
Données de sols dans la forêt française:

état sommaire de l'existant et intérêt de leur mobilisation

J.-P. Party^(1*) et A. Granier⁽²⁾

- 1) SOL-CONSEIL, 251 route de La Wantzenau F-67000 Strasbourg - France
- 2) INRA, Unité Ecologie Forestière, UMR 1137, Centre de Nancy, F-54280 Champenoux - France

*: Auteur correspondant: jpparty@wanadoo.fr

RÉSUMÉ

Compte tenu de leur accumulation au cours des 25 dernières années, la mobilisation des dizaines de milliers de données existantes sur les sols forestiers présente un intérêt certain quant à leur généralisation cartographique. En effet, des besoins forestiers, pour lesquels leur utilisation s'avère aujourd'hui essentielle, ont été bien identifiés par le RMT Aforce « Adaptation des forêts au changement climatique » notamment vis-à-vis des flux et bilans d'eau et de leurs variations dans les écosystèmes forestiers (journées REGEFOR 2013). Alors que la base nationale DONESOL (InfoSol-INRA Orléans) montre des profils forestiers sous-représentés (densité d'environ moitié moindre qu'en milieu agricole), d'autres sources ponctuelles peuvent être mobilisées telles que la base ECOPLANT (AgroParisTech Nancy) ou la base de données écologique de l'IGN-IFN. Ces données ponctuelles peuvent aujourd'hui être spatialisées selon des lois de répartition des sols décryptées pour les trois quarts du territoire français d'une part dans des cartes de référence à moyenne échelle informatisées (programme CPF-INRA) et d'autre part dans les catalogues de stations forestières. En assurant d'une part, une synergie entre toutes ces sources de données qui détiennent chacune une partie des données nécessaires et d'autre part avec un minimum de travail de terrain complémentaire essentiel à la qualité du résultat, une carte des sols à moyenne échelle (1/50000-1/100000) homogène et à usages multiples pour tout l'espace forestier français pourrait ainsi être établie à court ou moyen terme. Ceci permettrait d'apporter une réponse aux besoins en données de sols aujourd'hui nécessaires à cette échelle pour les forestiers.

Mots clés

Cartographie, Sol, Forêts, Inventaire, Base de données géographique, France.

SUMMARY

FOREST SOILS DATA IN FRANCE: summary state and interest of coordinated use

Over the last 25 years, tens of thousands of forest soils data were compiled and mapping these data present an unquestionable interest now. Indeed, essential forest needs were well identified by the Combined Technology Network « Aforce » (Réseau Mixte Technologique Aforce « Adaptation des forêts au changement climatique » - <http://www.foretrpriveefrancaise.com/accueil-161899.html>) especially with respect to water flows and assessments, and their variations, in forest ecosystems (2013 REGEFOR workshop). The French soil database DONESOL (InfoSol-INRA Orléans) shows twice less soil profiles in forest than in land farming. Nevertheless, other specific forest ecology databases such as ECOPLANT (AgroParisTech Nancy) or IGN ecological database (IGN: « French National Institute of Geographic and Forest Information ») contain many soils data. These specific data could be mapped according to land repartition laws currently described for the French territory in medium-scale reference maps (CPF - French soil-mapping program, INRA Orléans) on one hand and in forest stands studies on the other hand. Consequently, all these data sources which hold part of existing soil forest information will have to constitute a common information system. In addition, a complementary soil survey essential to the quality of the result will also be necessary to fill the gap in the near future of an exhaustive, harmonised and multi-purpose forest soil maps at medium-scale (1/50000-1/100000) for France.

Such a work would enable a response to the requirements in harmonised and organised forest soils data, now essential as well for the forest managers as for the researchers.

Key-words

Medium scale mapping study, Forests soils, Soil survey, Geographical database, France.

RESUMEN

DATOS DE SUELOS EN EL BOSQUE FRANCÉS: estado sumario del existente e interés de su movilización

Teniendo en cuenta su acumulación durante los 25 últimos años, la movilización de decenas de miles de datos existentes sobre los suelos forestales presenta un cierto interés en cuanto a su generalización cartográfica. En efecto, se identificaron necesidades forestales, para las cuales su uso se confirma hoy en día esencial, por el RMT (Red Mixta Tecnológica) Aforce «Adaptación de los bosques al cambio climático» en particular con respecto a flujos y balances de agua y de sus variaciones en los ecosistemas forestales (jornadas REGEFOR 2013). Mientras que la base nacional DONESOL (InfoSol-INRA Orleans) muestra perfiles forestales sub-representados (densidad de aproximadamente la mitad que en medio agrícola), otros recursos puntuales pueden ser movilizados como la base ECOPLANT (AgroParisTech Nancy) o la base de datos ecológico de IGN-IFN (Instituto Geográfico Nacional – Inventario Forestal Nacional). Estos datos puntuales pueden hoy en día ser espaciales según leyes de repartición de suelos decodificadas para los tres cuartos del territorio francés, de un lado en mapas informatizadas de referencia a mediana escala (programa CPF-INRA) y de otro lado en los catálogos de estaciones forestales. De un lado asegurando una sinergia entre todas las fuentes de datos que detienen cada una una parte de los datos necesarios, y de otro lado con un mínimo de trabajo de terreno complementario esencial a la calidad del resultado, se podría así establecer un mapa de suelos a mediana escala (1/50000 – 1/100000) homogéneo y a usos múltiples para todo el espacio forestal francés a corte o mediano plazo. Esto permitiría llevar una repuesta a las necesidades en datos de suelos hoy en día necesarios a esta escala para los profesionales forestales.

