

Actions et rétroactions : conséquences pour la gestion des sols

9.1. Émergence d'une compréhension éco-évolutive du fonctionnement des sols

De plus en plus, on se rend compte en écologie que les dynamiques écologiques et évolutives (au sens darwinien) sont concomitantes et en interaction (voir chapitre 8 « Rétroactions dans les sols : évidences et implications théoriques » et figure 9.1). Cela signifie par exemple que le fonctionnement d'un écosystème influence la disponibilité des nutriments minéraux, ce qui exerce des pressions de sélection sur les plantes qui vont développer, par des mécanismes évolutifs, des adaptations permettant de mieux exploiter les nutriments minéraux et de faire face à la compétition avec les autres plantes. En retour, ces nouvelles adaptations vont permettre aux plantes de modifier la disponibilité des nutriments dans le sol et le fonctionnement de l'écosystème dans son ensemble [BAR 16, BOU 11]. On pense maintenant qu'il est très important d'étudier ce type de rétroactions éco-évolutives parce qu'il est clair que les dynamiques évolutives, par exemple le temps nécessaire à ce qu'une adaptation apparaisse dans une population sous l'effet d'une nouvelle pression de sélection, sont plus rapides qu'initialement imaginées. Ce type de dynamique peut avoir des implications importantes pour les sociétés humaines. Par exemple, si une nouvelle variété de plante cultivée est mise sur le marché parce qu'elle est résistante à un pathogène, cette nouvelle variété constitue une pression de sélection pour le pathogène qui a tendance à rapidement (quelques années) développer évolutivement une capacité de résistance, ce qui rétroagit en diminuant les rendements de la variété. Sur un plan plus fondamental, ces arguments montrent aussi que les propriétés des écosystèmes tels que l'on peut les observer actuellement dépendent de ces dynamiques éco-évolutives et ne peuvent pas être

comprises pleinement sans qu'elles soient prises en compte. Tous ces arguments poussent à développer des recherches à l'interface entre écologie évolutive et écologie des écosystèmes [FUS 07].

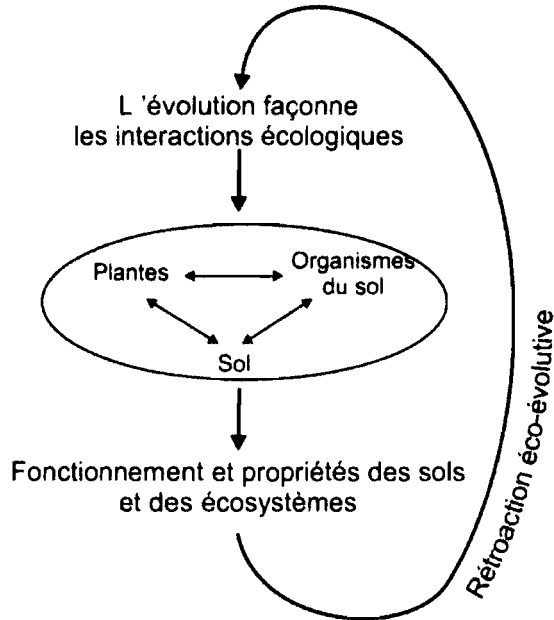


Figure 9.1. Dynamique éco-évolutive dans les sols. L'évolution darwinienne façonne les interactions écologiques entre plantes, sols et organismes du sol, donc façonne les caractéristiques des organismes des sols et des plantes. De ce fait, l'évolution influence les propriétés générales des sols (par exemple la quantité de matière organique) et des écosystèmes (par exemple la production primaire). Il s'agit d'un processus itératif : les propriétés écologiques des sols, biotiques et abiotiques, servent de cadre général à la sélection naturelle et l'évolution si bien que les sols rétroagissent sur les processus évolutifs.

