

« *L'essentiel est invisible pour les yeux* » (Saint-Exupéry)

Application à la biodiversité des sols forestiers

par Michel VENNETIER

Habitué à voir et à mesurer la biodiversité à travers quelques espèces phares ou emblématiques, nous oublions que l'essentiel de la biodiversité est ailleurs, cachée sur ou dans le sol.

Cet article nous entraîne dans ce monde souterrain et en particulier celui des sols forestiers, où de très nombreuses populations d'organismes cohabitent.

A la loupe déjà, la vie est beaucoup plus riche, en variété d'espèces et en nombre d'individus.

C'est cette diversité qui conditionne la qualité des sols et donc leur bon fonctionnement.

Introduction

Protéger la biodiversité est un des enjeux majeurs pour l'avenir de l'humanité, comme le soulignent à l'unisson tous les experts en écologie et en économie. Protéger les écosystèmes globalement, et les milieux de vie des espèces, est maintenant reconnu comme la meilleure option. Sensibiliser les populations est aussi devenu primordial. Mais pour cela on met généralement en scène des espèces phares et emblématiques, souvent des grands animaux : ours polaires, rapaces, lions, tigres ou éléphants, baleines, loups, cerfs ou pandas... Ou des arbres spectaculaires et bien connus, comme le cèdre, des chênes ou sapins millénaires, des séquoias géants. Ils frappent l'imaginaire, sont sources d'émotions profondes, souvent rattachées à des contes et légendes qui ont imprégné nos civilisations, et aux livres qui ont bercé notre enfance. Or l'essentiel de la biodiversité est ailleurs, cachée sur ou dans le sol.

La région méditerranéenne au sens large est considérée comme un important pôle de biodiversité. On met en avant les quelques 25 000 espèces végétales (dont 60% d'endémiques), soit 10 % des plantes connues mondialement, pour moins de 2 % des surfaces continentales. Rien qu'en France, on compte plus de 4000 plantes supérieures dans notre région méditerranéenne (soit les deux-tiers du total français (6000 plantes). A une échelle plus locale, ces nombres se réduisent

1 - INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

2 - RENECOFOR : Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers.

drastiquement. Par exemple, l'équipe d'INRAE¹ d'Aix-en-Provence suit, depuis 1995, un réseau de 583 placettes permanentes en forêt méditerranéenne française, peu perturbées récemment et situées entre 0 et 1000 m d'altitude, sur des sols non-acides, dont la majorité en Provence calcaire (VENNETIER & RIPERT, 2010). Nous y avons recensé 431 plantes supérieures. Sur les 400m² de surface d'une placette, nous avons trouvé en moyenne 28 plantes (de 9 à 58). Dans un autre réseau équivalent (555 placettes de mêmes dimensions), mis en place par le Cemagref dans les années 90 en Provence siliceuse, Maures, Tanneron, îles d'Hyères (LADIER & RIPERT, 1996), 328 plantes supérieures ont été notées, avec des minimums et maximums de respectivement 5 et 50 par placette, donc un peu moins qu'en milieux calcaires ou neutres. A titre de comparaison, des études sur des surfaces équivalentes dans le réseau français RENECOFOR², représentatif des principales forêts françaises toutes régions confondues, font état de chiffres moyens plus élevés de richesse floristique par placette : 55 espèces hors mousses, allant de 39 à 117 par placette suivant l'espèce d'arbre dominant, et un peu plus de 200 espèces pour la placette la plus riche. Cette richesse est portée essentiellement par des herbacées représentant deux tiers des espèces. Les espèces végétales se comptent donc localement dans nos forêts en dizaines, au mieux en centaines. On peut rappeler que dans les forêts tropicales humides, les seuls arbres peuvent compter de cent à plus de 300 espèces à l'hectare

Rapportés en nombre d'individus à l'hectare pour les deux jeux de placettes méditerranéennes, on trouve pour les arbres quelques dizaines à quelques milliers, au mieux quelques dizaines de milliers pour les arbustes et les grands ligneux. Les herbacées les plus abondantes peuvent dépasser quelques centaines de milliers d'individus à cette échelle. On pourra comparer ces chiffres aux données de la vie du sol qui suivent.