Palabras clave

Cartografía, suelos, bosques, inventario, base de datos geográfica, Francia.

Les données concernant les sols forestiers à l'échelle de la France sont nombreuses et variées, mais encore relativement dispersées et souvent sous-représentées dans les bases de données spécifiques aux sols de notre territoire (Martin *et al.*, 2013).

Par ailleurs, les besoins forestiers en la matière sont bien identifiés et ont été récemment formalisés au sein du Réseau Mixte Technologique (RMT) consacré à l'adaptation des forêts au changement climatique, dit **Aforce**, lors des journées REGEFOR de 2013 (Picard et Perrier, 2013). Il s'agit surtout de répondre à des besoins permettant d'apprécier la réponse des peuplements forestiers aux changements de conditions hydriques de façon aussi précise et homogène que possible sur l'ensemble du territoire français.

Cet article, qui est avant tout un texte prospectif de faisabilité, a pour objet de montrer aussi objectivement que possible l'état des données existantes, leur ordre de grandeur et tout l'intérêt de leur mobilisation effective pour les cartographier à terme à moyenne échelle, soit au 1/50000 ou à défaut au 1/100000. Il ne s'agit pas ici de cartographier les sols forestiers à grande échelle, mais de pouvoir répondre rapidement à des thématiques forestières dans des programmes de recherche-développement impliquant de larges territoires (grands massifs et régions forestières). Cet objectif pourrait en outre s'insérer facilement dans le programme de cartographie pédologique de la France (CPF) à moyenne échelle du GIS Sol (Richer de Forges *et al.*, 2014).

Les besoins identifiés par le RMT **Aforce** vis-à-vis des sols forestiers sont principalement de trois ordres:

- les conditions d'alimentation en eau,
- la sensibilité des sols au tassement,
- les risques de baisse de fertilité.

Le premier de ces trois thèmes est prioritaire car il implique plusieurs axes de travail:

- évaluer au plus juste la réserve en eau des sols et en particulier la profondeur prospectable par les racines,
- apprécier l'évolution saisonnière et inter-annuelle de l'évolution de l'alimentation en eau (intensité et durée de l'engorgement hivernal, de la sécheresse estivale),
- anticiper les effets potentiels des variations de conditions hydriques sur les sols les plus sensibles à la sécheresse, aux risques de compaction notamment du fait d'alternances humectation-dessiccation et à la diminution de l'activité biologique.

Face à ces besoins, plusieurs sources de données ponctuelles ou cartographiques sur les sols sont disponibles à l'échelle du territoire français, dont les plus importantes sont les suivantes:

- les bases de données DONESOL (partie ponctuelle), ECOPLANT, IGN-IFN ou encore celle du GIS Coopérative de données sur la croissance des peuplements forestiers (Bédeneau *et al.*, 2001),

- les cartographies existantes à moyenne échelle (1/50000 – 1/100000),
- enfin, les catalogues de stations forestières qui couvrent l'essentiel de la forêt française et qui contiennent à la fois des données ponctuelles et la définition de lois de distribution des stations et des sols forestiers.

L'ensemble de ces données, que celles-ci soient ponctuelles, surfaciques ou conceptuelles et n'appartenant pas exclusivement à des bases informatisées, peut être organisé pour fournir un cadre de travail commun pour l'ensemble du territoire français avec des réponses graduées à court, moyen ou long terme en fonction des priorités actuelles ou encore à définir.

