

## SÉANCE INTRODUCTIVE

# LA QUALITÉ DES SOLS FORESTIERS FACE AUX CHANGEMENTS GLOBAUX

**DOMINIQUE ARROUAYS – JACQUES RANGER**

En position d'interface dans l'environnement, les sols échangent en permanence des flux avec quatre grandes composantes du milieu : la biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. À l'interface du monde vivant et du monde minéral, les sols se caractérisent par une extraordinaire complexité : ils associent les trois phases, solide, liquide et gazeuse, ils présentent une très grande variabilité d'associations organominérales issues de processus biologiques et physicochimiques complexes, une biodiversité encore très largement inconnue, des gradients de pédogenèses très divers...

Les sols présentent ainsi une variabilité qui s'exprime de l'échelle du nanomètre à celle de la planète, et des niveaux d'organisation, qui vont de l'échelle des molécules à celle des grands biomes. C'est cette immense variabilité qui rend nécessaire la connaissance spatialisée des sols, de leurs fonctionnements et de leurs comportements, afin de pouvoir les gérer localement en connaissance de cause.

### **MAIS POURQUOI GÉRER LES SOLS ?**

Les sols assurent des services écosystémiques très nombreux :

- ils sont le support de la production agricole et forestière, lieu d'ancrage des systèmes racinaires et réservoir d'eau et d'éléments nutritifs,
- ils sont le support de nos paysages et du développement de nos infrastructures,
- ils constituent une mémoire des activités humaines et abritent une partie de notre patrimoine archéologique,
- ils filtrent, immobilisent ou dégradent des polluants,
- ils recyclent des déchets organiques de toute nature,
- ils sont un maillon central dans la régulation des gaz à effet de serre,
- ils abritent une biodiversité remarquable par son abondance, qui représente un potentiel génétique et écologique considérable,
- ils sont une source de matériaux (granulats, sables, briques, argile de poterie, etc.),
- ils régulent le régime des eaux superficielles et l'alimentation des eaux souterraines.

Parmi ces services multiples, certains peuvent évidemment se révéler antagonistes. Les actions à entreprendre pour protéger les sols et pour maintenir ou améliorer certaines de leurs fonctions dépendent donc à la fois des services qui en sont attendus et de leurs caractéristiques intrinsèques. Ces actions doivent par conséquent se décliner au niveau local, comme par exemple à l'échelle d'une parcelle forestière ou d'un peuplement.

Toutefois, les sols sont aussi au cœur de grands enjeux planétaires, comme la sécurité alimentaire, le changement climatique, le développement des énergies renouvelables, la disponibilité en eau de qualité, ou la préservation de la biodiversité. Ce constat a récemment fait émerger le concept de « *soil security* » (McBratney *et al.*, 2014), la mise en place d'un partenariat mondial sur les sols mobilisant l'ensemble des pays membres de la FAO (<http://www.fao.org/globalsoilpartnership/>), la mise en place d'un grand programme de constitution d'une base de données numériques sur les sols du monde (Arrouays *et al.*, 2014a et 2014b), et la proclamation par les Nations unies de l'année internationale des sols en 2015.

Ces actions proviennent de la prise de conscience, relativement récente, que les sols sont une ressource qui n'est généralement pas renouvelable à une échelle de temps compatible avec les vitesses avec lesquelles elle est susceptible de se dégrader. Les sols sont en équilibre dynamique avec les facteurs du milieu, dont l'homme fait partie intégrante. Son action peut être déterminante quant à l'évolution des sols : les pressions anthropiques étant pour la plupart en augmentation, les menaces sur les sols deviennent de plus en plus préoccupantes. Certaines de ces menaces sont plus graves pour les sols forestiers car ils sont le plus souvent gérés de manière extensive.

Les menaces principales sont listées ci-dessous :

- l'érosion,
- la baisse des teneurs en matières organiques,
- la disparition des sols sous les constructions ou les infrastructures,
- la contamination, ponctuelle ou diffuse,
- l'acidification,
- la baisse de fertilité ou le déséquilibre nutritionnel pour les plantes,
- la diminution de la biodiversité des sols,
- le tassement.

Ces menaces ne concernent pas les sols forestiers de manière égale et, dans beaucoup de cas, l'intensité de ces menaces diffère entre les sols forestiers et les sols agricoles.

