la parcelle était une

parcelle agricole en 1860 mais qu'elle était boisée ou en cours de reboisement en 1958, très récente lorsque la parcelle était une parcelle agricole en 1860 ainsi qu'en 1958 (figure 2). Enfin, pour confirmer l'historique d'usage défini par les outils de cartographie, des terrasses de culture devaient être présentes sur les parcelles de forêts post-agricoles (récentes et très récentes) et absentes sur les parcelles de forêts anciennes. Afin de limiter l'effet microclimatique, un fonctionnement par couple de parcelle a été choisi : une forêt ancienne était toujours associée à une forêt récente ou à une forêt très récente. Pour chaque étage bioclimatique, cinq couples de forêts anciennes *vs* récentes et cinq couples de forêts anciennes *vs* très récentes ont donc été retenus.

Échantillonnage

Sur chaque parcelle, quatre prélèvements ont été effectués de façon aléatoire puis regroupés pour former un seul échantillon. Les échantillons ont été conservés 3 jours maximum à 4°C avant de procéder à l'extraction de la

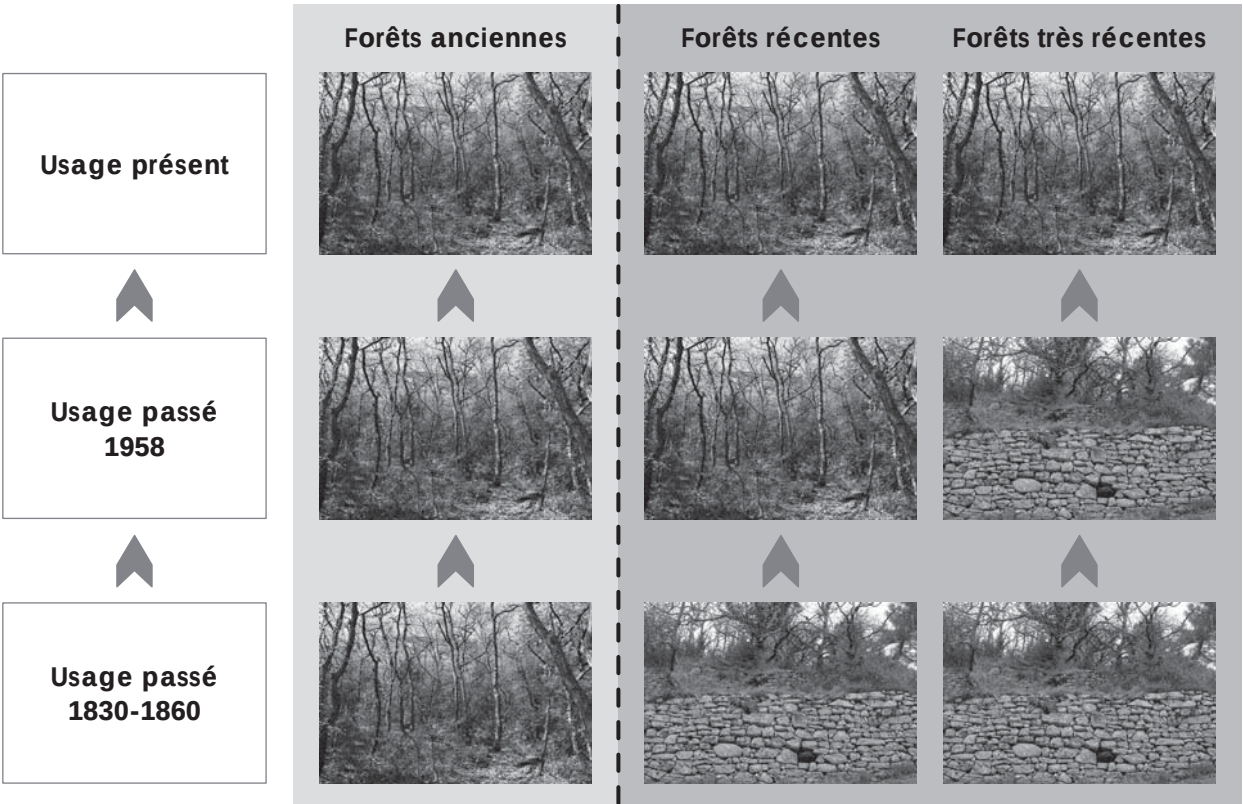


Fig. 2 : Schéma conceptuel : historique des usages pour chaque catégorie de forêts.

mésafaune. Les quarante placettes ont été échantillonnées une première fois en février 2019 puis en septembre 2019 à l'issue d'une sécheresse estivale de 3 mois et avant les premières pluies d'automne. Quarante-vingts échantillons au total ont ainsi été prélevés.