Ce type d'approche est aussi très pertinent pour les sols et leur fonctionnement. Une première constatation est que trop souvent les écologues des sols ont peu abordé les questions évolutives [BAR 07], au moins en partie parce que l'écologie des sols est traditionnellement plus proche de l'écologie fonctionnelle et du « pôle abiotique de l'écologie » que de l'écologie évolutive [NOB 04]. Il reste que les dynamiques éco-évolutives jouent probablement un rôle important dans le fonctionnement des sols et leurs réactions face aux changements (changements climatiques, changement d'usage des sols, agriculture, pollution, etc.). De nombreuses études vont déjà dans ce sens pour ce qui est des interactions souterrain-aérien. Par exemple, un

modèle théorique montre comment la capacité des plantes à influencer la décomposition de la matière organique des sols (qualité de la litière ou *priming effect* rhizosphérique) évolue en fonction de la disponibilité de ces nutriments et des dépôts atmosphériques de ces nutriments [BAR 14]. Cela rétroagit sur le stock de carbone dans le sol et la production primaire. De même, Donovan *et al.* [DON 11] ont synthétisé les connaissances acquises sur le fait que la diversité des traits des feuilles (et le *leaf economic spectrum*, par exemple feuilles plus ou moins riches en azote ou plus ou moins épaisses). Ce qui en retour influence la décomposition de la litière et le fonctionnement des sols.

Ce qui est vrai pour les relations souterrain-aérien est probablement vrai pour tous les processus écologiques au sein des sols qui mettent en jeu ou non les plantes.

Les organismes des sols, de la macrofaune (par exemple vers de terre) aux micro-organismes, participent à de nombreuses interactions écologiques :

- entre organismes du sol (en incluant les racines des plantes) ;
- entre organismes du sol et propriétés physico-chimiques des sols.

Ces organismes ont été façonnés par des dynamiques éco-évolutives qui sont à l'origine des interactions écologiques déterminant le fonctionnement actuel des sols. Par exemple, au cours de leur évolution, les bactéries telluriques ont développé une grande efficacité à décomposer des composés organiques très diversifiés produits par les plantes et les micro-organismes eux-mêmes. Cela implique la production de métabolites variés et la régulation de cette production (par exemple « quorum sensing ») [RED 02]. En retour, l'évolution de ces capacités d'exploitation de la matière organique morte influence le stock de carbone dans les sols et de propriétés variées des écosystèmes. De nombreux organismes telluriques (bactéries, champignons, protozoaires, nématodes, etc.) ont des temps de génération très courts ce qui peut potentiellement leur permettre d'évoluer très rapidement. On peut imaginer que tous les changements subis par les sols (changements d'usage, changements climatiques sur le long terme, changements dus aux cycles climatiques saisonniers, travail du sol) déclenchent des dynamiques évolutives qui n'ont pratiquement pas été étudiées pour le moment. Cette question reste extrêmement ouverte. Lorsque l'on observe des changements de composition et d'activité dans une communauté microbienne, par exemple des bactéries suite à une perturbation, ces changements sont en grande partie dus au fait que certaines bactéries deviennent actives et que leur population augmente. Mais certains de ces changements peuvent aussi être dus à des dynamiques évolutives avec l'apparition de nouvelles bactéries basées sur des combinaisons de gènes et d'allèles qui n'existaient pas avant la perturbation. La compréhension des dynamiques évolutives dans lesquelles les sols sont impliqués peut paraître comme un sujet de recherche passionnant mais assez théorique et ne pouvant pas déboucher sur des applications concrètes en termes de gestion des sols et d'agriculture. Il faut fortement nuancer ce jugement. D'une part, comprendre les

dynamiques évolutives peut donner des arguments très forts pour utiliser les interactions écologiques. Ainsi, si l'on comprenait les causes évolutives de l'effet généralement positif des vers de terre sur la croissance des plantes, on pourrait plus facilement utiliser les vers de terre en agriculture. D'autre part, la rapidité des dynamiques évolutives fait qu'il faut probablement beaucoup plus prendre en compte les conséquences évolutives de la gestion des sols pour développer une véritable ingénierie écologique des sols. Enfin, l'homme sélectionne directement les plantes cultivées de telle sorte que l'intégration des rétroactions éco-évolutives impliquant les sols, les organismes du sol et les plantes cultivées dans la réflexion sur l'amélioration variétale est probablement un levier important pour développer une agriculture plus durable dans l'esprit de l'ingénierie écologique.