## QUELLES MENACES PÈSENT SUR LES SOLS FORESTIERS ?

**L'érosion** des sols est un problème majeur dans de grandes parties du monde (en particulier en Chine). En France, on estime qu'environ 20 % du territoire métropolitain est concerné par une érosion conduisant à une situation non durable : en d'autres termes, les masses de sol perdues par érosion sont supérieures à celles formées par l'altération et la pédogenèse. Les surfaces touchées sont principalement des terres arables. Cependant, en sol forestier, l'érosion n'est généralement pas un problème majeur, car le sol est protégé de l'impact de la pluie par le couvert forestier, le sous-bois, et l'accumulation de débris et de matière organique en surface. Toutefois, elle peut survenir dans des situations de forte pente et pour certaines pratiques (coupe à blanc et maintien du sol nu, tassement excessif), ou en particulier en zone méditerranéenne, suite aux incendies. Dans ces cas, des conséquences très néfastes peuvent être observées (ravinement, ablation de la couche de surface des sols la plus riche en éléments nutritifs, inondations boueuses en aval, etc.).

**La baisse des teneurs en matière organique** concerne également peu les sols forestiers. En France, on estime que les sols sous forêt contiennent environ une fois et demie plus de carbone organique que les sols cultivés, et d'autant plus que le climat est froid (Meersmans *et al.*, 2012a et 2012b). Les risques de perte de matière organique (et donc de flux de CO<sub>2</sub> associés vers l'atmosphère) proviennent principalement des changements d'usage (déforestation) et d'un effet éventuel du changement climatique (augmentation de la vitesse de minéralisation ou diminution des apports en C par

la végétation), voire d'une intensification trop forte des prélèvements (branches, bois mort, etc.). Si l'on raisonne globalement à l'échelle de la France, les sols forestiers sont actuellement un puits de carbone, principalement du fait de l'extension des surfaces des accrues et de la forêt.

**La disparition des sols sous les constructions ou les infrastructures** affecte la surface d'un département français (6100 km<sup>2</sup>) tous les 7 ans. Elle concerne en grande majorité les sols agricoles : de l'ordre de 90 % des surfaces artificialisées concernent ainsi chaque année les sols agricoles. Cependant, il existe des situations locales où la pression de l'urbanisation est telle que certains sols forestiers sont artificialisés. Ceci concerne principalement les zones côtières, certaines zones de montagne ou de vallées montagnardes où l'espace constructible est contraint par la topographie ou les caractéristiques géotechniques du sous-sol, et certaines zones où la valeur des terres affectées à d'autres usages que la forêt est telle que l'emprise urbaine se développe au détriment de cette dernière (par exemple, sur le pourtour de l'agglomération bordelaise où la forêt des Landes de Gascogne est progressivement urbanisée tandis que les zones d'AOC viticoles sont mieux préservées). La préservation des sols forestiers en milieu périurbain est favorisée par leur fonction de « ceinture verte » et d'espace récréatif. Ils peuvent toutefois être affectés par de grands aménagements linéaires (autoroutes, lignes à grande vitesse...) lorsque le contournement des forêts pose des problèmes techniques ou économiques.

**La contamination ponctuelle ou diffuse** affecte en règle générale moins les sols forestiers que les sols agricoles du fait de l'apport de moins d'intrants contenant des substances potentiellement toxiques (en particulier les pesticides). Toutefois, la forêt n'est pas à l'abri des contaminations diffuses généralisées d'origine atmosphérique lointaine, ou liées à des rejets atmosphériques proches (Villanneau *et al.*, 2009, 2013). Dans ce cas, les sols forestiers peuvent même être plus touchés du fait de l'interception de ces rejets par le couvert forestier, et de leur retombée au sol sous l'effet des pluies. En outre, le caractère acide de bon nombre de sols forestiers accentue la mobilité de certains éléments potentiellement toxiques.

