

LE SUIVI DES SOLS FORESTIERS ET LES INDICATEURS DE FERTILITÉ

L'APPORT DES DISPOSITIFS DE SUIVI VIS-À-VIS DES ENJEUX DE FONCTIONNEMENT ET DE GESTION DES ÉCOSYSTÈMES EN RELATION AVEC LES SOLS

MANUEL NICOLAS – CLAUDY JOLIVET – MATHIEU JONARD

Les changements environnementaux, particulièrement les pollutions atmosphériques et le changement climatique, pèsent fortement sur le fonctionnement futur des écosystèmes et donc sur la manière la plus adaptée de les gérer. Malgré les nombreux acquis de la recherche, une bonne part de la complexité de notre environnement reste mal comprise ; les modèles de prévision d'impact peinent souvent à reproduire les phénomènes observés, plus encore à les anticiper. Qui plus est, les changements environnementaux peuvent générer des conditions inédites remettant en question la validité d'une partie des connaissances acquises jusqu'ici et sur lesquelles les prédictions ont besoin de s'appuyer, à l'image par exemple des connaissances sur la sensibilité des arbres forestiers au climat (Lebourgeois et Mérian, 2011).

Face à la complexité des phénomènes en jeu, des réseaux de suivi à long terme ont été mis en place aux échelles nationale et internationale pour observer les évolutions en cours sur des sites d'observation permanents. L'objectif est non seulement d'être en mesure de détecter et quantifier des évolutions temporelles dans le fonctionnement des écosystèmes mais aussi de les corrélérer avec les facteurs d'influence externes. Ces réseaux de suivi s'inscrivent dans un continuum plus large de dispositifs d'observation environnementale (Ferretti *et al.*, 2013). Ils occupent une position clé pour les besoins de généralisation des connaissances, entre :

- les sites-ateliers de recherche, lourdement instrumentés dans le but de comprendre les mécanismes de fonctionnement des écosystèmes, mais nécessairement peu nombreux et qui ne peuvent représenter la diversité des contextes,
- et les données d'inventaire ou de télédétection, visant une couverture spatiale très dense mais limitées à des paramètres plus simples ou très intégrateurs et sans nécessairement de continuité à long terme.

En France métropolitaine, trois réseaux nationaux de suivi s'intéressent à l'évolution du sol ou de la forêt en relation avec le sol. Il s'agit ici d'en résumer les caractéristiques et complémentarités puis d'en présenter les principaux apports dans la réponse aux questions prégnantes sur les sols.

PRÉSENTATION DES RÉSEAUX DE SUIVI DES SOLS OU DES FORÊTS EN RELATION AVEC LES SOLS

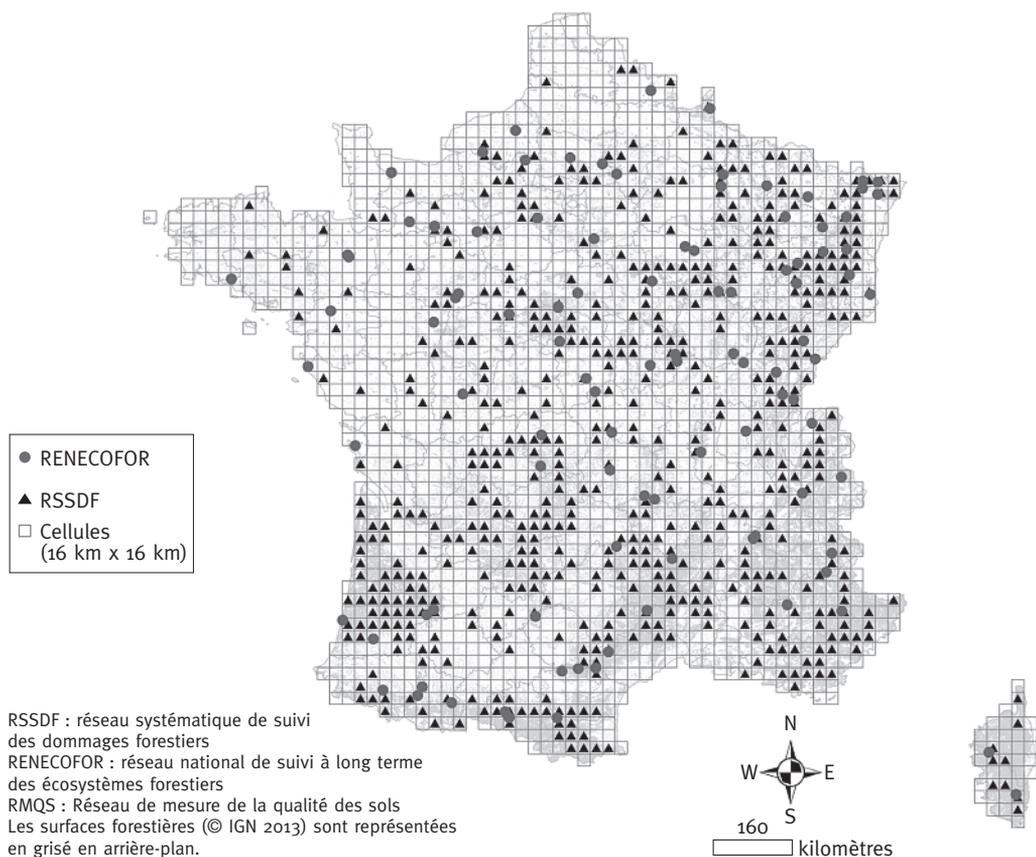
Objectifs, conceptions et complémentarités d'approche des sols