9.2. Vers une ingénierie des sols écologique et évolutive

Les connaissances acquises en écologie générale et en écologie des sols permettent d'envisager un nouveau type d'ingénierie, l'ingénierie écologique, basée non pas sur les technologies humaines alimentées par les énergies fossiles (ingénierie « conventionnelle ») mais sur des processus naturels [ODU 62]. La stratégie de l'ingénierie écologique est de coupler des interventions humaines qui passent généralement par l'utilisation d'une technologie avec l'auto-organisation des écosystèmes [ODU 03], ce qui permet d'obtenir une performance optimale tout en évitant une dépense énergétique importante puisque le travail, au sens physique, est sous-traité par la biodiversité et les fonctions écologiques qu'elle supporte. Toutefois, dans les écosystèmes anthropisés, tels que les agrosystèmes, les services écosystémiques « bruts », perçus par la société, sont la résultante de l'action des humains et des processus écologiques basés sur la biodiversité. La proportion de travail réalisé d'une part *via* des interventions humaines et d'autre part *via* des processus écologiques supportés par la biodiversité est difficile à déterminer [BAR 17].

Dans une démarche d'ingénierie, l'objectif est d'apporter une solution à un problème (*problem solving*) selon une procédure qui commence par un diagnostic de la situation, la conception d'une solution, la mobilisation d'outils et leur implémentation sur le terrain. L'ingénierie écologique se distingue de l'ingénierie conventionnelle à toutes les étapes de cette démarche d'ingénierie que nous allons maintenant aborder.

À l'instar des analyses physico-chimiques des sols appliquées depuis longtemps pour le diagnostic des sols, les progrès en écologie permettent maintenant d'accéder à des méthodes standardisées de caractérisation de la qualité biologique des sols. Elles reposent sur l'analyse de la diversité et de la structure des communautés biologiques et l'identification de bio-indicateurs [BIS 17, COR 99, VEL 05]. Ces indicateurs sont utiles pour caractériser à un moment donné la qualité des sols soumis à des pratiques

différentes. En réitérant l'utilisation de ces indicateurs dans le temps, il est alors possible d'établir la trajectoire passée de la qualité d'un sol et éventuellement d'extrapoler la tendance observée pour prédire son état futur. Le diagnostic de qualité est possible en confrontant ces résultats à des référentiels intégrant les caractéristiques physico-chimiques des sols, dont on sait maintenant qu'ils représentent des filtres majeurs de la biodiversité [RAN 13]. L'appropriation des outils de caractérisation biologique des sols par les gestionnaires est bien évidemment un enjeu majeur [BIS 17].

Le diagnostic de la qualité des sols, la connaissance de l'impact des pratiques agricoles sur cette qualité ainsi que la démarche prospective consistant à extrapoler la trajectoire de cette qualité ont pour vocation à identifier les actions appropriées d'ingénierie écologique. Dans le domaine de la gestion des sols, il s'agit d'une manière générale de promouvoir les services écosystémiques fournis par les sols (production agricole, régulation du climat, régulation des flux d'eau et de sa qualité, etc.) et la durabilité de la fourniture de ces services. Plus spécifiquement, l'ingénierie écologique vise à promouvoir la qualité des sols c'est-à-dire leur fertilité (aptitude à fournir des produits de qualité en quantité suffisante) et leur stabilité (résistance, résilience) dans un contexte de changement global, notamment en accroissant le stock de matière organique pour favoriser la rétention d'eau, la capacité d'échange cationique et la structure du sol [LAL 06]. Dans les cas où les sols sont dégradés, elle peut permettre leur restauration, à titre d'exemples par :