ETAT DES LIEUX

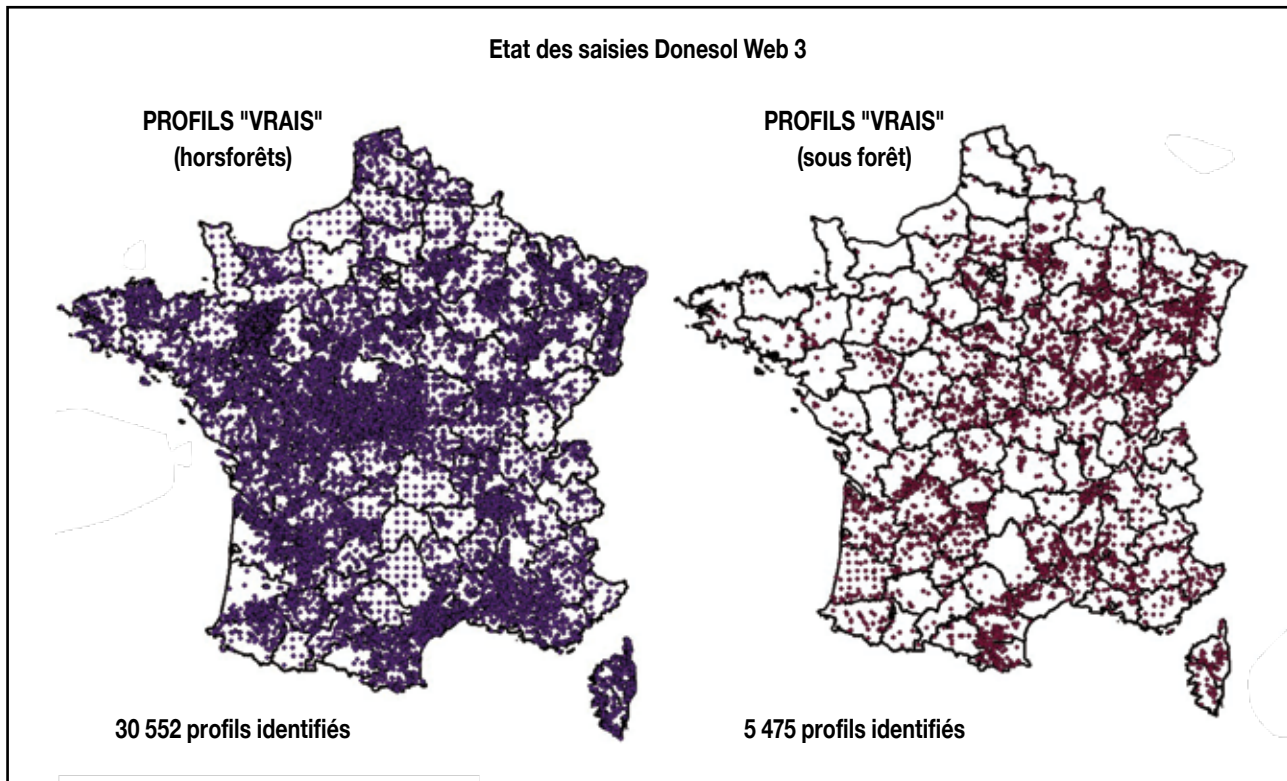
Les données ponctuelles

Pour l'essentiel, il s'agit des 3 bases de données citées précédemment:

- la base nationale DONESOL (Gaultier *et al.*, 1992, Grolleau *et al.*, 2004) gérée par l'unité Infosol de l'INRA d'Orléans contient les informations ponctuelles (description de fosses pédologiques et de sondages), mais aussi cartographiques (description des unités de sols et de leurs strates); dans son état actuel, elle contient plus de 30000 profils de sols, dont seulement un peu plus de 5000 sols forestiers (*figure 1*), soit environ 15 %, ce qui montre une nette sous-représentation des surfaces forestières françaises, occupant aujourd'hui près de 30 % du territoire, certaines régions étant très sous-représentées comme le Massif Central, les Landes ou les Ardennes par exemple;
- la base ECOPLANT établie à l'initiative du LerFob – AgroParisTech site de Nancy (www2.nancy.inra.fr/unites/lerfob/ecologie-forestiere/bd/ecoplant.htm, Gégout, 2001; Gégout *et al.*, 2005), contient essentiellement les données pédologiques (profils de sols analysés ou non) et les relevés floristiques correspondants de tous les exemples-types de la centaine de catalogues de stations forestières réalisés en France, ainsi que les données concernant les réseaux de suivi forestiers (RENECOFOR et BIOSOIL) et d'autres travaux parallèles (thèses ou études forestières spécifiques); elle présente à ce jour également au moins 5000 profils de sols avec analyses (*figure 2*); leur répartition n'est cependant pas homogène du fait de l'absence de catalogues dans un certain nombre de régions: le pourtour de la Méditerranée, les Landes par exemple alors que les régions du Nord-Est ont été très étudiées;
- la base de données des relevés écologiques créée par l'Inventaire Forestier National (intégré à l'IGN depuis 2012) contient les données relevées chaque année lors des opérations d'inventaire (Drapier et Cluzeau, 2001); ce sont actuellement les plus nombreuses (plus de 150000, *figure 2*), elles correspondent

Figure 1 - Localisation des profils de sols de la base DONESOL (d'après Martin *et al.*, 2013).

Figure 1 - Soils profiles location from DoneSol database (from Martin *et al.*, 2013).



cependant à des observations sur sondages et mini-fosses ainsi qu'à des relevés floristiques réalisés en toutes saisons, mais sans analyses de sols.

L'ensemble de ces 3 bases montre donc déjà l'équivalent d'au moins 150000 sondages et 10000 profils pour les 16 millions d'hectares de la forêt française, soit environ 1 sondage pour 100 ha (en fait 50 à 150 ha selon les régions) et 1 profil de sol pour 1500 ha, ratios qui s'approchent des besoins qui sont nécessaires pour l'établissement d'une carte à la précision du 1/100000 (1 sondage pour 30-60 ha, 1 profil pour 500-1000 ha (Afnor, 2007).

Enfin, il faut aussi mentionner les profils de sols réalisés dans des sites-ateliers ou expérimentaux recensés par le Centre National de la Propriété Forestière (CNPf). A ce jour, près de 2000 sites de ce type ont déjà été répertoriés sur SIG (*figure 3*). Le site web du CNPF (<http://www.cnpf.fr/pole-experimentations-425359.html>) en mentionne plus de 5400, mais tous n'ont pas fait l'objet d'observations de sols. Pour être complet, il faudrait aussi décompter les sites mis en place par les laboratoires de recherche et universitaire, mais il n'y en a à ce jour aucun recensement. Il en existe certainement encore autant.