Extraction et identification de la mésofaune du sol

La mésofaune a été extraite des sols frais en utilisant l'appareil de Berlese-Tullgren (figure 3) pendant dix jours (Berlèse, 1905 ; Tullgren, 1918). Les arthropodes recueillis ont été stockés dans l'éthanol à 80% puis comptés et identifiés à l'aide d'une loupe binoculaire. Les sols ont ensuite été séchés puis pesés pour ramener le nombre d'individus à un poids sec de sol. L'identification n'avait pas pour but d'aller jusqu'à l'espèce mais jusqu'à un niveau suffisant pour déterminer le rôle fonctionnel de l'organisme. Les collemboles (*Collembola*) ont été identifiés au niveau de l'ordre (*Entomobryomorpha*, *Neelipleona*, *Poduromorpha* et *Symphyleona*). Les acariens ont été identifiés au niveau du sous-ordre pour les oribates (*Oribatida*) et les mésostigmatés (*Mesostigmata*, exceptés les gamasides uropodes). Les individus appartenant au sous-ordre des prostigmatés (*Prostigmata*) ont été identifiés au niveau de la famille pour

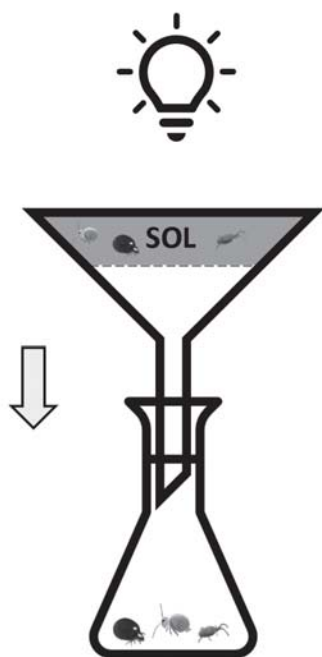


Fig. 3 : Schéma de la méthode d'extraction de la mésofaune avec la méthode de l'appareil de Berlese-Tullgren.

les Bdellidae, Eupodidae, Rhagidiidae, Cunaxidae, Anystidae, Caeculidae (figure 4.a). Les collemboles (figure 4.b et c) et les oribates ont été regroupés en tant que microbi-détritivores, alors que les groupes Mesostigmata, Bdellidae, Eupodidae, Caeculidae, Rhagidiidae, Anystidae et Cunaxidae ont été considérés comme prédateurs (Santonja *et*



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 : Exemples d'organismes de la mésofaune de sol : acarien prédateur de la famille des Caeculidae (a) et collemboles (microbi-détritivores) de l'ordre des Symphyleona (b) et Entomobryomorpha (c) - © Nicolas Henon

al., 2017). Les autres acariens ont été regroupés dans la catégorie « Autre » dont le rôle fonctionnel est inconnu ou variable et ont été pris en compte lors du calcul de l'abondance totale. La diversité a été calculée en utilisant l'indice de Shannon-Weaver. Trois indices ont été calculés : la diversité totale comprenant tous les groupes cités précédemment (excepté le groupe « Autre »), la diversité des prédateurs et la diversité des détritivores.

Propriétés physico-chimiques du sol

Le pourcentage de carbonate de calcium (CaCO_3) de chaque échantillon a été déterminé en utilisant un calcimètre (FOGII Digital Soil Calcimeter). La mesure du taux de CaCO_3 est basée sur l'analyse volumétrique du dioxyde de carbone (CO_2) émis lors d'un traitement à l'acide chlorhydrique (HCl 6N).

Analyses statistiques

Les effets de l'historique d'usage, des conditions climatiques, de la saison et de l'interaction de ces différents facteurs sur la mésofaune du sol ainsi que sur les propriétés physico-chimiques ont été analysés à l'aide d'un modèle linéaire à effet mixte ($P < 0,05$). Ce modèle nous a permis de prendre en compte les effets des microclimats en lien avec la proximité géographique des différents couples de placettes (en tant que facteur aléatoire dans le modèle). Des tests de comparaisons multiples des moyennes HSD de Tuckey ($P < 0,01$) ont été réalisés en complément.

Toutes ces analyses ont été effectuées sur le logiciel R version 3.4.2, avec le package « nlme ». Les conditions requises de normalité et d'hétérogénéité de la variance ont été vérifiées et lorsque cela était nécessaire, les données ont subi une transformation logarithmique en base 10 ou racine carrée pour rencontrer ces conditions.

RÉSULTATS

Un total de 12 497 individus a été compté et identifié au cours de ces deux campagnes.