- la revégétalisation de décharge d'ordures [LEI 16] ;
- la phytostabilisation et la phyto-extraction lors d'une contamination par les métaux lourds [WON 03] ;
- la phyto-extraction assistée par les micro-organismes [LEB 08] ou par les vers de terre [JUS 12, SIZ 09] ;
- la dégradation de polluants organiques par les vers de terre [CON 08] et les micro-organismes [VAR 17]. Elle peut aussi servir à construire de nouveaux sols et substrats par l'action des plantes et vers de terre [DEE 16]. Ces technosols peuvent par ailleurs s'avérer intéressants pour la conservation de divers organismes du sol dans des milieux difficiles comme les espaces verts urbains [VER 17].

De nouveaux outils peuvent être nécessaires pour parvenir aux objectifs de gestion. À l'instar de l'ingénierie conventionnelle consistant à fabriquer des outils mécaniques, chimiques, etc., l'ingénierie écologique se propose d'adapter des organismes d'intérêt au but à atteindre, en sélectionnant les traits les plus intéressants parmi une diversité d'organismes ou en créant de nouvelles variétés d'organismes capables d'effectuer certaines fonctions avec une grande efficacité. On peut citer à titre d'exemple la sélection de plantes présentant des traits contribuant au recrutement de populations d'organismes telluriques favorables à la nutrition et à la santé de la plante hôte.

Enfin, l'implémentation de solutions d'ingénierie écologique ou conventionnelle sur le terrain dépendra du contexte humain et environnemental et plus spécifiquement de la réglementation, du budget mobilisable, de l'espace disponible et du risque de défaillance acceptable [BER 15, BLO 13].

Ainsi, dans certains cas, il sera difficilement envisageable d'« améliorer » le fonctionnement de l'écosystème et la stratégie la plus raisonnable pour tirer profit des services écosystémiques délivrés par un écosystème sera alors de conserver sa biodiversité. On optera également pour cette option conservatoire lorsque l'environnement ou le paysage de l'écosystème considéré est soumis à de fortes perturbations qui pourraient déstabiliser son fonctionnement. Ce type d'option s'appliquera d'autant plus facilement que :

- les moyens financiers pour intervenir sont restreints et ne peuvent permettre à la fois la mise en place de la technologie conventionnelle habituelle et son entretien ;
- l'espace mobilisable pour mettre en place la solution d'ingénierie est vaste, rendant possible de supporter une efficacité par unité de surface relativement faible car alimentée par l'énergie solaire locale ;
- la gamme acceptable des trajectoires potentiellement prises par l'écosystème est large et donc le risque d'obtenir une trajectoire vraiment défavorable est faible.

À l'autre extrême du gradient, on peut répondre à un problème par des solutions d'ingénierie conventionnelle, qui reposent sur les technologies humaines et des énergies fossiles. On privilégiera cette approche lorsque les moyens financiers sont importants, l'espace restreint ou lorsque le risque est élevé.

Deux options intermédiaires peuvent être proposées. Lorsque la biodiversité est érodée, avec des espèces fonctionnellement importantes disparues, on peut favoriser leur retour par leurs propres moyens, par exemple avec la mise en place de corridors écologiques qui assureront un flux pérenne d'individus, de gènes et matière à long terme. Lorsque la biodiversité est érodée et que de plus, les capacités de dispersion des organismes ne sont pas assez importantes pour une dispersion active de ces organismes *via* un corridor, il est alors envisageable d'avoir recours à la dispersion passive, c'est-à-dire que l'humain peut manipuler les organismes du sol en les transportant jusqu'au site d'intérêt ou en introduisant des inoculum dans le sol (par exemple inoculation de rhizobies sur légumineuses, de champignons mycorrhiziens sur angiospermes ou de vers de terre pour restaurer un sol compact avec la technique de fertilisation bio-organique, FBO[®]) [BER 15, BLO 13].