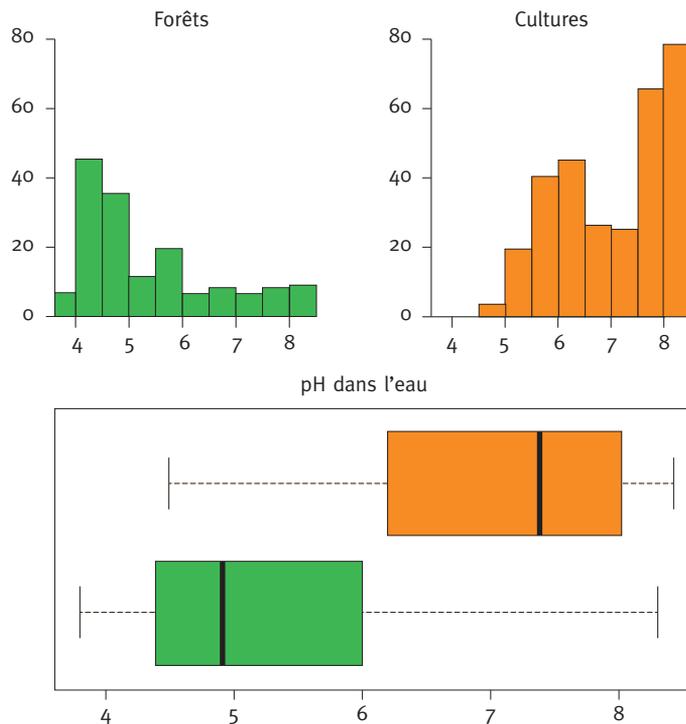
Si ces questions sont assez bien gérées en milieu agricole par les pratiques de chaulage et de fertilisation, **l'acidification et le maintien de la fertilité chimique** peuvent constituer de réels problèmes en sol forestier lorsque le matériau parental ne contient pas assez de réserves alcalines, libérables par altération des minéraux. La perspective d'une augmentation possible des prélèvements de biomasse en forêt (bois morts, rémanents, exploitation des branches des houppiers, etc.) pose par ailleurs la question du maintien d'un bilan suffisant en éléments nutritifs dans les sols. On sait également qu'il existe des risques de déséquilibres nutritifs suite à des apports de mono-éléments (par exemple, dépôts d'azote atmosphérique). Les questions de l'entretien des sols forestiers acides par chaulage et de leur fertilisation restent donc entières. Certaines évolutions du pH à la baisse pourraient amener à franchir des seuils plus ou moins irréversibles de fonctionnement et de pédogénèse de certains sols. La figure 1 (p. 410) illustre bien le contraste entre la distribution du pH des sols agricoles et celle des sols forestiers. Sous culture, on observe une distribution bimodale et assez peu de pH très acides. Les « pics » de pH élevé sont principalement liés à une « recharge » permanente en cations principalement attribuable au travail du sol ou à l'érosion sur les sols calcaires peu profonds. Sous forêt, la distribution met en évidence beaucoup de pH très acides, et montre qu'à l'exception de sols développés sur des matériaux très calcaires facilement altérables, donc tamponnés quant aux variations de leur pH, ou de ceux renouvelés constamment par érosion, l'évolution naturelle des sols sous nos climats conduit à une perte en cations et à une acidification.

**La biodiversité** dans les sols forestiers présente des caractéristiques très contrastées, principalement liées à la richesse en substrats nutritifs et aux caractéristiques physicochimiques des sols (Dequiedt *et al.*, 2011). Dans des sols « riches », bien pourvus en substrats organiques, en cations et en particules minérales fines, cette biodiversité peut être remarquable. À l'inverse, dans des sols acides, sableux et quartzeux, comme par exemple dans les Landes de Gascogne, elle peut être réduite

au minimum. L'exportation systématique des rémanents peut accentuer cette baisse de biodiversité. Le maintien d'une activité biologique des sols est une des conditions du recyclage des éléments minéraux, mais aussi de l'oxygénation des sols et de leur capacité de résilience après un tassement.