La cartographie des sols au 1/50000 - 1/100 000

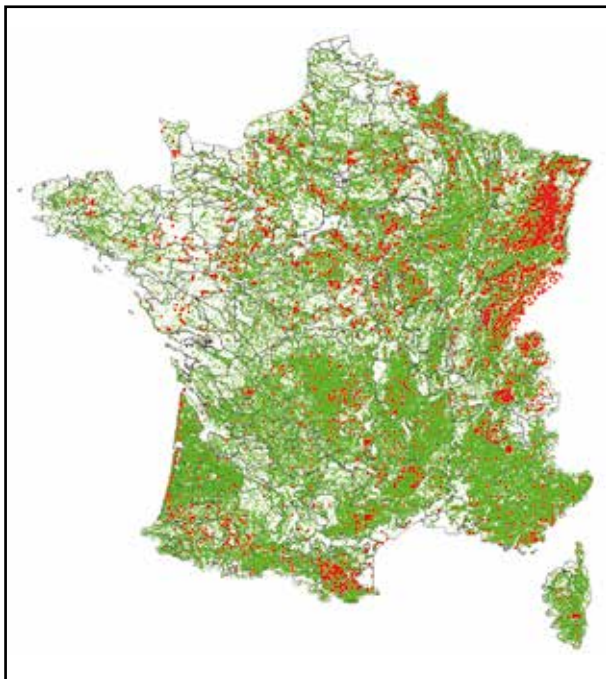
Afin d'établir le bilan le plus proche de la réalité actuelle, nous avons consulté la base REFERSOL gérée, comme DONESOL, par l'unité InfoSol de l'INRA d'Orléans. Celle-ci vise à référencer toutes les études de sols réalisées en France et à en stocker à mesure les contours sous SIG. Cette consultation nous a permis de répertorier plus de 500 études disponibles avec les caractéristiques suivantes:

- à l'image des profils contenus dans DONESOL, une grande partie de celles-ci correspondent à une occupation agricole des sols et les espaces forestiers n'ont pas été cartographiés,
- un certain nombre d'études ont néanmoins fait l'objet de levés réguliers sur toutes les surfaces, y compris forestières, et présentent des cartographies directement utilisables en tant que telle,
- enfin, certaines des études du point précédent ont déjà été informatisées et leurs profils sont stockés dans DONESOL.

En conséquence, les surfaces ayant déjà fait l'objet de cartographies des sols sous forêt et dont les contours sont informatisés sont au nombre d'environ 120 pour 3,5 millions hectares forestiers, soit environ 25 % de la forêt française

Figure 2 - Localisation des observations de sols des bases ECOPLANT (en rouge, d'après silvae.agroparitech.fr) et IGN-IFN (en vert, d'après ign.fr).

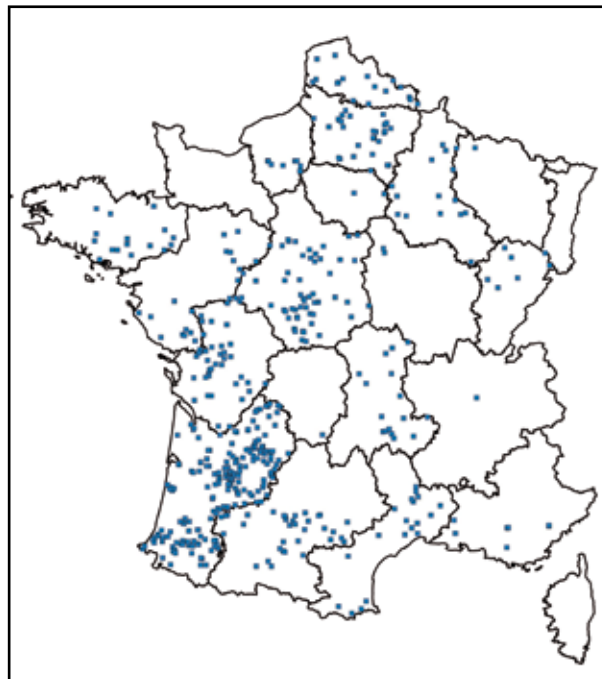
Figure 2 - Soils observations location from ECOPLANT and IGN-IFN databases (in red, from silvae.agroparitech.fr, in green, from ign.fr).



(figure 4). Ceci représente l'équivalent d'environ 100000 sondages et 5000 profils de sols. L'intérêt de ces cartographies ne se limite cependant pas à ces ratios. Elles représentent aussi et surtout un décryptage souvent assez fin des lois de répartition des sols des pédo-paysages dans lesquels elles ont été réalisées. King et Saby (2001) ont ainsi pu montrer que les 40 cartes pédologiques CPF au 1/100000 publiées par l'INRA à cette date, soit sur un peu plus de 15 % du territoire français, avaient permis d'établir une connaissance suffisante de ces lois sur 60 à 75 % de l'ensemble du territoire national. Cette approche qui vient d'être actualisée le confirme (Richer de Forges *et al.*, 2014). On peut aussi évoquer les Référentiels Régionaux Pédologiques à 1/250000 qui ont permis d'étendre la connaissance des lois de répartition des sols par grandes régions. Certains d'entre eux (près de 20 % des surfaces), réalisés à proximité de cartes de référence à 1/100000 en atteignent une précision voisine. Pour les autres surfaces, leur précision est généralement insuffisante pour les objectifs forestiers visés. En ce qui concerne les espaces forestiers, les catalogues de stations forestières sont à même de préciser ces lois de répartition des sols.

Figure 3 - Localisation des dispositifs expérimentaux géoréférencés du CNPF avec un profil de sol détaillé (extraction base ILEX du CNPF au 1.06.2013, d'après Picard et Perrier, 2013).