Si on connaît et remarque parfois de loin les plus grandes plantes, les plus abondantes ou les plus spectaculaires par leur floraison, une grande partie de cette flore est rare et passe inaperçue. Dans les deux inventaires méditerranéens cités ci-dessus, 25% des espèces n'ont été trouvées qu'une seule fois, 40% au plus trois fois, et seules 32% peuvent être considérées comme communes (présentes dans plus de 3% des sites soit au

moins 15 fois). Les proportions sont similaires dans l'inventaire RENECOFOR, avec une majorité forte d'espèces rares. Beaucoup des espèces rares sont petites et discrètes : les variations de leurs populations, et éventuellement leur disparition avec le changement climatique, ne sont détectables qu'avec de très gros efforts d'inventaires répétés régulièrement sur le long terme, un challenge difficile à tenir. L'expérience prouve que même les botanistes aguerris manquent 5 à 10% des espèces présentes dans les inventaires. Un premier niveau d'invisibilité de la biodiversité.

Mais tous ces chiffres nous parlent de la partie la plus visible de cette biodiversité, même s'agissant des végétaux rares. Les études menées dans différents écosystèmes forestiers de la planète nous enseignent que cette biodiversité augmente de façon exponentielle au fur et à mesure qu'on y regarde de plus près.

La biodiversité cachée des sols

A la loupe déjà, la vie est beaucoup plus riche : par exemple, dans un seul mètre carré d'humus forestier suffisamment épais et ancien, on peut compter plus de 1000 espèces d'invertébrés (songez qu'il y a 1000 espèces de vertébrés dans toute l'Europe !). Parmi ces invertébrés, les acariens peuvent représenter 400 à 500 espèces, les nématodes 90, les collemboles 70. Ensemble, les enchytréides (micro-vers), myriapodes (milles-pattes), vers de terre, fourmis, termites et larves d'autres insectes ajoutent plus de 100 espèces. C'est alors au mètre carré, et non plus à l'hectare, que l'on va trouver des milliers à centaines de milliers d'individus, soit jusqu'à plusieurs dizaines de millions d'individus à l'hectare.

Et la biodiversité explose encore plus sous le microscope. Prenons une seule cuillère à café d'humus forestier, soit 1 g.

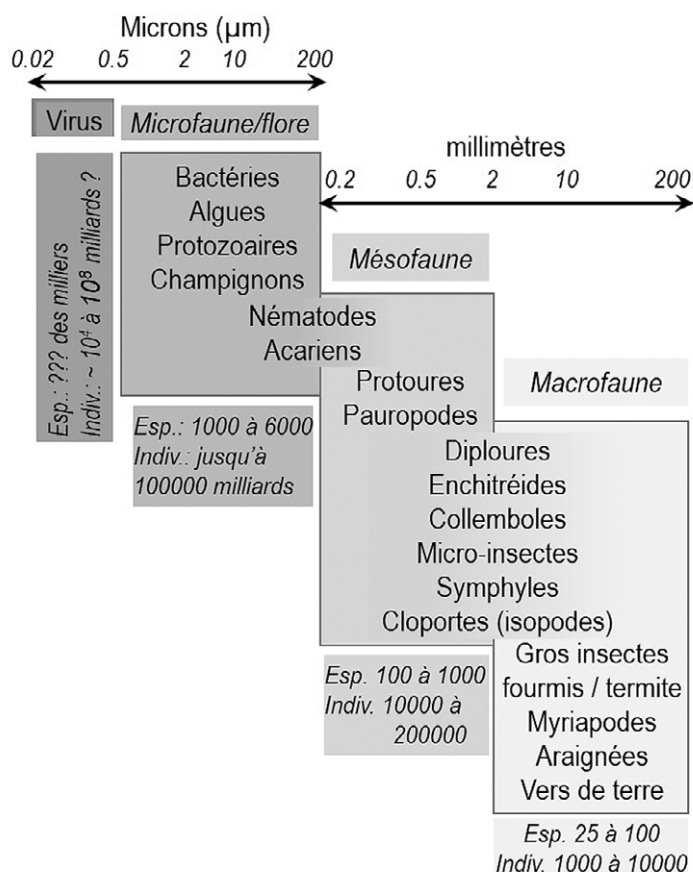
Protozoaires et algues y sont déjà quelques dizaines d'espèces, pour dix mille à un million d'individus. Les champignons n'affichent pas plus d'individus, mais 30 à 100 fois plus d'espèces (jusqu'à 2000), dont les filaments mycéliens développent 30 à 200 m de longueur cumulée. La surface d'un pied humain marchant en forêt recouvre en moyenne 400 km de mycélium, soit 25 km² et ... 250 000 km/ha. De quoi faire plus de 6 fois le tour de la terre à l'équateur. Sur les sols

riches, les mycéliums cumulent plus de 100 km/m², un million de km/ha donc près de trois fois la distance terre-lune ! En moyenne dans les écosystèmes boisés du monde, ces champignons du sol pèsent plus de 3 tonnes/ha, l'équivalent de plusieurs dizaines de cervidés.