Le tableau I (p. 492) synthétise les principales caractéristiques des trois réseaux présentés et leur répartition spatiale est illustrée par la figure 1 (p. 492).

TABLEAU I Synthèse des caractéristiques des réseaux français de suivi des sols et des forêts en relation avec les sols

Réseau	Extension	Coordination nationale	Objectifs
RMQS : Réseau de mesures de la qualité des sols	Suivi extensif sur maillage 16 km x 16 km	Unité InfoSol INRA Val de Loire	Suivi des sols (forêt + autres usages)
RSSDF : Réseau systématique de suivi des dommages forestiers	(~200 placettes dont ~550 en forêt)	Département Santé des Forêts (ministère de l'Agriculture)	Suivi de la santé des arbres forestiers + caractérisation des sols et de la végétation
RENECOFOR : Réseau de suivi des écosystèmes forestiers	Suivi intensif (multi-domaine) (102 placettes)	Office national des forêts	Suivi des écosystèmes forestiers (peuplement, flore, sol...) en réponse aux facteurs externes (météo, dépôts, gestion...)

FIGURE 1 RÉPARTITION EN FRANCE MÉTROPOLITAINE DES RÉSEAUX DE SURVEILLANCE DES SOLS OU DES FORÊTS EN RELATION AVEC LES SOLS



Intégration européenne	Campagnes d'échantillonnage de sol	Répétitions par placette et par couche de sol	Couches de sol
Non	1 ^{re} : 2000-2009 2 ^e en projet : 2015-2026	25 prélèvements à la tarière, 1 composite analysé	Litière 0-30 cm 30-50 cm
<i>ICP Forests Level I</i>	1 ^{re} : 1993-1995 2 ^e : 2006-2007 Protocoles non directement comparables	1 prélèvement sur fosse ou 6 à la tarière, 1 composite analysé	Litière 0-10 cm 10-20 cm 20-40 cm 40-80 cm
<i>ICP Forests Level II</i>	1 ^{re} : 1993-1995 2 ^e : 2007-2012	25 prélèvements sur mini-fosses, 5 composites analysés	Litière 0-10 cm 10-20 cm 20-40 cm

Le réseau systématique de suivi des dommages forestiers (RSSDF) et le réseau RENECOFOR ont été mis en place respectivement en 1989 et 1992 en réponse aux craintes soulevées par les « pluies acides » sur l'avenir des forêts (Barthod, 1994). Ils sont les deux composantes françaises du suivi continu (en anglais *monitoring*) forestier paneuropéen (programme *ICP Forests*) qui s'est développé sous l'égide de la Convention des Nations unies sur les pollutions atmosphériques transfrontières à longue distance, en étroite articulation (période 1987-2006) avec la Commission européenne.

— Le réseau systématique de suivi des dommages forestiers (RSSDF) représente la composante extensive du monitoring forestier paneuropéen. Il comprend environ 550 placettes permanentes réparties sur un maillage systématique de 16 km x 16 km sur lesquelles est suivi annuellement l'état de santé des arbres. Il a fait l'objet d'une première campagne de description et d'analyse des sols en 1993-1995 (Badeau, 1998), sans but initial de suivi temporel mais uniquement de caractérisation écologique, avec notamment un seul point de prélèvement par placette à l'endroit de la fosse de description. Une seconde campagne a été financée par l'Union européenne (programme Biosoil) en 2007-2008, suivant une méthodologie plus exigeante et plus harmonisée à l'échelle continentale mais non directement comparable à celle utilisée en 1993-1995 (Badeau *et al.*, 2009). Dans d'autres pays européens, qui avaient réalisé leur premier inventaire dans un souci de le reproduire (et qui avaient un échantillonnage de meilleure qualité), cette campagne avait une portée plus forte qu'en France.