Figure 3 - Georeferenced experimental sites location with detailed soil profile from ILEX database (CNPF, 06.01.2013 ; Picard and Perrier, 2013).



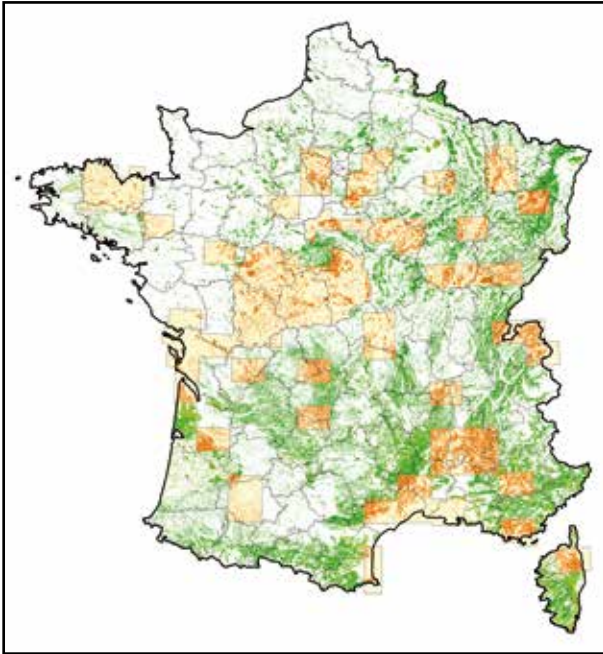
Les catalogues de stations forestières

Il existe environ 120 catalogues de stations forestières sur le territoire français. Ceux-ci ont été établis notamment en vue de mettre à la disposition des gestionnaires les éléments du milieu naturel leur permettant d'assurer la reconnaissance des stations forestières, le choix des essences et l'orientation des principes généraux des opérations sylvicoles qui en découlent. Pour la plupart, ces catalogues ont souvent été suivis de guides simplifiés afin d'en rendre l'essentiel facilement accessible au plus grand nombre. Une synthèse pour la réalisation de ces guides en a été publiée par l'IFN (Forêt et Dumé, 2006). Par ailleurs, la plupart des documents ont été scannés et mis en libre téléchargement sur le site de l'IGN-IFN (Dumé, 2010).

Ces catalogues contiennent une description et une clé de détermination des différents types d'écosystèmes forestiers d'une région naturelle donnée définis par la topographie et les formes du relief, les éléments du climat local, la nature des sols et des matériaux sous-jacents (formations superficielles, roches en place), des humus et de la végétation. Ces éléments permettent ainsi soit un diagnostic ponctuel ou parcellaire pour les boisements, soit une cartographie des stations à grande

Figure 4 - Localisation des surfaces de sols forestiers cartographiées et informatisées (selon Refersol, **orangé**), les surfaces forestières (**vert**) étant celles de CorineLandCover 2006).

Figure 4 - Forest soils areas mapping in Geographic Information Systems (in orange, from Refersol; in green, forestry areas from Corine LandCover, 2006).

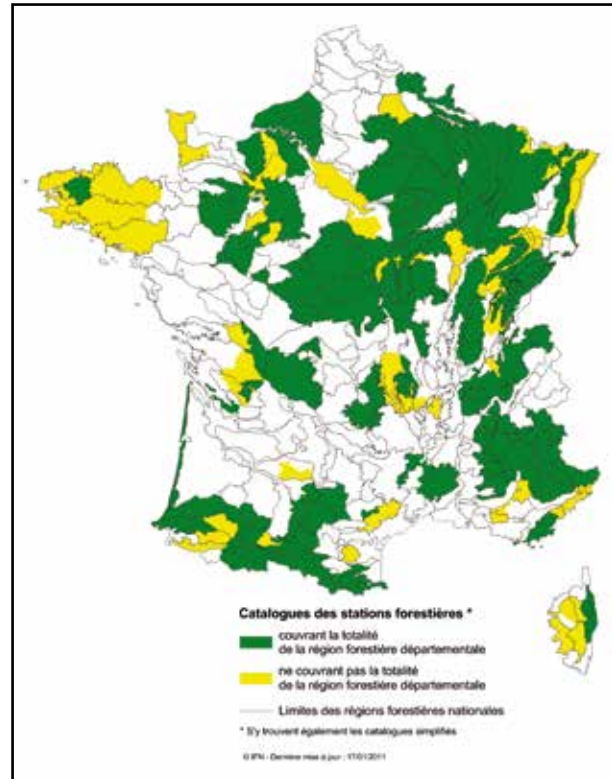


échelle (1/10 000), et en conséquence des sols associés, au niveau du massif forestier. Un certain nombre de forêts notamment publiques ont ainsi été cartographiées à cette échelle par l'Office National des Forêts (ONF Alsace, 1990) qui détient aussi sans doute des milliers d'observations de sols (sondages comme profils). En outre, et bien que non prévu à l'origine dans ce sens, ceci permet aujourd'hui d'en assurer aussi une cartographie prédictive au 1/100000 au niveau régional. C'est ce que nous avons fait partiellement dans la région du Vexin, du Valois et de la Vieille France (Party et Beaufils, 2010). Des essais régionaux ont aussi été testés dans ce sens antérieurement en France (Bazin et Gaudin, 2003, Gegout *et al.*, 2008) suivant en cela des préalables en Wallonie (Claessens *et al.*, 2002).