Effet des activités agricoles antérieures

1- Mésofaune du sol

Une abondance totale d'organismes plus importante a été observée en forêts anciennes par rapport aux forêts très récentes (figure 5.a). L'abondance des prédateurs et celle des détritivores suivaient toutes deux cette même tendance (figure 5.b). La diversité des prédateurs de la mésofaune du sol était également plus importante en forêts anciennes qu'en forêts très récentes (figure 5.c). Ainsi, l'usage agricole antérieur affecte négativement la biologie des sols des forêts post-agricoles dont l'abandon est survenu il y a moins de 60 ans. Il est intéressant de noter que pour les sols de forêts récentes, l'abondance et la diversité des organismes ne différaient pas des deux autres âges de forêts (figure 5).

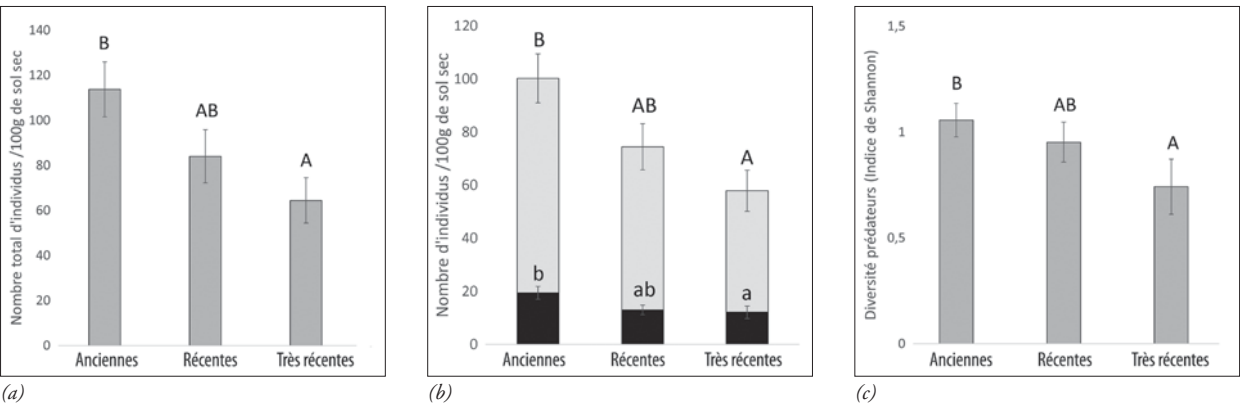


Fig. 5 : Abondance totale (a), abondance des prédateurs et des détritivores (b) et diversité des prédateurs (c) en fonction de l'âge de la forêt : Anciennes, Récentes, Très récentes.

Les moyennes ($\pm$ erreur standard, $N = 80$) associées à des lettres différentes sont significativement différentes ($A < B$, Tukey test, $P < 0,1$).

■ Détritivores
■ Prédateurs

Nos résultats ont également démontré que l'effet de l'historique d'usage pouvait dépendre des conditions pédoclimatiques. En effet, l'effet des activités agricoles passées sur l'abondance des acariens oribates (*Oribatida*) n'était pas le même selon l'étage bioclimatique considéré (figure 6). Concernant l'étage supra-méditerranéen, l'abondance des acariens oribates était plus élevée en forêts anciennes et récentes qu'en forêts très récentes. En ce qui concerne l'étage méso-méditerranéen, l'abondance des acariens oribates était plus élevée en forêts anciennes qu'en forêts récentes tandis qu'aucune différence n'était observée entre forêts anciennes et forêts très récentes.

Il est intéressant de noter que nos résultats ont également mis en lumière l'influence de l'historique d'usage sur la réponse des organismes face à la sécheresse estivale. Ainsi, nos résultats ont montré une diversité plus importante en forêts très récentes pour les sols prélevés en été, après une sécheresse estivale de trois mois, tandis qu'aucune différence n'a été observée pour les sols prélevés en hiver (figure 7).

2- Données physico-chimiques et topographiques

Nos résultats ont montré un nombre de tiges par hectare (tige/ha) plus important en forêts anciennes et récentes qu'en forêts très récentes (figure 8).

L'effet de l'historique d'usage sur les taux de CaCO_3 des sols dépendait du climat. Aucun effet de l'historique des usages n'a pu être mis en évidence pour les sols de l'étage

bioclimatique méso-méditerranéen qui possédaient par ailleurs des taux de CaCO_3 bien plus élevés que les sols de l'étage supra-méditerranéen (+43%). Pour l'étage supra-méditerranéen, les sols de forêts très récentes présentaient des taux de CaCO_3 plus élevés que les sols de forêts récentes et anciennes (figure 9).