— Le réseau RENECOFOR représente la composante intensive du monitoring forestier paneuropéen (Ulrich, 1995). Composé de 102 placettes permanentes réparties dans les principaux contextes de forêt de production, il vise à suivre l'évolution des écosystèmes forestiers à travers de nombreux paramètres (croissance, phénologie, nutrition et santé des arbres ; chutes de litière ; fertilité des sols ; composition floristique), en prenant en compte les variations environnementales qu'ils subissent (pollutions atmosphériques, météorologie, effets des interventions sylvicoles et des tempêtes). Le suivi des propriétés physicochimiques des sols a donné lieu à deux campagnes en 1993-1995 et 2007-2012 suivant des méthodologies strictement comparables et intégrant 25 répétitions de prélèvement en 5 répétitions d'analyse par placette (Ulrich *et al.*, 2009). Ces prélèvements ne sont pas réalisés à la tarière mais sur des mini-fosses jusqu'à 40 cm de profondeur de manière à maximiser la représentativité des prélèvements jusque dans les contextes les plus caillouteux. Au-delà de 40 cm, des prélèvements ont été réalisés sur les fosses de description et sans suivi temporel.

Créé en 2000, le réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) suit spécifiquement la qualité des sols. Il comprend 2 200 placettes permanentes réparties suivant le même maillage extensif de 16 km × 16 km que le réseau systématique de suivi des dommages forestiers mais étendu à l'ensemble des usages des sols (cultures, prairies, milieux naturels) et également aux départements d'outre-mer. En contexte forestier, les placettes du RMQS ont été installées à proximité immédiate des placettes du réseau systématique de suivi des dommages forestiers. Sans être quantifiée, la variabilité spatiale au sein de chaque placette du RMQS est intégrée sur 25 répétitions de prélèvement à la tarière, collectées en surface (couche holorganique si présente et 0-30 cm) et subsurface (30-50 cm). Les sols de chaque site sont également décrits et échantillonnés à partir de fosses pédologiques. Jusqu'à maintenant le réseau RMQS a fait l'objet d'une seule campagne de mesure entre 2000 et 2009 ; la prochaine campagne est prévue à compter de 2015. Contrairement aux réseaux forestiers, et bien que des réseaux de surveillance des sols existent dans d'autres pays européens, le RMQS est un dispositif national dont l'harmonisation avec les autres pays d'Europe peine à voir le jour, faute d'une directive cadre sur la protection des sols imposant cette harmonisation, dont les contours ont pourtant été clairement identifiés dans les conclusions du projet européen Envasso (Morvan *et al.*, 2008).

Mesures réalisées sur les sols

L'ensemble des placettes des trois réseaux de suivi ici présentés ont fait l'objet à la fois de descriptions des sols et d'analyses de leurs propriétés physicochimiques.

Les descriptions de sols, réalisées sur fosse et par horizon, s'appuient sur des critères morphologiques très complets et standardisés au sein de chaque réseau. Outre leur mise en forme en base de données, les résultats de description de sol du réseau RENECOFOR ont notamment fait l'objet d'un rapport exhaustif et illustré par des photographies de profils (Brêthes *et al.*, 1997).

Les analyses physicochimiques sont détaillées par couche de profondeur systématique pour le sol minéral afin d'assurer leur comparabilité entre placettes d'un même réseau. Les couches systématiques considérées sont les mêmes pour les deux réseaux forestiers et à l'échelle paneuropéenne ; celles du réseau RMQS sont différentes et répondent aux besoins d'intégration et de comparaison des diverses situations d'occupation des sols (sols agricoles, forestiers, prairiaux, etc.). Concernant les paramètres analysés, les deux réseaux forestiers visent principalement à évaluer la fertilité des sols (mesures de carbone organique, azote total, pH, éléments échangeables, densité apparente, granulométrie) suivant des méthodes pour l'essentiel identiques et harmonisées à l'échelle paneuropéenne. En cohérence avec ses objectifs propres, le réseau RMQS mesure la fertilité suivant des méthodes d'analyse plus universelles vis-à-vis des différents usages des sols de ce réseau et considère également d'autres paramètres de la qualité des sols tels que la biodiversité (micro-organismes, faune du sol, pathogènes) et la caractérisation approfondie des constituants organiques (matières organiques particulières, mesures spectrales en proche et moyen infrarouge, *black carbon*). Enfin, ce réseau a vocation à évaluer et à suivre à long terme les niveaux de contamination des sols par l'analyse de contaminants minéraux (éléments traces) et organiques (HAP, PCB, dioxines, pesticides, etc.). L'essentiel des analyses chimiques de sol des trois réseaux a été réalisé par le laboratoire d'analyse des sols (LAS) de l'INRA d'Arras, considéré comme laboratoire de référence européen suivant ses performances aux essais inter-laboratoires du programme *ICP Forests*. Dans le cadre du programme européen Biosoil cité plus haut, il est à noter que l'ensemble des pays participants devait transmettre au LAS un doublon de 10 % de leurs échantillons de sol pour contrôler la qualité de leurs analyses chimiques.