A ce jour, l'ensemble des documents relatifs aux stations forestières sont représentatifs de l'essentiel de l'espace forestier français de production avec cependant des degrés de précision divers. Pour les catalogues et études analogues, *a priori* les plus détaillés et les plus complets, ceux-ci couvrent environ les deux tiers de la forêt française, soit quelques 10 millions d'hectares (*figure 5*). Bien que variable, la densité moyenne d'observations y est d'environ 1 relevé avec sondage

Figure 5 - Catalogues des stations forestières disponibles (selon site IGN-IFN, <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article680>).

Figure 5 - Available forest stands studies in France.



pour 200 ha et un exemple-type avec profil de sol le plus souvent analysé pour 2000 ha. C'est l'équivalent de 50000 relevés et 5000 exemples types. Si le stockage des profils a déjà été assuré en grande partie dans la base ECOPLANT comme cela a été indiqué précédemment, il n'en est pas de même pour les relevés. L'effort de collecte de ceux-ci reste encore à faire au moins pour les régions forestières les plus représentatives et pour les catalogues les plus fournis. Lorsqu'ils existent, il est encore possible de collecter assez rapidement une bonne moitié de ceux-ci à l'image de ce qui a déjà pu être réalisé pour les Pyrénées (Bartoli *et al.*, 1999).

Des données de sols forestiers pour quelles utilisations

Le *tableau 1* dresse schématiquement le bilan comptable des données concernant les sols évoquées précédemment pour les espaces forestiers.

La connaissance des lois de répartition des sols est l'un des buts des cartographies pédologiques, qui couvrent

Tableau 1 - Récapitulatif de l'ordre de grandeur des données existantes sur les sols forestiers disponibles en France.**Table 1** - Summary statement for existing soils forest data in France.

Sources de données	Sondages forestiers	Profils forestiers	Surfaces (x 1 000 ha)	Lois de répartition des sols
Base Donesol	?	5 500	?	Oui (en partie)
Base ECOPLANT	-	5 500	10000	Non
Base IGN-IFN	155 000	0	15000	Non
Données ONF	?	?	5000	Non
Sites expérimentaux IDF		2000		Non
Sites recherche	-	2000 ?	-	Non
Cartographie à moyenne échelle ¹	110 000	(5 500) ²	5000	Oui
Catalogues des stations forestières	50000	(5000) ³	10000	Oui
TOTAL (hors double comptes)	315 000	15000	15000	Oui (à 75 % environ)
TOTAL (accessibles en bases)	155 000	13 000	15000	-

¹ carte de sols à 1/50000 ou à 1/100000 – chiffres entre parenthèses non intégrés au total - ² en partie intégrés à DONESOL - ³ en partie intégrés à ECOPLANT

environ 1/3 des forêts françaises, et des catalogues stations couvrant au moins 50 à 60 % des surfaces forestières (IFN, 2010). Ainsi, hors doubles comptes, on peut estimer les lois de répartition des sols forestiers français décryptées pour environ 75 % des surfaces.

Le décompte sommaire présenté correspond à 1 sondage pour environ 50 ha et 1 profil pour environ 1000 ha et permet ainsi d'assurer que les données concernant les sols forestiers français sont en nombre juste suffisant pour une cartographie à moyenne échelle. Celle-ci nécessite en effet un ratio d'au moins 1 sondage pour 30-60 ha et 1 profil pour 500-1000 ha (Afnor, 2007). Un inventaire précis et actualisé de l'ensemble des données à l'unité près, difficile à réaliser en l'état actuel de leur dispersion, ainsi que leur organisation dans un même système d'information devra constituer la 1^{re} étape d'une réalisation cartographique harmonisée des sols forestiers.

Ce travail préalable permettrait de lever deux difficultés qui restent cependant en suspens:

- les profils de sols répertoriés devront présenter les données nécessaires et suffisantes à une exploitation cartographique,
- les lois de répartition des sols à disposition dans les notices des travaux existants devront être traduites en règles de décision pour cartographier des surfaces plus ou moins prospectées.

Bien qu'*a priori* réalisable, c'est certainement l'effort le plus important à faire pour exploiter les données existantes et il ne doit pas être sous-estimé.

La cartographie des sols, aussi bien forestiers qu'agricoles, n'est cependant pas un but en soi. Celle-ci doit être en concordance avec des besoins et des outils permettant des réponses à brève échéance à des questions données. Une carte des sols ainsi constituée pour l'ensemble des forêts françaises permettrait d'apporter une réponse aux besoins en

données aussi bien à l'échelle du massif, de la région que de la France entière. A titre d'exemple, un modèle de bilan hydrique des forêts couplé à une cartographie des sols à moyenne échelle permettrait:

- pour le forestier, de simuler et prévoir la disponibilité en eau pour les peuplements forestiers, notamment vis-à-vis des sécheresses en vue d'assurer une adéquation des essences au climat et aux sols et d'orienter la gestion des peuplements en climat actuel et futur,
- pour d'autres usagers, d'évaluer par exemple la fourniture et la qualité de l'eau d'origine forestière en relation avec le climat, les sols, les essences forestières et leur gestion.