DISCUSSION

Effet des activités agricoles antérieures

Nos résultats ont démontré que les cultures en terrasses présentes par le passé avaient un effet négatif important sur la mésofaune du sol. Le groupe fonctionnel le plus impacté a été celui des prédateurs car l'activité agricole passée affectait à la fois leur abondance et leur diversité. La baisse de diversité des prédateurs pourrait davantage fragiliser ces populations et avoir des conséquences sur l'ensemble de la chaîne trophique. Les prédateurs jouent en effet un rôle important de régulation des microbi-détritivores (Gobat *et al.*, 2010). Cependant, cet effet négatif n'a été observable que dans le cas d'une activité agricole ayant cessé il y a moins de 60 ans. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'à partir du milieu du XX^e siècle, afin d'optimiser la production agricole, les usages sont devenus de plus en plus intenses en termes d'utilisation d'intrants, ce qui a pu modifier davantage les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols de forêts ayant subi une activité agricole plus récente (Boulaine, 1995, Beaumelle *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2022). La

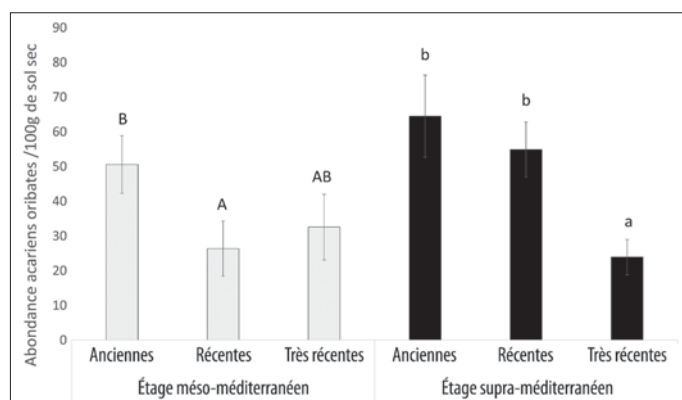


Fig. 6 : Abondance des acariens oribates en fonction de l'âge de la forêt (Anciennes, Récentes, Très récentes) et de l'étage bioclimatique (méso-méditerranéen et supra-méditerranéen).

Les moyennes ($\pm$ erreur standard, N = 80) associées à des lettres différentes sont significativement différentes (a<b, A<B, Tukey test, P<0,1).

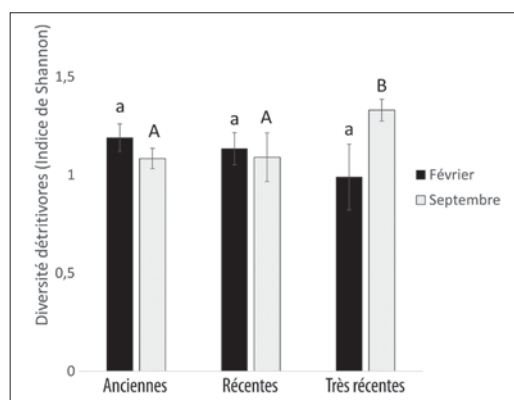
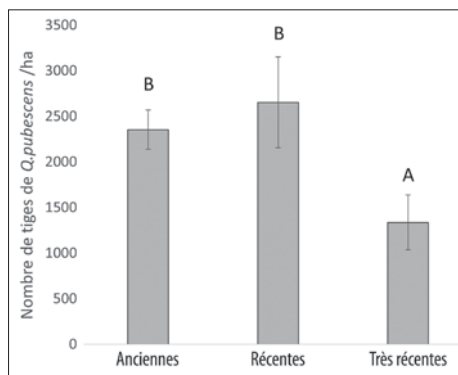
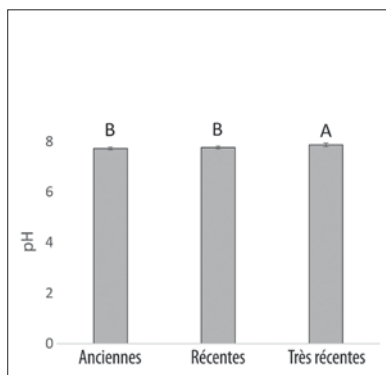


Fig. 7 : Diversité des détritivores en fonction de l'âge de la forêt (Anciennes, Récentes, Très récentes) et de la saison (hiver et été).

Les moyennes ($\pm$ erreur standard, N = 80) associées à des lettres différentes sont significativement différentes (a<b, A<B, Tukey test, P<0,1).



(8a)



(8b)

Fig. 8 : Nombre de tiges par hectare de l'âge des forêts : Anciennes, Récentes, Très récentes. .