Quant aux bactéries, elles défient l'imagination : 10 millions à 1 milliard d'individus de 1000 à 4000 espèces dans cet infime gramme d'humus, pas loin des 5000 espèces de mammifères connus sur toute la planète. Ce qui fait, par mètre carré, entre 15 milliards de bactéries sur un sol pauvre superficiel et sec, et cent-mille milliards pour un sol riche avec un humus actif et épais. Soit en moyenne sur ce mètre carré autant que de poissons dans toutes les mers et océan du globe, et bien plus que les populations réunies de tous les vertébrés des continents. Je vous laisse calculer pour un hectare (10 000 m²), c'est astronomique, au sens propre du terme. Si on faisait un chapelet avec ces bactéries tirées d'un hectare de sol forestier riche, (on prend une longueur moyenne de 1 µm, le standard des bactéries du globe, soit un millionième de mètre), on pourrait faire entre 25 et 50 fois l'aller-retour terre-lune.

L'infiniment petit est infiniment surprenant !

Pour finir dans la descente d'échelle, dans un domaine encore très incertain, signalons que les virus du sol commencent à intéresser les chercheurs, et qu'ils sont à ce jour peu étudiés et très mal connus. Mais les premiers chiffres semblent indiquer qu'ils sont bien plus nombreux encore que les bactéries, dont ils sont probablement pour partie des parasites. Si on se réfère au rôle mieux documenté des virus dans d'autres systèmes (comme les océans), ils jouent un rôle clef de régulateurs des populations bactériennes et fongiques, dans une logique « proie-prédateur » : dès qu'une population microbologique se développe fortement, leur pathogènes viraux trouvent un terrain idéal de multiplication et de dissémination par contagion de proximité, jusqu'à fortement réduire cette population. En évitant que quelques espèces plus fortes ou mieux adaptées momentanément aux conditions locales ne prolifèrent au détriment des autres, les virus contribuent ainsi à maintenir un certain équilibre et plus largement la biodiversité du système. Hum ! Ça ne vous rappelle rien, un virus pathogène qui tente de réguler une population trop envahissante sur terre...



Le rôle clef des invisibles « premiers de corvée » sur la structure du sol

Si les chiffres bruts de la biodiversité du sol donnent le vertige, son rôle clef dans la protection du sol et ses interactions avec la fertilité du sol sont en rapport, à toutes les échelles.

D'un côté, comme on l'a vu ci-dessus, plus le sol est initialement riche notamment en matière organique, et plus l'eau est disponible, plus riche et abondante seront sa faune et sa flore, et ses populations microbiologiques. Réciproquement, une vie du sol riche et diversifiée va contribuer à maintenir ou augmenter la fertilité, et la rendre plus résistante et plus résilience aux accidents et aux stress. Prenons le cas de la structure du sol et de sa perméabilité, des facteurs clefs pour sa stabilité et l'infiltration de l'eau. On observe plusieurs échelles de travail qui s'emboîtent et se complètent, de quelques millimètres à quelques microns.

D'abord la macrostructure. La majorité des vers de terre crée des galeries de 1 à 8 mm de diamètre, jusqu'à parfois plusieurs mètres de profondeur, qui facilitent l'infiltration de

Fig. 1 : Groupes d'espèces principales de la biodiversité des sols par niveau de taille. Le nombre d'espèces (esp) et le nombre d'individus (indiv) rapportés à 1m², par groupe est donné sous chacun d'eux.