Des exigences communes de qualité liées aux objectifs de suivi

La mise en place d'un suivi temporel nécessite des exigences de qualité pour assurer la comparabilité effective des observations entre placettes et à long terme. Les trois réseaux considérés ici ont en commun un certain nombre de caractéristiques :

- Ils sont basés sur des placettes permanentes conçues pour accueillir l'ensemble des activités de suivi et pour minimiser les risques d'artefact liés notamment aux prélèvements destructifs.
- Les protocoles utilisés sont décrits précisément et mis à jour suivant des versions incrémentées en veillant particulièrement à la continuité des mesures.
- Les opérateurs sont formés pour chaque activité de suivi, et les changements d'opérateurs sont réduits au maximum pour une application la plus homogène des protocoles de suivi.
- Les incertitudes de mesure sont quantifiées le plus souvent possible et mises en regard de l'amplitude des variations observées. Les laboratoires d'analyse chimique contribuant aux réseaux du programme paneuropéen *ICP Forests* font notamment l'objet d'essais inter-laboratoires réguliers sur la base d'échantillons prélevés dans les conditions usuelles de suivi.
- Tous les échantillons de sol ainsi que les échantillons végétaux sont séchés et archivés, afin de pouvoir répéter ou compléter les analyses chimiques.
- Les données acquises sont mises en forme dans des bases de données structurées, validées et documentées, en cohérence avec les protocoles de suivi.

SYNTHÈSE DES APPORTS ACTUELS DES RÉSEAUX DE SUIVI SUR LES SOLS

Apport 1 : des inventaires inédits de la qualité des sols

La mise en place des réseaux de suivi a d'abord apporté des inventaires inédits suivant des méthodologies homogènes à grande échelle pour de nombreux paramètres des écosystèmes et notamment sur la qualité des sols. Les résultats des campagnes menées au sein du réseau systématique de suivi des dommages forestiers et du réseau RENECOFOR ont servi à documenter l'état de la fertilité chimique des sols forestiers à l'échelle nationale (Ponette *et al.*, 1997 ; Badeau, 1998 ; Badeau *et al.*, 1999). À l'échelle continentale, le programme Biosoil a permis de renouveler avec des améliorations substantielles l'état de connaissance des sols forestiers sur un total de plus de 5 000 placettes permanentes du programme *ICP Forests* (De Vos et Cools, 2011). Concernant le réseau RMQS, sa première campagne (2000-2009) a permis d'établir des valeurs de référence pour un grand nombre de paramètres pour les sols français (Arrouays *et al.*, 2011 ; Gis Sol, 2011) et en particulier d'évaluer l'extension de nombreux contaminants des sols à l'échelle du territoire (Saby *et al.*, 2012 ; Villanneau *et al.*, 2013). Elle a également permis d'améliorer l'évaluation des stocks de carbone organique des sols du territoire métropolitain et d'y associer des valeurs d'incertitude (Martin *et al.*, 2011 ; Meersmans *et al.*, 2012). Enfin, la diversité des situations prises en compte par le RMQS a offert une possibilité de comparaison inédite de la qualité des sols de France suivant leur usage, en considérant non seulement la fertilité chimique (pH, taux de saturation en base, carbone organique...) mais aussi d'autres paramètres tels que la quantité d'ADN microbien (Dequiedt *et al.*, 2011).