Un des enjeux majeurs de l'ingénierie écologique est d'intégrer la dimension évolutive des organismes utilisés. Le cadre conceptuel proposé par la dynamique éco-évolutive évoqué en début de chapitre est certainement une piste à explorer. La gestion des sols, en particulier en agroécologie, suppose une réévaluation régulière de l'état du système écologique que l'on gère, afin d'estimer les conséquences des activités de gestion et d'adapter en conséquence les objectifs opérationnels selon la trajectoire écologique prise par le système et selon la trajectoire évolutive prise par les organismes qui le composent. Cette gestion adaptative doit également intégrer les évolutions des enjeux de société auxquels le gestionnaire doit répondre. Elle doit donc nécessairement reposer sur une approche participative associant différents acteurs (gestionnaires, agents de développement, chercheurs, etc.).

9.3. Bibliographie

- [BAR 07] BAROT S., BLOUIN M., FONTAINE S., JOUQUET P., LATA J.C., MATHIEU J., « A tale of four stories : soil ecology, theory, evolution and the publication system », *PLoS One*, n° 2, p. e1248, 2007.
- [BAR 14] BAROT S., BORNHOFEN S., LOEUILLE N., PERVEEN N., SHAHZAD T., FONTAINE S., « Nutrient enrichment and local competition influence the evolution of plant mineralization strategy, a modelling approach », *Journal of Ecology*, n° 102, p. 357-366, 2014.
- [BAR 16] BAROT S., BORNHOFEN S., BOUDSOCQ S., RAYNAUD X., LOEUILLE N., « Evolution of nutrient acquisition : when space matters », *Functional Ecology*, n° 30, p. 283-294, 2016.
- [BAR 17] BAROT S., YÉ L., ABBADIE L., BLOUIN M., FRASCARIA N., « Ecosystem services must tackle anthropized ecosystems and ecological engineering », *Ecological Engineering*, n° 99, p. 486-495, 2017.
- [BER 15] BERTRAND M., BAROT S., BLOUIN M., WHALEN J., DE OLIVEIRA T., ROGER-ESTRADE J., « Earthworm services for cropping systems, a review », *Agronomy for Sustainable Development*, n° 35, p. 553-567, 2015.
- [BIS 17] BISPO A., JOLIVET C., RANJARD L., CLUZEAU D., HEDDE M., PERES G., « Mise en place d'outils et de bio-indicateurs pertinents de la qualité des sols », dans J.F. BRIAT, D. JOB (DIR.), *Les sols et la vie souterraine, des enjeux majeurs en agroécologie*, Éditions Quæ, Versailles, 2017.
- [BLO 13] BLOUIN M., HODSON M.E., DELGADO E.A., BAKER G., BRUSSAARD L., BUTT K.R., DAI J., DENDOOVEN L., PERES G., TONDOH J.E., CLUZEAU D., BRUN J.J., « A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services », *European Journal of Soil Science*, n° 64, p. 161-182, 2013.