Ce type d'approche a été développé par le modèle BILJOU, modèle de bilan hydrique forestier au pas de temps journalier (Granier *et al.*, 1995, 1999, 2013; Bréda *et al.*, 2006). Il permet la modélisation à la journée des différents flux d'eau, du bilan hydrique (évapotranspiration réelle, drainage) et calcul des indices de durée et d'intensité des déficits hydriques. Les données d'entrée nécessaires sont les variables météorologiques, les caractéristiques de la végétation ainsi que celles des sols. La qualité des sorties du modèle est fonction du détail et de la précision des données disponibles et dépendent par ailleurs de leur disponibilité aux différentes échelles déjà évoquées. Pour les sols, les paramètres nécessaires à ce modèle sont donnés dans le *tableau 2*.

Ce modèle n'ayant jamais été utilisé sur tout un pays à moyenne échelle, le *tableau 2* montre néanmoins que le niveau d'utilisation « médium » du modèle pourrait assez aisément être couplé à une cartographie des sols forestiers à moyenne échelle et qu'une validation des résultats obtenus pourrait sans doute être envisagée pour les secteurs les plus sensibles avec la version « expert ».

Tableau 2 - Paramètres nécessaires au modèle BILJOU pour les horizons des sols forestiers.**Table 2** - Necessary parameters for forest soils horizons in the BILJOU model.

Paramètres	Niveau « basique »	Niveau « medium »	Niveau « expert »	Nécessité du paramètre
Profondeurs des horizons	requis	requis	requis	++
Pourcentage des racines fines	Hypothèses et expertise	Hypothèses et expertise	Mesures directes	+++
Réserve utile HCC / HPFP DA	Dérivée de texture ou Expertise	Granulométrie Refus (% EG) Calculs par fonctions de pédotransfert	Granulométrie Refus (% EG) Courbes pF/humidité Analyses (C, N et CEC)	+++ + +
Disponibilité potentielle des données	DONESOL ECOPLANT plusieurs milliers de profils forestiers courants	RENECOFOR BIOSOIL quelques centaines de profils sur réseaux	Sites ateliers recherche SOERE Forêt quelques dizaines de profils sur sites ± instrumentés	-

SOERE: « Système d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement »

Discussion

Le bilan établi pour les données concernant les sols forestiers français fait état de plus de 300000 sondages et 15000 profils connus. Ceci correspond en moyenne à 1 sondage existant pour 50 ha et 1 profil pour 1000 ha. Outre ces données ponctuelles, les lois de répartition des systèmes pédologiques français sont déjà décryptées aux trois quarts. Ces ratios indiquent qu'il est possible d'établir une cartographie homogène des sols forestiers français à moyenne échelle, soit au 1/100000 pour la publication et au 1/50000 pour les feuilles de travail. Cette cartographie pourrait être établie en couplant homogénéisation des données par modélisations et expertises de terrain complémentaires à coûts optimisés.

La réalisation d'un tel objectif est possible à court ou moyen terme, mais à plusieurs conditions:

- s'assurer d'abord d'une synergie efficace possible entre les bases de données existantes (INRA, AgroParisTech et IGN-IFN) qui détiennent chacune une partie des données nécessaires à la réalisation cartographique envisagée dans ce texte; ceci a déjà été possible pour établir une carte du pH de surface des sols forestiers (Gegout *et al.*, 2003; AgroParisTech-IFN, 2008)
- réaliser ensuite parallèlement la mise en base de données géographiques de tous les documents existants à moyenne échelle sur les sols forestiers, et réserver la saisie des études à grande échelle (1/10 000-1/25000) ou de nouvelles données ponctuelles (relevés des stations forestières) pour le moyen terme,
- mettre en place par ailleurs une typologie des différents sols forestiers français unique et homogène à l'échelle du territoire, à partir des études cartographiques à moyenne échelle, des RRP à 1/250000 pour ceux dont la précision est suffisante et des catalogues de stations forestières,

- réaliser ensuite un dessin géographique homogène de l'ensemble et renseigner les espaces non cartographiés en utilisant les couvertures infographiques disponibles (MNT, géologie, végétation.) ainsi que les données ponctuelles en y appliquant les lois de répartition des sols décrites dans les études existantes,

- tester la robustesse de cette première esquisse d'une part par croisement avec un premier jeu de données ponctuelles disponibles, d'autre part par des expertises de terrain ciblées pour lever les incertitudes les plus importantes,
- valider enfin cette carte avec un second jeu de données ponctuelles, et le cas échéant par un test de qualité avec retour sur le terrain, ce qui pourrait être fait par validation probabiliste aléatoire stratifiée telle que réalisée récemment sur une partie de la Normandie (Collard *et al.*, 2014).

Ainsi, compte tenu de l'existant, ce travail est réalisable à une échéance d'une dizaine d'années. Par ailleurs, ces travaux permettront:

- de structurer et de fédérer l'organisation des données existantes sur les sols forestiers encore souvent dispersées dans différents organismes sous des formats divers,
- de pouvoir être potentiellement intégrés dans le programme de Cartographie Pédologique de la France (CPF) de façon à harmoniser les levés avec les autres espaces,
- enfin et surtout, d'assurer l'utilisation optimale de la richesse de toutes les données d'études pédologiques acquises depuis plus de 50 ans qui restent encore largement sous-utilisées.