Apport 2 : des premiers résultats de suivi temporel encourageants

La réalisation récente entre 2007 et 2012 de la seconde campagne d'analyse de sol sur les 102 placettes du réseau RENECOFOR offre les premières possibilités de détecter les évolutions de leurs propriétés à l'échelle nationale suivant une méthodologie comparable aux mesures initiales effectuées entre 1993 et 1995. Une première analyse de ces données a été réalisée dès 2013 avec le soutien du ministère de l'Agriculture au sujet de l'évolution des stocks de carbone organique mesurée dans les litières et sols forestiers (Jonard *et al.*, 2013). Il s'agissait notamment de vérifier

l'hypothèse faite dans les engagements internationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre selon laquelle les litières et sols forestiers ne seraient pas une source d'émission nette de carbone. Les résultats mettent en évidence des évolutions significatives sur un intervalle d'une quinzaine d'années. À l'échelle de l'ensemble des sites et en considérant la somme des couches de litière et de sol minéral jusqu'à 40 cm de profondeur, les stocks de carbone augmentent significativement suivant une amplitude moyenne de + 0,34 tC/ha/an. De plus, la répétition des analyses en 5 grappes par placette permet de quantifier la variabilité spatiale et de distinguer des évolutions temporelles significatives sur 25 % à 55 % des placettes suivant les couches, la plupart dans le sens d'une augmentation mais certaines également dans le sens d'une diminution du stock de carbone. Les évolutions significatives sont plus nombreuses dans les couches les plus superficielles, la plus faible évolution mise en évidence correspondant à une amplitude égale à 8,4 % du stock initial. Outre leur intérêt sur la question spécifique des stocks de carbone, ces premiers résultats sont encourageants pour la suite des analyses d'évolutions prévues au sujet des autres paramètres de fertilité chimique (azote total, pH, éléments échangeables, phosphore extractible).

Apport 3 : suivi de la réaction des forêts en lien avec les propriétés des sols

En plus de sa continuité temporelle, l'intérêt du suivi intensif mené sur le réseau RENECOFOR réside dans la possibilité de mettre en relation entre elles les évolutions observées dans différents compartiments de l'écosystème. En l'occurrence, les mesures des propriétés chimiques des sols effectuées sur les placettes du réseau apportent des éléments essentiels dans la compréhension de l'évolution de l'équilibre des nutriments au sein des écosystèmes forestiers. Concernant la nutrition des arbres, la diminution des teneurs foliaires en phosphore mise en évidence sur le réseau entre 1993 et 2005 apparaît plus accentuée sur sol acide que sur sol eutrophe (Croisé et Jonard, 2008). La répétition récente des analyses de sol offre une nouvelle perspective de comparaison de la tendance observée sur le phosphore foliaire avec une éventuelle évolution du phosphore extractible du sol. En conséquence de la baisse des dépôts atmosphériques acidifiants, il sera également intéressant de mettre en regard d'éventuelles évolutions du taux de saturation des sols avec les évolutions contrastées observées dans la chimie des solutions de sol sur 17 sites (Nicolas *et al.*, 2008). Enfin, au-delà de la recherche de corrélations entre les évolutions observées dans différents compartiments de l'écosystème, les données de suivi sont utiles pour vérifier la validité des connaissances actuelles sur les processus de fonctionnement des écosystèmes. Les données du réseau RENECOFOR servent notamment à valider les estimations de flux de nutriments issues de modèles de cycles biogéochimiques utilisés pour simuler l'effet de différents scénarios de dépôts atmosphériques, d'intensité d'exploitation ou encore de changements climatiques (Van der Heijden *et al.*, 2011 ; Jonard *et al.*, 2012).

Apport 4 : fourniture d'indicateurs pour l'orientation des politiques publiques

Les réseaux de suivi répondent également à un besoin d'appui aux politiques publiques. Dans le cadre de la convention des Nations unies sur les pollutions atmosphériques transfrontières à longue distance, il s'agit notamment de suivre l'évolution des contraintes d'acidification et d'eutrophisation induites par les dépôts atmosphériques au regard de la capacité des sols forestiers à les supporter. Les données du réseau RENECOFOR alimentent ainsi chaque année l'estimation des dépassements des seuils de charge critique d'acidification et d'eutrophisation, indicateurs suivant lesquels sont discutés les objectifs européens de réduction des émissions atmosphériques dans le cadre du Protocole de Göteborg (Posch *et al.*, 2012). Les données de propriétés des sols du réseau systématique de suivi des dommages forestiers et du réseau RENECOFOR sont également utilisées pour les indicateurs de gestion durable des forêts publiés tous les cinq ans aux échelles nationale et paneuropéenne. Dans le cadre des engagements internationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les données de la première campagne du réseau RMQS servent de référence nationale pour évaluer les stocks de carbone organique des sols par type d'occupation (forêt, prairies, cultures

annuelles, cultures pérennes) et estimer leur évolution en fonction des changements d'occupation du sol.