Photo 1 :
Turricules de vers.
Photo Bernard Juvy.

l'eau. On trouve généralement 10 à 100 vers/m², qui peuvent entretenir sur cette surface jusqu'à 150 tubes de 900 m de longueur cumulée. En surface, les déjections de certains vers forment des édifices de plusieurs centimètres de haut (les turricules) à la sortie des galeries (Cf. photo 1). Ils sont composés de tortillons d'un diamètre proportionnel à la taille du vers et qui, avec le temps, en s'éboulant et en se cassant, donnent des agrégats de sol durcis. Les vers qui restent en profondeur les déposent dans leurs galeries, plutôt horizontales, sans cesse renouvelées. Dans un sol riche, ces déjections représentent 40 à 100 tonnes/ha. Concentrés en matière organique dont les vers consomment jusqu'à 6 tonnes par hectare et par an, et liés par du mucus produit par ces vers, ces agrégats sont beaucoup plus résistants à l'érosion et au tassement que le sol alentour. Ils peuvent former à la longue une véritable couche superficielle, mêlée à la



Photos 2 :
Myriapode (mille-pattes)
et ver de terre.
Ces deux groupes d'espèces ont des tailles très variables : de 2 mm à 30 cm et plus. Le seul vrai « mille pattes » est australien, il possède 653 paires soit ...1306 pattes !
Photos M. Vennetier.

litière et à l'humus, qui protège de l'impact des gouttes de pluie et de l'érosion due au ruissellement. Par leur concentration en matières organiques partiellement digérées et en éléments nutritifs (5 à 10 fois plus d'azote, de phosphore et de potassium que le sol brut), ces déjections de vers de terre constituent un milieu privilégié pour l'activité du sol à plus petite échelle.

A la même échelle, les grandes fourmis chez nous, avec les termites dans d'autres climats, créent d'immenses réseaux de galeries et de chambres souterraines, et en surface des monticules, qui jouent le même rôle pour l'infiltration de l'eau. Beaucoup de larves d'insectes se nourrissant de racines ou de bulbes, (hannetons, otiorhynques, taupins, tipules, petite hépia, etc.) et de chenilles de papillons s'enfouissant pour l'hiver ou pour leur nymphose, contribuent également à la macroporosité du sol.

Ensuite la méso-structure (entre 2 mm et 0,2 mm = 200 microns) : à cette échelle des animaux font exactement le même travail que les gros vers et insectes, mais s'ils sont 10 à 50 fois plus petits, ils sont aussi 100 à 1000 fois plus nombreux : par exemple les enchytréides, vers de terre d'ordre millimétrique, peuvent être 10 000/m². Les collemboles, petits arthropodes proches des crustacés, qui jouent un rôle majeur dans les cycles de la matière organique et des nutriments, de 50 000 à 400 000/m². Avec d'autres animaux minuscules (diploures, grands acariens et nématodes, micro-fourmis, symphyles), ils créent une porosité complémentaire : des galeries d'un à un dixième de millimètres, allant dans toutes les directions. Au total des dizaines de kilomètres par mètre carré qui permettent à l'eau de diffuser depuis les galeries principales des vers de terre et gros insectes, espacées de plusieurs centimètres ou dizaines de centimètres, dans l'ensemble du sol. A leur échelle, ils retravaillent les déjections des vers de terre, et créent aussi chaque année des dizaines de millions d'agrégats, tout aussi stables et riches en nutriments et matière organique. Les racelles des arbres, d'un diamètre du même ordre de grandeur et qui se renouvellent en partie chaque année, participent à cette porosité intermédiaire.

Et enfin la microstructure : à cette échelle microscopique (entre 1 et 200 microns), on trouve des animaux minuscules (petits nématodes et acariens), des êtres unicellulaires (protozoaires, bactéries) et des champignons, dont on a vu plus haut les popula-

tions innombrables. Leur activité (pour la faune et les bactéries), leur développement et leur décomposition (champignons) créent une microporosité essentielle : outre qu'elle représente encore 100 à 1000 fois plus de longueur cumulée que les macro- et méso-porosités, c'est à cette échelle que l'eau, qui a percolé par les conduits de plus grosse taille, peut être stockée en abondance dans le sol. Elle joue donc un rôle crucial pour le bilan hydrique du sol. C'est aussi à cette échelle que se font les échanges d'eau, d'éléments nutritifs, de carbone et autres substances entre les racelles des plantes, les champignons mycorhiziens, et les bactéries. Les poils absorbants se formant à l'extrémité des racines et racelles en croissance, dont le diamètre varie entre 10 et 20 microns, participent à cette microporosité par leur renouvellement rapide (quelques jours à quelques semaines) : ils peuvent être plusieurs dizaines de milliards dans un mètre carré, représentant des centaines de mètres carrés de surface : autant de surface capable de piéger l'eau dans le sol.