Les moyennes ($\pm$ erreur standard, N = 80) associées à des lettres différentes sont significativement différentes (A<B, Tukey test, P<0,1).

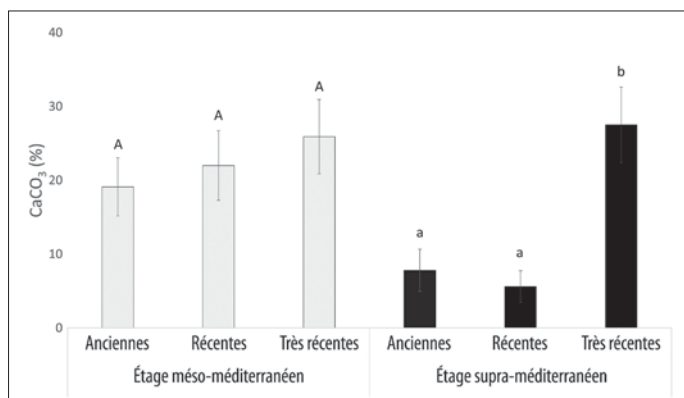


Fig. 9 : Taux de CaCO_3 (%) dans les sols en fonction de l'âge de la forêt (Anciennes, Récentes, Très récentes) et de l'étage bioclimatique (méso-méditerranéen et supra-méditerranéen).

Les moyennes ($\pm$ erreur standard, N = 80) associées à des lettres différentes sont significativement différentes (a<b, A<B, Tukey test, P<0,1).

plupart de ces terrasses semblent avoir été utilisées pour la culture de l'olivier, d'anciens oliviers étaient en effet encore observables dans certaines forêts post-agricoles, notamment dans les forêts très récentes. Des travaux d'archive pour connaître plus précisément le type de culture et les pratiques mises en place par le passé sur les différentes terrasses agricoles pourraient permettre de mieux comprendre les effets observés. De plus, le nombre plus faible de tige/ha de l'espèce forestière dominante *Q. pubescens* indique un milieu plus ouvert. Ainsi, les forêts très récentes présentent une densité de végétation plus faible et donc une quantité moins importante de matière organique disponible au sol pour ces organismes, un ensoleillement plus intense augmentant les stress hydriques et thermiques auxquels la mésofaune est sensible.

Il est également intéressant de noter que les sols des forêts récentes semblaient présenter un état intermédiaire entre les sols de forêts anciennes et les sols de forêts très récentes à la fois en termes d'abondance et de diversité des organismes mais également en termes de propriétés physico-chimiques. Ainsi, ces résultats mettent également en évidence une forme de résilience des propriétés du sol 60 ans après l'abandon agricole, rejoignant les observations faites par de précédentes études (Jangid *et al.*, 2011).

Le climat et la sécheresse estivale influencent l'effet de l'historique d'usage

À la différence des autres organismes, l'effet de l'activité agricole passée sur les acariens oribates (Oribatida)

dépendait de l'étage bioclimatique considéré. A l'étage bioclimatique supra-méditerranéen, une abondance plus faible d'acariens oribates a été observée en forêts très récentes tandis que pour l'étage méso-méditerranéen, une abondance plus faible d'acariens oribates a été observée en forêts récentes. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que la régénération forestière est sous l'influence des conditions climatiques notamment *via* le contrôle des processus d'érosion qui interviennent après l'abandon des terrasses agricoles (Lesschen *et al.*, 2008; Ferreira *et al.*, 2022). Les pluies sont plus abondantes dans l'étage supra-méditerranéen ce qui implique davantage de lessivage et d'érosion au niveau des sols. De plus, les forêts très récentes sont des milieux plus ouverts et donc plus exposés à l'érosion (Abadie *et al.*, 2020; Ackerman *et al.*, 2019). Ainsi, les forêts très récentes en étage supra-méditerranéen présentent moins de matière organique et plus de CaCO_3 . Cependant, ce climat plus humide est également favorable à la recolonisation rapide du milieu par la végétation. Ainsi, plus de 60 ans après l'abandon agricole, le milieu se referme et la végétation protège le sol de l'érosion ce qui permet l'accumulation de matière organique et donc une plus forte abondance en détritivores. C'est également pourquoi les taux de CaCO_3 observés dans les sols des forêts récentes n'étaient pas différents de ceux observés dans les sols de forêts anciennes dans cette étude.