En outre, les données acquises par le RMQS sur la contamination des sols français en éléments traces ont permis d'appuyer la mise en œuvre des politiques publiques établies dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués. Des indicateurs de seuils de détection d'anomalie ont été mis à disposition des professionnels de la dépollution des sols (DREAL – services déconcentrés de l'État en région, bureaux d'études, consultants, municipalités, etc.) pour faciliter la mise en œuvre de la démarche d'interprétation de l'état des milieux (IEM) et des plans de gestion des sites. Les mesures de polluants organiques persistants (herbicides, furanes, polychlorobiphényles – PCB –, hydrocarbures aromatiques polycycliques – HAP –, pesticides organochlorés – OCP –) servent de références et alimentent l'Observatoire des résidus de pesticides. L'ensemble des données sur les contaminants est utilisé par l'INERIS pour la construction d'outils de diagnostic dans le cadre de la thématique des inégalités environnementales et des points noirs environnementaux, largement reprise comme axe majeur du prochain Plan national santé environnement (PNSE3).

Enfin, les données du RMQS permettent au Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du ministère en charge de l'Écologie d'établir les indicateurs sur les sols, nécessaires pour alimenter ses outils de mise à disposition d'informations sur internet (cartographie interactive Géoïdd, rapport sur l'état des sols de France, publications, etc.), mais également pour assurer les rapportages portant sur les sols auprès des instances européennes (Commission européenne, Agence européenne de l'Environnement, Eurostat, OCDE).

Apport 5 : support de recherches

Enfin, les réseaux de suivi offrent à la recherche et au développement des supports et des références méthodologiques :

- les résultats de suivi recueillis dans des bases de données structurées sont mis à disposition sur demande ;

- les échantillons archivés en pédothèque peuvent être aussi mis à disposition sur demande.

La fourniture d'échantillons à la recherche constitue même un des objectifs ayant motivé la mise en place du réseau RMQS ;

- les sites peuvent accueillir des mesures complémentaires ou servir de témoins d'expérimentation, à condition que ces travaux ne perturbent pas les activités de suivi ;

- les méthodes, décrites et éprouvées, sont également disponibles.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Avec à peine plus de 20 ans de recul, les réseaux de suivi restent très jeunes au regard de la vitesse d'évolution de leurs objets d'étude que sont les sols et les forêts. En particulier le suivi de la qualité des sols commence tout juste à apporter des résultats d'évolution temporelle. Pour autant, les réseaux de suivi ont déjà fait la preuve de leurs apports multiples et originaux à la connaissance des sols et des forêts, en lien étroit avec la recherche. Qui plus est, il s'agit de dispositifs pionniers dans leur domaine qui font apparaître de manière inédite la variabilité spatiale et temporelle de nombreux paramètres et qui ont accumulé un savoir-faire à part entière dans l'observation de l'environnement.

À l'avenir, les possibilités d'utilisation des résultats de suivi vont croître à mesure que s'allongent les séries de données acquises. On peut prévoir que les attentes se renforcent et se diversifient du

fait des changements environnementaux et des modes de gestion des forêts. Ainsi, certains paramètres comme le tassement des sols peuvent constituer de nouveaux enjeux de suivi.

Cependant, la continuité des réseaux de suivi n'est jamais acquise et nécessite un soutien politique constamment renouvelé. Un élément de fragilité particulier concerne la prise en compte de cette mission spécifique au sein des différents établissements publics qui portent ces activités, à savoir l'Office national des forêts, l'INRA et l'IGN, en plus ou moins fortes évolutions internes dans un contexte économique très tendu. L'absence de cadre juridique, et notamment d'une directive européenne sur les sols, renforcent cette vulnérabilité. Nous avons souhaité ici souligner toute l'importance de l'acquis et le besoin impérieux de poursuivre cette mission de suivi des sols et des forêts.

Manuel NICOLAS
OFFICE NATIONAL DES FORÊTS
Département Recherche et Développement
Boulevard de Constance
F-77300 FONTAINEBLEAU
(manuel.nicolas@onf.fr)

Claudy JOLIVET
INRA Centre de Recherches Val de Loire
2163 avenue de la Pomme de Pin
CS 40001 Ardon
F-45075 ORLÉANS CEDEX 2
(claudy.jolivet@orleans.inra.fr)

Mathieu JONARD
UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Earth and Life Institute/Environmental Sciences
(ELI-e)
Croix du Sud 2
B-1348 LOUVAIN-LA-NEUVE (BELGIQUE)
(mathieu.jonard@uclouvain.be)