Les mycorhizes et les bactéries, une symbiose vitale pour la plupart des plantes

On l'a vu précédemment, des milliers d'espèces de champignons développent des dizaines de kilomètres de filaments mycéliens dans chaque mètre carré de sol forestier. C'est en partie lié au fait que 90% des plantes dépendent de leur association avec les champignons. Les exceptions se trouvent dans des milieux d'où les champignons sont absents, soit très secs et pauvres (zones désertiques, dunes), des sols bruts (comme après des éruptions volcaniques), des zones de plages qui peuvent être submergées, ou des sols très humides ou noyés, où la disponibilité de l'eau est illimitée et où son absorption n'est pas un problème. Réciproquement, ces champignons mycorhiziens dépendent des plantes pour leur alimentation en substances carbonées.

Qu'ils soient extérieurs aux racines (ectomycorhizes) ou en partie interne (endomycorhizes), l'ensemble des filaments mycéliens (les hyphes) augmente jusqu'à mille fois la capacité d'absorption en eau et éléments nutritifs des racines. Car les hyphes peuvent retenir plusieurs centaines de fois leur poids



sec en eau, et leur longueur cumulée est des centaines à des milliers de fois supérieure à celle des racines associées. Dans certains sols où ils abondent, le mycélium des champignons mycorhiziens représente 60 % de la biomasse microbologique du sol et l'équivalent de 20 à 30 % de la biomasse racinaire. Ces champignons symbiotiques, en « occupant le terrain » au plus près des racines, participent également à la protection contre le développement d'agents pathogènes, contre l'érosion des sols grâce à des substances qu'ils excrètent et qui agglomèrent les particules de sol, et à la diversification microbienne.

Les réseaux mycéliens jouent enfin un rôle essentiel dans le fonctionnement et la structuration des communautés végétales, car ils relient entre eux à la fois des plantes de la même espèce et de différentes générations, et parfois d'espèces différentes. Ils permettent ainsi l'échange de ressources (molécules carbonées, éléments nutritifs) et de signaux biochimiques (hormones, indicateurs d'agres-

Photos 3 :

Quelques espèces du sol, de la macrofaune... :

a - le Pseudo scorpion *Chthonidae*,
...de la micro et mésofaune :

b - l'Acarien oribate, *Xenilius clypeator*,

c - Campodea,
d - Le collembole, *Dicyrtoma fusca*,

...des isopodes :

e - le Cloporte des mousses, *Philoscia muscorum*.

Photos Philippe Garcelon.



Photo 4 :

Plasmode - Myxomycètes. Surprenante structure vivante unicellulaire, capable de se déplacer d'environ 1cm par heure dans sa quête de nourriture.

Photo Philippe Garcelon.

sions). On peut noter que des bactéries symbiotiques associées aux racines jouent également un rôle vital comme fixatrices d'azote, principalement (mais pas seulement) chez les légumineuses.

Plantes et bactéries s'épaulent mutuellement

Dans le même registre, les milliards de bactéries du sol participent aux **cycles de tous les éléments nutritifs**, contribuant à les rendre disponibles pour les plantes en réalisant la dégradation ultime des fragments végétaux et le recyclage permanent de la matière organique. En retour, particulièrement en période sèche, les racines des plantes et notamment des arbres vont chercher l'eau encore disponible profondément pour la restituer dans les horizons de surface. Ces exsudations des racines, qui maintiennent vivant leur système superficiel, contribuent aussi à soutenir les populations utiles de bactéries (et de champignons) en maintenant une zone de vie active à leur proximité immédiate. C'est vital pour les plantes, et le fonctionnement du sol peut ainsi redémarrer très vite après une réhumidification générale par des pluies.

Le rôle essentiel de la diversité fonctionnelle

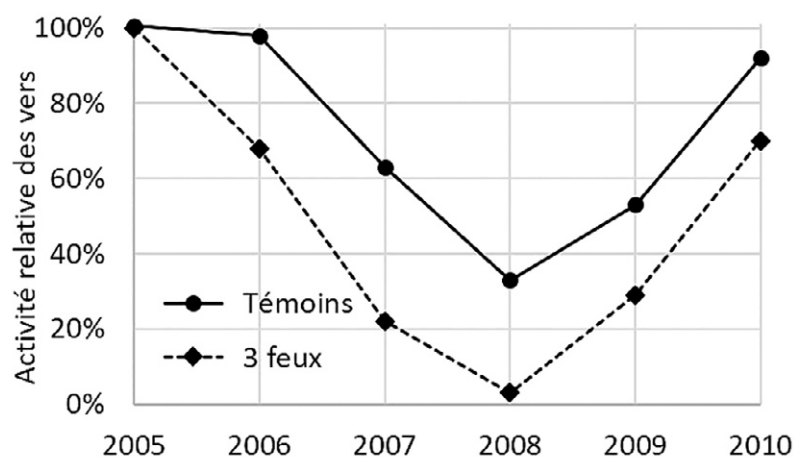
Dans un écosystème en bonne santé, de nombreuses espèces se partagent le même