Les sols de l'étage méso-méditerranéen sont plus calcaires et moins développés, comme le montrent les taux plus élevés de CaCO_3 observés pour cet étage bioclimatique et l'absence de différences des propriétés physico-chimiques. De plus, le climat plus aride de l'étage méso-méditerranéen a pu, dans un premier temps, ralentir le processus d'érosion ce qui peut aussi expliquer qu'aucune différence de propriétés physico-chimiques n'ait été observée pour les sols des forêts post-agricoles de cet étage bioclimatique moins de 60 ans après l'abandon agricole. Cependant, ces conditions pédoclimatiques drastiques ont également retardé la recolonisation du milieu par la végétation. Sans cette reprise végétale dense, l'érosion du sol a perduré au-delà de 60 ans après l'abandon agricole et a empêché l'accumulation de la matière organique dans les sols (Ackerman *et al.*, 2019; Lesschen *et al.*, 2008). Ce phénomène est donc probablement à l'origine de l'abondance plus faible des acariens oribates observée plus de 60 ans après l'abandon agricole dans les sols de forêts de l'étage méso-méditerranéen de cette étude. Or, les acariens oribates sont des détritivores particulièrement abondants dans la mésosfaune du sol : dans notre étude, ils

représentaient 52% du total des individus identifiés. Une baisse de l'abondance de ces organismes pourrait particulièrement affecter les activités de micro-fragmentation et avoir des effets en cascade sur le reste de la chaîne trophique du sol et donc sur la décomposition de la matière organique.

Nos résultats ont également montré que la saisonnalité a influencé l'effet de l'historique d'usage sur la mésofaune du sol. L'effet de l'activité agricole passée sur les organismes microbi-détritivores n'a été en effet observable qu'à l'issue de la période estivale (en septembre). À l'inverse de nos précédents résultats, l'effet de l'activité agricole antérieure exerce une influence positive sur la diversité des microbi-détritivores. Ceci peut s'expliquer par le fait que les forêts très récentes sont des milieux plus ouverts que les forêts anciennes (Abadie *et al.*, 2020). Or, d'autres études ont montré que les milieux forestiers plus ouverts étaient associés à une diversité d'organismes plus importante dans les sols (Vanbergen *et al.*, 2007). Cette diversité a ainsi pu sélectionner des organismes plus résistants face à des contraintes environnementales telles que la sécheresse estivale.

Vulnérabilité des sols et réchauffement climatique en Méditerranée

Les scénarios proposés par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) prédisent une sécheresse estivale plus importante et prolongée en région méditerranéenne avec des précipitations plus rares mais plus intenses (IPCC, 2007). Compte tenu des résultats de cette étude, les modifications des conditions climatiques pourraient entraîner des conséquences négatives sur la résilience des sols post-agricoles en retardant la recolonisation du milieu par une végétation dense et en accélérant l'érosion et le lessivage des sols. Dans des régions soumises à un climat aride, de précédentes études ont en effet mis en évidence des phénomènes d'érosion particulièrement importants en l'absence d'une reprise végétale dense (Ackerman *et al.*, 2019). La végétation spontanée, ligneuse en particulier, peut néanmoins jouer un rôle très ambivalent soit de maintien du sol en se substituant ainsi aux murs de soutènement, soit de déstabilisation de certains murs. Ainsi, des efforts de conservation des structures en terrasses actuelles pourraient devenir nécessaires pour préserver et stabiliser les sols post-agricoles en région méditerranéenne dans les années à venir.

CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence un impact négatif des activités agricoles antérieures sur les communautés de la mésofaune du sol. Cependant, cet effet s'est estompé plus de 60 ans après l'abandon agricole. Le climat méditerranéen *via* le contrôle des processus d'érosion du sol et de revégétalisation des milieux modifie l'effet de l'historique des usages sur certains organismes de la mésofaune ainsi que sur certaines propriétés physico-chimiques du sol. Nos résultats ont notamment montré que des conditions pédoclimatiques plus arides pouvaient retarder la résilience des communautés d'acariens oribatés, ce qui pourrait impacter négativement les cycles de dégradation de la matière organique. Ces terrasses, présentant par ailleurs un fort intérêt patrimonial et culturel, pourraient ainsi faciliter ces processus de revégétalisation en limitant les phénomènes d'érosion des sols. D'autre part, l'activité agricole passée favorisait la diversité des microbi-détritivores en période de sécheresse estivale. Ainsi, l'historique des usages des sols est un facteur important à prendre en compte pour évaluer la vulnérabilité des sols actuels, notamment dans un contexte de changement climatique.

Bibliographie

ABADIE Juliet, DUPOUEY Jean-Luc, AVON Catherine, ROCHER Xavier, TATONI Thierry & BERGES Laurent, 2017. Forest recovery since 1860 in a Mediterranean region: drivers and implications for land use and land cover spatial distribution. *Landscape Ecology*. N°33, pp.289-305.