- [BOU 11] BOUDSOCQ S., BAROT S., LOEUILLE N., « Evolution of nutrient acquisition : when adaptation fills the gap between contrasting ecological theories », *Proceedings of the Royal Society of London B Biological Sciences*, n° 278, p. 449-457, 2001.
- [COR 99] CORTET J., GOMOT-DE VAUFLERY A., POINSOT-BALAGUER N., GOMOT L., TEXIER C., CLUZEAU D., « The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects », *European Journal of Soil Biology*, n° 35, p. 115-134, 1999.
- [DEE 16] DEEB M., GRIMALDI M., LERCH T.Z., PANDO A., GIGON A., BLOUIN M., « Interactions between organisms and parent materials of a constructed Technosol shape its hydrostructural properties », *Soil*, n° 2, p. 163-174, 2016.
- [DON 11] DONOVAN L.A., MAHERALI H., CARUSO C.M., HUBER H., DE KROON H., « The evolution of the worldwide leaf economics spectrum », *Trends in Ecology and Evolution*, n° 26, p. 88-95, 2011.
- [FUS 07] FUSSMANN G.F., LOREAU M., ABRAMS P.A., « Eco-evolutionary dynamics of communities and ecosystems », *Functional Ecology*, n° 21, p. 465-477, 2007.
- [JUS 12] JUSSSELME M.D., POLY F., MIAMBI E., MORA P., BLOUIN M., PANDO A., ROULAND-LEFÈVRE C., « Effect of earthworms on plant *Lantana camara* Pb-uptake and on bacterial communities in root-adhering soil », *Science of the Total Environment*, n° 416, p. 200-207, 2012.
- [LEB 08] LEBEAU T., BRAUD A., JÉZÉQUEL K., « Performance of bioaugmentation-assisted phytoextraction applied to metal contaminated soils : A review », *Environmental Pollution*, n° 153, p. 497-522, 2008.
- [LEI 16] LEI H., PENG Z., YIGANG H., YANG Z., « Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines », *Ecological Engineering*, n° 94, p. 638-646, 2016.
- [NOB 04] NOBIS M., WOHLGEMUTH T., « Trend words in ecological core journals over the last 25 years (1878-2002) », *Oikos*, n° 106, p. 411-421, 2004.
- [ODU 62] ODUM H.T., « Ecological tools and their use. Man and the ecosystem », dans P.E. WAGGONER, J.D. OVINGTON (DIR.), *Conference on the suburban forest and ecology*, The Connecticut Agricultural Experiment Station, Lockwood, 1962.
- [ODU 03] ODUM H.T., ODUM B., « Concepts and methods of ecological engineering », *Ecological Engineering*, n° 20, p. 339-361, 2003.
- [RAN 13] RANJARD L., DEQUIEDT S., CHEMIDLIN PRÉVOST-BOURÉ N., THIOULOUSE J., SABY N.P.A., LELIEVRE M., MARON P.A., MORIN F.E.R., BISPO A., JOLIVET C., ARROUAYS D., LEMANCEAU P., « Turnover of soil bacterial diversity driven by wide-scale environmental heterogeneity », *Nature Communications*, n° 4, 1434, 2013.

-
- [RED 02] REDFIELD R.J., « Is quorum sensing a side effect of diffusion sensing ? », *Trends in Microbiology*, n° 8, p. 365-370, 2002.
- [SIZ 09] SIZMUR T., HODSON M.E., « Do earthworms impact mobility of nutrients in soil ? A review », *Environmental Pollution*, n° 157, p. 1981-1989, 2009.
- [VAR 17] VARJANI S.J., GNANSOUNOU E., PANDEY A., « Comprehensive review on toxicity of persistent organic pollutants from petroleum refinery waste and their degradation by microorganisms », *Chemosphere*, n° 188, p. 280-291, 2017.
- [VEL 07] VELASQUEZ, E., LAVELLE P., ANDRADE M., « GISQ, a multifunctional indicator of soil quality », *Soil Biology and Biochemistry*, n° 39, p. 3066-3080, 2007.
- [VER 17] VERGNES A., BLOUIN M., MURATET A., LERCH T.Z., MENDEZ-MILLAN M., ROUELLE-CASTREC M., DUBS F., « Initial conditions during Technosol implementation shape earthworms and ants diversity », *Landscape and Urban Planning*, n° 159, p. 32-41, 2017.
- [WON 03] WONG M.H., « Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils », *Chemosphere*, n° 50, p. 775-780, 2003.

Barot Sébastien, Blouin M., Lemanceau P. (2018)

Actions et rétroactions : conséquences pour la gestion des sols

In : Lemanceau P. (ed.), Blouin M. (ed.). *Les sols au coeur de la zone critique 6 : écologie*

Londres : ISTE, p. 163-171. (Système Terre - Environnement : Série Les Sols ; 6)

ISBN 978-1-78405-384-0