BIBLIOGRAPHIE

- ARROUAYS (D.), SABY (N.), THIOULOZE (J.), JOLIVET (C.), BOULONNE (L.), RATIÉ (C.). — Large trends in French topsoil characteristics are revealed by spatially constrained multivariate analysis. — *Geoderma*, 161, 2011, pp. 107-114. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.12.002.
- BADEAU (V.). — Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers — Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. — Les cahiers du DSF, 5-1998. — Paris : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, DERE, 1998. — 211 p.
- BADEAU (V.), DAMBRINE (E.), WALTER (C.). — Propriétés des sols forestiers français : résultats du premier inventaire systématique. — *Étude et Gestion des Sols*, 6, 3, 1999, pp. 165-180.
- BADEAU (V.), RABASTENS (R.), NICOLAS (M.), ULRICH (E.). — Changes in the chemical and/or physical forest soil condition. First results of Biosoil in France. — The Biosoil project — Forest soil and biodiversity monitoring in the EU, Bruxelles, Belgique, 9 novembre 2009.
- BARTHOD (C.). — Le Système de surveillance de l'état sanitaire de la forêt en France. — *Revue forestière française*, vol. XLVI, n° 5, 1994, pp. 564-571.
- BRÊTHES (A.), ULRICH (E.), coordinateurs. — RENECOFOR — Caractéristiques pédologiques des 102 peuplements du réseau, observations de 1994/95. — Fontainebleau : Office national des forêts, Département des recherches techniques, 1997. — 573 p.
- CROISÉ (L.), JONARD (M.). — RENECOFOR — Évolution de la nutrition foliaire en 13 années de suivis : appauvrissement en phosphore, diminution modérée en azote et stabilité en soufre. — *Rendez-vous techniques de l'ONF*, hors-série n° 4 "15 ans de suivi des écosystèmes forestiers. Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR", 2008, p. 170.

- DEQUIEDT (S.), SABY (N.), 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*, vol. 20, n° 4, 2011, pp. 641-652. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00628.x
- DE VOS (B.), COOLS (N.). — Second European Forest Soil Condition Report. Volume I: Results of the BioSoil Soil Survey. INBO.R.2011.35. — Brussel: Research Institute for Nature and Forest, 2011. — 359 p.
- FERRETTI (M.), FISCHER (R.), MOFFAT (A.). — Terrestrial Methods in Forest Monitoring: Toward the Next Generation? pp. 483-496. *In*: Forest monitoring. Methods for terrestrial investigations in Europe with an overview of North America and Asia/M. Ferretti and R. Fischer (ed.). — Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2013 (Developments in Environmental Science; Vol. 12).
- GIS SOL. — L'État des sols de France. — Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 2011. — 188 p.
- JONARD (M.), CAIGNET (I.), PONETTE (Q.), NICOLAS (M.). — Évolution du carbone des sols forestiers de France métropolitaine — Détection et quantification à partir des données mesurées sur le réseau RENECOFOR. — Rapport final d'étude subventionnée par le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2013. — 55 p. + annexes de 304 p.
- JONARD (M.), LEGOUT (A.), NICOLAS (M.), DAMBRINE (E.), NYS (C.), ULRICH (E.), VAN DER PERRE (R.), PONETTE (Q.). — Deterioration of Norway spruce vitality despite a sharp decline in acid deposition: a long-term integrated perspective. — *Global Change Biology*, vol. 18, n° 2, 2012, pp. 711-725. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02550.x
- LEBOURGEOIS (F.), MÉRIAN (P.). — La Sensibilité au climat des arbres forestiers a-t-elle changé au cours du XX^e siècle ? — *Revue forestière française*, vol. LXIII, n° 1, 2011, pp. 17-32.
- MARTIN (M.), WATTENBACH (M.), SMITH (P.), MEERSMANS (J.), JOLIVET (C.), BOULONNE (L.), ARROUAYS (D.). — Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. — *Biogeosciences*, n° 8, 2011, pp. 1053-1065. DOI: 10.5194/bg-8-1053-2011.
- MEERSMANS (J.), MARTIN (M.), LACARCE (E.), DE BAETS (S.), JOLIVET (C.), BOULONNE (L.), LEHMANN (S.), SABY (N.), BISPO (A.), ARROUAYS (D.). — A high resolution map of French soil organic carbon. — *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, pp. 1-11, online. DOI: 10.1007/s13593-012-0086-9.
- MORVAN (X.), SABY (N.), ARROUAYS (D.), LE BAS (C.), JONES (R.J.A.), VERHEIJEN (F.G.A.), BELLAMY (P.H.), STEPHENS (M.), KIBBLEWHITE (M.G.). — Soil monitoring in Europe: A review of existing systems and requirements for harmonisation. — *Science of the Total Environment*, 391, 2008, pp. 1-12.
- NICOLAS (M.), DAMBRINE (E.), ULRICH (E.). — Évolution de l'acidité et dynamique des éléments nutritifs en forêt, premiers bilans. — *Rendez-vous techniques de l'ONF*, hors-série n° 4 "15 ans de suivi des écosystèmes forestiers. Résultats, acquis et perspectives de RENECOFOR", 2008, pp. 71-76.
- PONETTE (Q.), ULRICH (E.), BRÊTHES (A.), BONNEAU (M.), LANIER (M.). — RENECOFOR — Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau, campagne de mesures 1993/95. — Fontainebleau : Office national des forêts, Département des recherches techniques, 1997. — 427 p.
- POSCH (M.), SLOOTWEG (J.), HETTELINGH (J.-P.), eds. — Modelling and mapping of atmospherically-induced ecosystem impacts in Europe, CCE Status Report 2012. — Bilthoven (Netherlands): Coordination Center for Effects, RIVM, 2012. — 144 p.
- SABY (N.), MARCHANT (B.P.), LARK (R.M.), JOLIVET (C.), ARROUAYS (D.). — Robust geostatistical prediction of trace elements across France. — *Geoderma*, vol. 162, n° 3-4, 2011, pp. 303-311.
- ULRICH (E.). — Le Réseau RENECOFOR : objectifs et réalisation. — *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° 2, 1995, pp. 107-124.
- ULRICH (E.), CROISÉ (L.), LANIER (A.), BRÊTHES (A.), CECCHINI (S.). — RENECOFOR — Manuel de référence n° 4 pour l'échantillonnage des sols et des litières en grappes et la préparation des échantillons, 3^e version. — Fontainebleau : Office national des forêts, Direction technique et commerciale bois, Département recherche, 2009. — 41 p.
- VAN DER HEIJDEN (G.), LEGOUT (A.), NICOLAS (M.), ULRICH (E.), JOHNSON (D.W.), DAMBRINE (E.). — Long-term sustainability of forest ecosystems on sandstone in the Vosges Mountains (France) facing atmospheric deposition and silvicultural change. — *Forest Ecology and Management*, vol. 261, n° 3, 2011, pp. 730-740.
- VILLANNEAU (E.J.), SABY (N.P.A.), ORTON (T.G.), JOLIVET (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*, 11, 2013, pp. 99-104.