ABADIE Juliet, AVON Catherine, DUPOUEY Jean-Luc, LOPEZ Jean-Michel, TATONI Thierry & BERGES Laurent, 2018. Land use legacies on forest understory vegetation and soils in the Mediterranean region: Should we use historical maps or in situ land use remnants? *Forest Ecology and Management*. N°427, pp. 17-25.

ABADIE Juliet, DUPOUEY Jean-Luc, SALVAUDON Aline, GACHET Sophie, VIDEAU Noémie, AVON Catherine, DUMONT Jérôme, TATONI Thierry & BERGES Laurent, 2020. Historical ecology of Mediterranean forests: Land use legacies on current understory plants differ with time since abandonment and former agricultural use. *Journal of Vegetation Science*. Vol. 32, n°1, pp.1-13.

ACKERMAN Oren, ZHEVELEV Helena M. & SVORAY Tal, 2019. Agricultural systems and terrace pattern distribution and preservation along climatic gradient: From sub-humid mediterranean to arid conditions. *Quaternary International*. N°502, pp. 319-326.

BASTIDA Felipe, MORENO Jose Luis, HERNANDEZ Teresa & GARCIA Carlos, 2007. The long-term effects of the management of a forest soil on its carbon content, microbial biomass and activity under a semi-arid climate. *Applied Soil Ecology*. N° 37, pp. 53-62.

BEAUMELLE Léa, TISON Léa, EISEINHAUER Nico, HINES Jes, MALLADI Sandhya, PELOSI Céline, THOUVENOT Lise & PHILLIPS Helen R. P., 2023. Pesticide effects on soil fauna communities- A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*. N°60, pp. 1239-1253.

BERG Björn & MCCLAUGHERTY Charles, 2008. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Second Edition, 321p.

BERLESE Antonio, 1905. Apparecchio per raccogliere presto ed in gran numero piccoli arthropodi. *Redia*. N° 2, pp. 85-89.

BOULAIN Jean, 1995. Quatre siècles de fertilisation, seconde partie. *Etude et gestion des sols*. Vol. 2, n°4, pp. 219-226.

BRUAND Ary & TESSIER Daniel, 2000. Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: significance of parent material and soil history. *European Journal of Soil Science*. N°51, pp. 679-688.

CULLINEY Thomas W., 2013. Role of Arthropods in Maintaining Soil Fertility. *Agriculture*. N°3, pp. 629–659.

DE LA PEÑA Edouardo, BAETEN Lander, STEEL Hanne, VIAENE Nicole, DE SUTTER Nancy, DE SCHRIJVER An & VERHEYEN Kris, 2016. Beyond plant–soil feedbacks: mechanisms driving plant community shifts due to land-use legacies in post-agricultural forests. *Functional Ecology*. N°30, pp. 1073-1085.

DELCOURT Ninon, REBUFA Catherine, DUPUY Nathalie, BOUKHOUD Nathalie, BRUNEL Caroline, ABADIE Juliet, GIFFARD Isabelle & FARNET-DA SILVA Anne-Marie, 2019. Infrared spectroscopy as a useful tool to predict land use depending on Mediterranean contrasted climate conditions: A case study on soils from olive-orchards and forests. *Science of The Total Environment*. N°686, pp. 179–190.

DELCOURT Ninon, 2022. *Modélisation des signatures chimiques des sols en fonction de l'historique de leurs usages : la mémoire du sol au service de l'écologie actuelle*. Thèse de doctorat. Aix-Marseille Université, 223 p.

DELCOURT Ninon, DUPUY Nathalie, REBUFA Catherine, ABADIE Juliet, FOLI Lisa & FARNET-DA SILVA Anne-Marie, 2023. Microbial functioning in Mediterranean forest soils : Does land use legacy matter? *Land Degradation & Development*. N°34, pp. 3932-3942.

DUPOUEY Jean-Luc, DAMBRINE Etienne, LAFFITE Jean-Denis & MOARES C., 2002. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, Vol. 83, N°11, pp. 2978-2984.

FERREIRA Carla S.S., SEIFOLLAHI-AGHMIUNI Samaneh, DESTOUNI Georgia, GHAJARNIA Navid & KALANTARI Zahra, 2022. Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences. *Science of The Total Environment*. N°805, 150106.