FIGURE 1

**DISTRIBUTION DU pH DANS LA COUCHE 0-30 cm  
DES SOLS AGRICOLES ET DES SOLS FORESTIERS DE FRANCE MÉTROPOLITAINE**  
Statistiques extraites du réseau de mesure de la qualité des sols



**Le tassement** des sols forestiers est un problème relativement nouveau lié au développement de la mécanisation et aux récentes tempêtes qui ont accentué cette pratique, du fait de l'urgence du débardage des forêts après ces dernières. La restauration « naturelle » de la structure des sols implique soit une capacité de restructuration sous l'effet du climat (par exemple de par la présence d'argiles gonflantes), soit une activité biologique intense (par exemple par des animaux fouisseurs). Il y a donc ici également une interaction avec des caractéristiques intrinsèques relativement stables des sols (comme la granulométrie) et d'autres évoluant plus rapidement, comme le pH. En effet, comme vu plus haut, l'activité biologique se réduit considérablement avec l'acidité du sol. De fait, les quelques travaux existant en France montrent que sur des sols sensibles à texture fine, tels que ceux du Plateau lorrain, la dégradation peut être très rapide, quelques mois suffisent pour que les effets de l'anoxie et de l'hydromorphie se traduisent sur leur morphologie. La restauration est par contre très lente (localisée aux horizons de surface, 7 ans après le tassement expérimental dans l'exemple lorrain) et pose la question des dégâts futurs, quand les engins circuleront sur des sols non restaurés (Pousse *et al.*, 2014) : le syndrome de la semelle de labour plane sur les sols forestiers, avec des conséquences prévisibles quant à la sensibilité aux stress des futurs peuplements.

## LE « FUTUR » DES SOLS FORESTIERS, LEUR ÉVOLUTION ET LES CHANGEMENTS GLOBAUX

La production forestière doit, du fait de la durée de la croissance des arbres, envisager une forte adaptation au changement climatique. Compte tenu des incertitudes qui pèsent sur ces changements à moyen et long terme, et sur leurs conséquences sur les sols, la question est loin d'être aisée. Au-delà de la gestion immédiate des peuplements, une des questions est l'adaptation des espèces à ces changements. Le recours à des modèles permet en partie de prédire certaines aires de répartition favorables, mais reste entaché d'une très forte incertitude (par exemple, Loustau *et al.*, 2004). En outre, la plupart de ces prédictions se font en considérant la constance des propriétés des sols dans le temps. Or, les changements globaux sont susceptibles d'influer rapidement sur bon nombre de leurs propriétés. Par exemple, une augmentation de la température pourrait accélérer les processus de minéralisation de la matière organique des sols ; une fréquence plus élevée des tempêtes pourrait perturber la structuration verticale des horizons des sols (c'est déjà le cas dans les Landes de Gascogne), accélérer la minéralisation de leur matière organique et favoriser de nouveaux tassements liés aux passages d'engins pour le débardage ; une augmentation des phénomènes de sécheresse extrême pourrait modifier profondément la structure des sols et leurs capacités d'infiltration et de rétention en eau...

### CONCLUSIONS

Nous disposons en théorie de nombreux outils pour évaluer l'état actuel des sols forestiers et juger des mesures de gestion à prendre. Ces outils ne sont cependant utilisables que s'ils sont reliés à des références. Ces références ont été acquises dans le cadre de nombreux programmes (catalogues des stations forestières, cartes pédologiques, réseaux RENECOFOR, BIOSOL, RMQS...). Elles ne sont cependant pas encore suffisamment complètes et détaillées pour permettre une application à la parcelle sans un diagnostic qui nécessite un retour local. Des outils de prévision et de simulation existent, mais l'observation et le suivi demeurent indispensables, à la fois pour valider les prédictions de ces outils et pour mettre en évidence de nouvelles tendances qui n'auraient pas été anticipées.

Plus généralement, la fertilité chimique des sols forestiers, qui est l'une des questions centrales de ce numéro thématique, dépend essentiellement de flux, relativement ténus et difficilement mesurables, plutôt que de teneurs et de stocks qui sont les variables dont on dispose aux échelles les plus globales. Ne disposer que de variables d'état à ces échelles pose le problème de la prévision fiable d'une dynamique de fonctionnement.

Aujourd'hui, du fait d'une pression anthropique accrue et des changements globaux, le maintien de la qualité des sols forestiers doit revenir au premier plan de nos préoccupations. C'est l'objet des Ateliers REGEFOR 2013 et de leurs actes, publiés dans ce numéro thématique de la *Revue forestière française*.