rôle dans le sol : qu'il s'agisse d'un rôle physique (structuration du sol, fragmentation ou décomposition de la litière), d'un rôle biologique (niveau de la chaîne alimentaire, contrôle des populations par les parasites et maladies, dissémination des graines ou spores), ou biochimique (par ex. cycles des différents éléments nutritifs ou du carbone). Cette diversité fonctionnelle permet une bonne résistance du système aux stress car parmi les différentes espèces assurant une fonction, certaines sont plus résistantes à la chaleur ou au froid, d'autres à la sécheresse, à un bouleversement du sol (tassement, engorgement par l'eau, incendie, retournement par des animaux fouisseurs ou par labour, etc.). Chaque fonction reste donc assurée au moins partiellement après une perturbation, en attendant que celle-ci ou ces effets s'atténuent avec le temps. Lorsque l'appauvrissement limite le nombre d'espèces par fonctions, certaines peuvent ne plus être assurées après une perturbation, et c'est tout le fonctionnement du système qui peut s'effondrer s'il s'agit d'une fonction vitale.

Parmi les menaces de plus en plus fortes qui pèsent sur la diversité fonctionnelle du sol en région méditerranéenne, on trouve la répétition trop fréquente des incendies et des sécheresses, et surtout leur combinaison. Dans les études sur l'impact de la répétition des incendies dans les Maures, nous avons ainsi montré que la qualité et la quantité de matière organique du sol et de nombreuses fonctions microbiologiques s'effondraient lorsqu'on dépassait trois feux sur 50 ans, donc plus d'un incendie tous les 25 ans (GUÉNON *et al.* 2011). De plus, la répétition des feux passés rendait l'écosystème plus sensible à une sécheresse, et la répétition des sécheresses le rendait plus sensible à un incendie (VENNETIER, 2019). Cela s'explique par le fait que chacune de ces perturbations réduit la diversité fonctionnelle, sélectionnant drastiquement les espèces les plus tolérantes à ces stress, en réduisant leur nombre à chaque occurrence et donc la résilience du système (GUÉNON *et al.* 2013). Et cela jusqu'à ce qu'une ou plusieurs fonctions ne soient plus assurées.

Par exemple, nous avons suivi les populations de vers de terre dans ces milieux : suite à la série de 5 années sèches 2003-2007, elles ont été réduites de 67% en nombre d'individus dans les zones de forêt témoin, non brûlées depuis 50 ans, et de 95% dans les zones brûlées 3 fois dans ces 50 ans (Cf. Fig. 2). De plus dans ces dernières, une seule espèce de

Fig. 2 : Evolution de l'activité des vers de terre (nombre de turricules / m²), pendant et après l'épisode de sécheresse pluriannuelle 2003-2007, dans des forêts non brûlées depuis au moins 50 ans (témoins) et dans des forêts ayant brûlé 3 fois en 50 ans. La répétition des feux a rendu les vers beaucoup plus sensibles à la sécheresse. D'autant que les turricules sont 2,5 fois plus petits en moyenne dans les zones brûlées, traduisant une taille très réduite des vers.



vers de terre a résisté, alors qu'il y en avait en moyenne 5 à 7 initialement. La physique du sol et son fonctionnement biologique ont été grandement affectés.

La biodiversité végétale est aussi essentielle à la diversité du sol

Si la biodiversité fonctionnelle du sol est primordiale pour la préservation de l'écosystème forestier, on note que les associations végétales jouent réciproquement un rôle important dans la composition de la biodiversité du sol et son fonctionnement (SANTONJA 2017). De plus, chaque plante libère des substances bioactives par ses organes quand ils tombent et se décomposent (feuilles, bois, fruits, racines), ou de son vivant par ses racines qui peuvent les excréter. On parle d'allélopathie (BONIN *et al* 2007). Certaines plantes ont ainsi une matière organique « récalcitrante », difficile à décomposer, car « indigeste » pour les champignons ou les insectes, d'autres au contraire facilitent la décomposition de la litière en général. Qu'elles soient le fruit de la décomposition ou d'une excrétion volontaire par les racines d'une plante, ces substances peuvent contribuer à favoriser et entretenir ses bactéries et champignons symbiotiques, au détriment d'autres, se protéger d'espèces végétales concurrentes (SANTONJA *et al.* 2019) voire de sa propre progéniture, et fortement influencer la composition microbiologique et animale du sol. Et ce ne sont pas toujours que les plantes dominantes, notamment les arbres, qui sont déterminantes dans la composition, la richesse et l'activité de la vie du sol.