FOLEY Jonathan A., DEFRIES Ruth, ASNER Gregory P., BARFORD Carol, BONAN Gordon, CARPENTER Stephen R., CHAPIN F. Stuart, COE Michael T., DAILY Gretchen C., GIBBS Holly K., HELKOWSKI Joseph H., HOLLOWAY Tracey, HOWARD Erica A., KUCHARIK Christopher J., MONFREDA Chad, PATZ Jonathan A., PRENTICE I. Colin, RAMANKUTTY Navin & SNYDER Peter K., 2005. Global consequences of land use. *Science*. N°309, pp. 570–574.

GARCÍA-RUIZ José M., NADAL-ROMERO Estela, LANA-RENAULT Noemí & BEGUERÍA Santiago, 2013. Erosion in Mediterranean landscapes: Changes and future challenges. *Geomorphology*. N°198, pp. 20-36.

GOBAT Jean-Michel, ARAGNO Michel & MATTHEY Willy, 2010. *Le sol vivant : bases de pédologie, biologie des sols*. PPUR Presses polytechniques, 817p.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability *In Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 23-78.

JANGID Kamlesh, WILLIAMS Mark A., FRANZLUEBBERS Alan J., SCHMIDT Thomas M., COLEMAN David C. & WHITMAN William B., 2011. Land-use history has a stronger impact on soil microbial community composition than aboveground vegetation and soil properties. *Soil Biology and Biochemistry*. N°43, pp. 2184-2193.

LARCHER Walter, 2000. Temperature stress and survival ability of Mediterranean sclerophyllous plants. *Plant Biosystems*. N° 134, pp. 279-295.

LESSCHEN Jan Peter, CAMMERAAT Erik L.H. & NIEMAN T., 2008. Erosion and terrace failure due to agricultural land abandonment in a semi-arid environment. *Earth Surface Processes and Landforms*. N°33, pp. 1574-1584.

RENKER Carsten, OTTO Peter, SCHNEIDER Katja, ZIMDARS Bettina, MARAUN Mark & BUCOT François, 2005. Oribatid mites as potential vectors for soil microfungi: study of mite-associated fungal species. *Microbial Ecology*. N°50, pp. 518-528.

SANTONJA Mathieu, FERNANDEZ Catherine, PROFFIT Magali, GERS Charles, GAUQUELIN Thierry, REITER Ilja M., CRAMER Wolfgang & BALDY Virginie, 2017. Plant litter mixture partly mitigates the negative effects of extended drought on soil biota and litter decomposition in a Mediterranean oak forest. *Journal of Ecology*. N°105, pp. 801-815.

STANCHI Silvia, FREPPAZ Michele, AGNELLI Alberto, REINSCH T. & ZANINI Ermanno, 2012. Properties, best management practices and conservation of terraced soils in Southern Europe (from Mediterranean areas to the Alps): A review. *Quaternary International*. N° 265, pp. 90-100.

TATONI Thierry, 1992. *Evolution post-culturale des agrosystèmes de terrasses en Provence calcaire. Phytoécologie et impact humain*. Thèse de doctorat, Université de Provence, Marseille, 192 p.

TORRENT José, 2005. Mediterranean soils. In HILLEL Daniel (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Academic Press, Cambridge (USA), pp. 418-427.

TULLGREN Albert, 1918. Ein sehr einfacher Ausleseapparat für terricoles Tierfaunen. *Zeischrift für angewandte Entomologie*. Vol. 4, pp. 149-150.

VANBERGEN Adam J., WATT Allan D., MITCHELL Ruth, TRUSCOTT Anne-Marie, PALMER Stephen C.F., IVITS Eva, EGGLETON Paul, JONES T. Hefin & SOUSA José Paulo, 2007. Scale-specific correlations between habitat heterogeneity and soil fauna diversity along a landscape structure gradient. *Oecologia*. N°153, pp. 713-725.

Glossaire

Collemboles

Petits arthropodes, souvent sauteurs, anciennement considérés comme des insectes primitifs, placés aujourd'hui dans une classe à part. Très abondants et variés dans les sols où ils jouent un rôle important dans la pédogenèse.

Cuticule

Enveloppe dure externe d'un arthropode, constituant son exosquelette.

Mésofaune

Ensemble des animaux de taille moyenne, visibles à la loupe (0,2 à 4 mm).

Microarthropode

Organisme appartenant au groupe des arthropodes (caractérisé par un exosquelette rigide et des articulations mobiles), de très petite taille, généralement moins de 1 mm.

Oribates

Acariens mesurant 0,2 à 1,4 mm vivant en grand nombre dans la litière végétale ou le sol, ils jouent un rôle essentiel dans la pédogenèse.

Pédogenèse

Ensemble de processus physico-chimiques et biologiques qui conduisent à la formation et l'évolution du sol vivant.

Réseau trophique

Groupe de chaînes alimentaires interconnectées.