Dominique ARROUAYS  
INRA Centre Val de Loire  
Unité InfoSol, US 1106  
2163 avenue de la Pomme de Pin  
CS 40001 Ardon  
F-45075 ORLÉANS CEDEX 2  
(Dominique.Arrouays@orleans.inra.fr)

Jacques RANGER  
INRA Centre de Nancy-Lorraine  
Unité Biogéochimie des écosystèmes forestiers  
F-54280 CHAMPENOUX  
(ranger@nancy.inra.fr)

## BIBLIOGRAPHIE

- ARROUAYS (D.), GRUNDY (M.G.), HARTEMINK (A.E.), HEMPEL (J.W.), HEUVELINK (G.B.M.), HONG (S.Y.), LAGACHERIE (P.), LELYK (G.), MCBRATNEY (A.B.), MCKENZIE (N.J.), MENDONÇA-SANTOS (M.D.), MINASNY (B.), MONTANARELLA (L.), ODEH (I.O.A.), SANCHEZ (P.A.), THOMPSON (J.A.), ZHANG (G.L.) — GlobalSoilMap: towards a fine-resolution global grid of soil properties. — *Advances in Agronomy*, 125, 2014a, pp. 93-134.
- ARROUAYS (D.), MCKENZIE (N.J.), HEMPEL (J.), RICHER DE FORGES (A.C.), MCBRATNEY (A.B.), eds. — GlobalSoilMap. Basis of the global spatial soil information system. — CRC Press, Taylor & Francis, 2014b. — 478 p.
- DEQUIEDT (S.), SABY (N.P.A.), LELIEVRE (M.), JOLIVET (C.) THIOULOUSE (J.), TOUTAIN (B.), ARROUAYS (D.), BISPO (A.), LEMANCEAU (P.), RANJARD (L.). — Biogeographical Patterns of Soil Molecular Microbial Biomass as Influenced by Soil Characteristics and Management. — *Global Ecology and Biogeography*, 20, 2011, pp. 641-652.
- LOUSTAU (D.), BOSCH (A.), COLIN (A.), DAVI (H.), FRANÇOIS (C.), DUFRÊNE (E.), DÉQUÉ (M.), CLOPPET (E.), ARROUAYS (D.), LE BAS (C.), SABY (N.), PIGNARD (G.), HAMZA (N.), GRANIER (A.), VIOVY (N.), OGÉE (J.), DELAGE (J.). — Modelling the climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub regional level. — *Tree Physiology*, 25, 2005, pp. 813-823.
- MCBRATNEY (A.B.), FIELD (D.J.), KOCH (A.). — The dimensions of soil security. — *Geoderma*, 213, 2014, pp. 203-213.
- MEERSMANS (J.), MARTIN (M.P.), DE RIDDER (F.), LACARCE (E.), WETTERLIND (J.), DE BAETS (S.), LE BAS (C.), JOLIVET (C.C.), BOULONNE (L.), LEHMANN (S.), SABY (N.P.A.), BISPO (A.), ARROUAYS (D.). — A novel soil organic C model using climate, soil type and management data at the national scale (France). — *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 2012a, pp. 873-888.
- MEERSMANS (J.), MARTIN (M.P.), LACARCE (E.), DE BAETS (S.), JOLIVET (C.), BOULONNE (L.), LEHMANN (S.), SABY (N.P.A.), BISPO (A.), ARROUAYS (D.). — A high resolution map of the French soil organic carbon. — *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 2012b, pp. 841-851.
- POUSSE (N.), BOCK (J.), RANGER (J.). — Impacts de la circulation d'un porteur forestier sur deux sols sensibles au tassement et dynamique de restauration naturelle. — *Rendez-Vous techniques*, n° 43, 2014, pp. 33-39.
- VILLANNEAU (E.), SABY (N.P.A.), ARROUAYS (D.), JOLIVET (C.C.), BOULONNE (L.), CARIA (G.), BARRIUSO (E.), BISPO (A.), BRIAND (O.). — Spatial distribution of lindane in topsoil of northern France. — *Chemosphere*, 77, 2009, pp. 1249-1255.
- VILLANNEAU (E.J.), SABY (N.P.A.), ORTON (T.G.), JOLIVET (C.C.), BOULONNE (L.), CARIA (G.), BARRIUSO (E.), BISPO (A.), BRIAND (O.), ARROUAYS (D.). — First evidence of large-scale PAH trends in French soils. — *Environmental Chemistry Letters*, vol. 11, n° 1, 2013, p. 99-104.