Dans les milieux méditerranéens, la sécheresse et la chaleur jouent aussi un rôle clef, en ralentissant la vie du sol durant de longues périodes. De même le bilan hydrique local, qui intègre les caractéristiques du sol et la topographie pour moduler l'eau disponible dans le temps et dans l'espace, joue un rôle important. Finalement, on démontre que plus qu'un facteur donné, ce sont les interactions entre toutes les composantes de l'écosystème (composition, structure et diversité végétale, climat, richesse du sol en éléments nutritifs et carbone, bilan hydrique) qui façonnent la vie du sol (PAILLER *et al.* 2014).

Conclusion

La richesse du sol est la clef de son incroyable biodiversité « cachée », et réciproquement cette diversité et abondance conditionne la fertilité du sol, sa qualité, et donc la vie et la survie de la forêt, sa productivité, sa capacité à fixer du carbone, à capter l'eau et à nous rendre tant d'autres services.

Si protéger les écosystèmes est important, protéger le sol est une nécessité absolue dans la gestion et dans la restauration des forêts (mais c'est vrai aussi pour tous les sols agricoles et urbains du monde), et il reste beaucoup à faire pour mieux connaître cette infinie richesse cachée et son fonctionnement.

M.V.

Bibliographie

- Bonin G., Bousquet-Melou A., Lelong B., Voiriot S., Nozay S., Fernandez C. – 2007. Expansion du pin d'Alep. Rôle des processus allélopathiques dans la dynamique successione. *Forêt Méditerranéenne* 28(3) 211-218.
- Dobremez J.-F., Camaret S., Bourjot L., Ulrich E., Brêthes A., Coquillard P., Dume G., Dupouey J.-L., Forgeard F., Gauberville C., Gueugnot J., Picard J.F., Savoie J.-M., Schmitt A., Timbal J., Touffet J., Trémolière M. 1997 : *RENECOFOR - Inventaire et interprétation de la composition floristique de 101 peuplements du réseau.* (Campagne 1994/95) Editeur: Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 111 - 5. 513 p.
- Ladier J., Ripert C. ; 1996. *Les stations forestières de la Provence cristalline (Cap Sicié, îles d'Hyères, Maures, Tanneron)* – Cemagref – Aix en Provence - 92 p + annexes.
- Guénon R., Vennetier M., Dupuy N., Ziarelli F., Gros R. - 2011. Soil organic matter quality and microbial catabolic functions along a gradient of wildfire history in a Mediterranean ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 48(1): 81-93
- Guénon R., Pailler A., Vennetier M., Dupuy N., Roussos S., Gros R. - 2013. Trends in recovery of Mediterranean soil physico-chemical properties and microbial activities after infrequent and frequent wildfire. *Land Degradation and Development* 24(2): 115–128
- Pailler A., Vennetier M., Torre F., Ripert C., Guiral D. - 2014. Forest soil microbial functional patterns and response to a drought and warming event: Key role of climate–plant–soil interactions at a regional scale. *Soil Biology and Biochemistry*. 70: 1-4
- Santonja M., Rancón A., Fromin N., Baldy V., Hättenschwiler S., Fernandez C., Montès N., Mirleau P. - 2017. Plant litter diversity increases microbial abundance, fungal diversity, and carbon and nitrogen cycling in a Mediterranean shrubland. *Soil Biology and Biochemistry* 111: 124-134.

Michel VENNETIER
INRAE, UMR RECOVER,
13182
Aix-en-Provence,
et Forêt
Méditerranéenne
michel.vennetier@
inrae.fr

Merci à
Philippe Garcelon
pour les photos
page 127.
L'album de l'auteur
est visible sur Flickr :
[www.flickr.com/
photos/philgar/](http://www.flickr.com/photos/philgar/)

Santonja, M., Bousquet-Mélou A., Greff S., Ormeño E., Fernandez C. - 2019. « Allelopathic effects of volatile organic compounds released from *Pinus halepensis* needles and roots. » *Ecology and Evolution* 9(14): 8201-8213.