L'APPORT DES DISPOSITIFS DE SUIVI VIS-À-VIS DES ENJEUX DE FONCTIONNEMENT ET DE GESTION DES ÉCOSYSTÈMES EN RELATION AVEC LES SOLS (Résumé)

Face aux incertitudes liées aux changements environnementaux, les réseaux de suivi sont une source de données essentielle pour appréhender l'évolution des écosystèmes. En France, trois réseaux nationaux s'intéressent à l'évolution du sol ou de la forêt en relation avec les sols. Initialement conçus pour suivre l'effet des pollutions atmosphériques sur la santé des forêts, le réseau systématique de suivi des dommages forestiers et le réseau RENECOFOR correspondent aux deux composantes extensive et intensive du monitoring forestier paneuropéen (*ICP Forests*). Créé plus récemment, le RMQS suit spécifiquement la qualité des sols en étendant le maillage extensif du suivi forestier aux autres usages (cultures, prairies, milieux naturels). Initiatives pionnières et encore jeunes au regard de la vitesse d'évolution des sols et des forêts, ces réseaux ont néanmoins déjà apporté de nombreux résultats originaux et démontré leur potentiel à répondre à des attentes de plus en plus diversifiées.

HOW MONITORING NETWORKS CONTRIBUTE TO THE UNDERSTANDING AND TO THE MANAGEMENT OF SOIL AND FOREST ECOSYSTEMS? (Abstract)

Faced with the uncertainties linked to environmental change, the monitoring networks are an essential source of data in order to anticipate changes in ecosystems. In France, three national networks are concerned with the change in the soil and/or forest in relation to the soil. Initially designed to monitor the effect of atmospheric pollution on the health of forests, the systematic network for the monitoring of forest damage (RSSDF) and the RENECOFOR network correspond to the two extensive and intensive components of pan-European forest monitoring (*ICP Forests*). Created more recently, the RMQS specifically monitors soil quality by extending the grid for forest monitoring to other land uses (crops, meadows, natural or urban environments). Pioneering and recent initiatives regarding the speed of change of soils and forests, these networks have nonetheless already generated a large number of original results and have shown their potential to meet expectations that are becoming increasingly diversified.