Vennetier M., Ripert C. - 2010. Flore méditerranéenne et changement climatique: la course-poursuite est engagée. *Forêt Méditerranéenne*, XXXI (1): 15-24.

Vennetier M. - 2019. Feux et sécheresses répétés accroissent mutuellement leur impact sur la suberaie. *Forêt Méditerranéenne*, 40(4) 387-389

Résumé

La forêt méditerranéenne est réputée très riche en biodiversité, notamment en plantes. Mais c'est un système complexe dont nos yeux ne voient directement qu'une infime partie : les arbres d'abord, 3 à 12 espèces au mieux par hectare dans nos régions, pour quelques dizaines à quelques milliers d'individus. Les plantes supérieures ensuite, quelques dizaines à 100 espèces et parfois plusieurs dizaines de milliers d'individus à l'hectare. Enfin des grands animaux complètent le tableau, par dizaines d'espèces parfois : oiseaux, mammifères, reptiles... Mais regardons de plus près.

A la loupe déjà, la vie est beaucoup plus riche : fourmis, termites et autres micro-insectes, arachnides, champignons, vers... C'est au mètre carré que l'on va trouver des milliers ou dizaines de milliers d'individus, soit des millions d'individus à l'hectare pour quelques centaines à plus de mille espèces.

Au microscope, la biodiversité augmente exponentiellement : dans chaque gramme d'humus forestier, les bactéries se comptent par dizaines ou centaines de millions (pour plusieurs milliers d'espèces), les champignons, protozoaires et microalgues par dizaines ou centaines de milliers. Soit ensemble, par mètre carré, des dizaines de milliards d'individus, et à l'hectare jusqu'à des dizaines de milliers de milliards... Et bien qu'ils soient encore très mal connus et peu étudiés, les virus seraient encore bien plus nombreux que les bactéries.

La richesse du sol est la clef de cette incroyable diversité, et réciproquement cette diversité et abondance, et l'activité de tous ces êtres minuscules, conditionnent ensemble la fertilité du sol, sa qualité, et donc la vie et survie de la forêt, sa productivité, sa capacité à fixer du carbone, à capter l'eau et à nous rendre tant d'autres services.

Protéger le sol est donc une nécessité absolue dans la gestion et dans la restauration des forêts (mais c'est vrai aussi pour tous les sols agricoles et urbains du monde). Il reste beaucoup à faire pour connaître et comprendre cette infinie biodiversité cachée et son fonctionnement, pour mieux la protéger ou la reconstituer.

Summary

« *What is essential remains invisible to the eye* » (Saint Exupéry)
- applying this quote to the biodiversity of forest soils

Mediterranean forests are known for their exceptional biodiversity, especially for plants. But they form a complex system of which we can directly see only a tiny part: trees first, 3 to 12 species at best per hectare in our regions, numbering a few tens to a few thousand individuals; then other higher plants, a few tens to a hundred species with sometimes several tens of thousands of individuals per hectare. Finally, large animals complete the picture, sometimes dozens of species: birds, mammals, reptiles... But we really need to take a closer look...

Just with a magnifying glass, life is much richer: ants, termites and other micro-insects, arachnids, mushrooms, worms... It is then per square meter that we discover thousands or tens of thousands of individuals, i.e. millions of individuals per hectare for a few hundred to more than a thousand species. But under the microscope biodiversity increases exponentially: in each gram of forest humus, bacteria number in the tens to hundreds of millions (for several thousand species), fungi, protozoa and microalgae in the tens or hundreds of thousands. Thus, taken together per square meter, tens of billions of individuals and, per hectare, up to tens of thousands of billions... And although they are still very poorly known and little studied, viruses would still be far more numerous than bacteria.

The richness of the soil is the key to this incredible diversity and, reciprocally, this diversity and abundance and the activity of all these tiny beings together condition the fertility of the soil, its quality and, therefore, the life and survival of the forest: its productivity, its ability to sequester carbon, capture water and provide us with so many other services. Consequently, protecting the soil is an absolute necessity in the management and restoration of forests (this is, of course, also true for all agricultural and urban soils worldwide). Much remains to be done to know and understand this infinite hidden biodiversity and how it works, the better to protect or restore it.