Une telle cartographie permettrait donc de répondre avec pertinence aux besoins actuellement bien identifiés par les forestiers à commencer par les plus immédiats: les bilans d'eau et la caractérisation des contraintes hydriques dans les peuplements forestiers.

Plus largement, ceci pourrait permettre d'initier en parallèle un travail analogue pour le reste du territoire français. En effet, même si la couverture de données est plus disparate, elle présente une densité de profils voisine, soit 1 pour 1000 à 1200 ha. Par ailleurs, ce sont entre 400 et 500 études pédologiques qui sont exploitables à moyenne échelle auxquelles il convient d'associer toutes les études agronomiques réalisées sur les prairies naturelles. Ainsi, toutes sources confondues c'est environ une moitié du territoire français qui est déjà couvert, mais au moins 30 à 40 % du territoire présentent une densité d'observations très insuffisante pour l'échelle en cause (Richer de Forges *et al.*, 2014). Enfin, il sera nécessaire de réviser les méthodes de cartographie, notamment vis-à-vis de la définition des ratios d'observations à réaliser pour une échelle donnée. En effet, en partant de la connaissance acquise des systèmes pédologiques et en utilisant les facilités numériques actuelles à l'image de ce qui a été initié il y a une vingtaine d'années (Lagacherie, 1992, Robbez-Masson, 1994, Bornand et Robbez-Masson, 1998 en particulier), ceci devrait permettre de définir des plans de prospection optimisés afin de viser la précision nécessaire à l'échelle des travaux à réaliser.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les données de sols existantes dans la forêt française se comptent à ce jour par centaines de milliers. En effet, et sans que ce décompte soit exhaustif, plus de 300000 sondages et 15000 profils de sols ont été dénombrés dans les espaces forestiers. Ces nombreuses données ponctuelles peuvent être associées à des lois de répartition des sols qui ont été décryptées soit dans les catalogues de stations, soit dans des études cartographiques de référence à moyenne échelle (1/50000 – 1/100000) déjà informatisées, au total environ 250 études réparties sur l'ensemble des massifs forestiers français. Les catalogues de stations forestières couvrent l'essentiel de la forêt française de production et les cartes pédologiques environ 3,5 millions d'hectares forestiers, soit près de 25 % des surfaces forestières de production.

Sous réserve d'organisation et d'articulation entre les quelques détenteurs des informations ponctuelles existantes, elles peuvent maintenant être mobilisées et répondre à des besoins forestiers bien identifiés tels que les bilans hydriques, la sensibilité au tassement ou les risques de baisse de fertilité. Cette synergie entre bases de données a déjà été mise en œuvre pour l'établissement de la carte des pH de surface des sols forestiers français (AgroParisTech-IFN, 2008). Une démarche équivalente pourrait être effectuée pour les bilans hydriques avec le modèle BILJOU (<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>) qui est opérationnel et prêt à être utilisé de façon interopérable avec une carte des sols à moyenne échelle. Outre

cet exemple, et parmi bien d'autres possibilités, à la suite de travaux déjà engagés et développés récemment, les questions suivantes pourraient être ouvertes à une spatialisation plus large et suivre rapidement:

- l'établissement des gradients de sensibilité des sols forestiers au tassement (Ranger *et al.*, 2010; Roger-Estrade *et al.*, 2011; Goutal *et al.*, 2013),
- l'identification de la biodiversité potentielle en fonction des types de peuplements (Larrieu et Gonin, 2008, Nivet *et al.*, coord, 2012),
- la prédiction de l'eutrophisation et de l'acidification potentielle des milieux forestiers ou encore de la sensibilité des sols aux exportations minérales dont il n'existe qu'un schéma cartographique sommaire à l'échelle française (Brêthes *et al.*, 2007), réalisé à la suite d'une étude sur la récolte des rémanents en forêt (Cacot *et al.*, 2006).

Cette cartographie pourrait être mise en œuvre en utilisant les couvertures infographiques disponibles: MNT, géologie, végétation... ainsi que les données ponctuelles en y appliquant les lois de répartition des sols décrites dans les études existantes. Ceci pourrait permettre d'obtenir une carte des sols forestiers à usages multiples à l'échéance d'environ 10 ans. En outre, ce travail pourrait ensuite être étendu à la France entière.

L'enjeu est important vis-à-vis de projets analogues d'harmonisation en cours dans d'autres domaines en France (géologie, végétation prairiale et forestière). Enfin, il l'est aussi au niveau européen, puisque la plupart des pays voisins possèdent déjà ou sont engagés dans des cartographies de sols de ce type (par exemple Belgique, Pays Bas, Luxembourg, Allemagne, Suisse).

BIBLIOGRAPHIE

- Afnor, 2007 - Qualité des sols. Cartographie des sols appliquée à toutes les échelles. Acquisition et gestion informatique de données pédologiques en vue de leur utilisation en cartographie des sols. Norme NF X 31-500. 15 p.
- AgroParisTech-ENGREF (UMR LerFob), IFN, 2008 - Guide d'utilisation de la carte des pH de surface des sols forestiers français, version 1, 26 p.
- Bartoli M., Largier G., Abgrall S., Luxcey E., 1999 - Une base cartographique de données phyto-écologiques issue des relevés de catalogues de type de stations forestières. *Revue Forestière Française*, 1, pp. 47-56.
- Bazin N., Gaudin S., 2003 - Test d'une méthode de cartographie rapide des stations forestières. Synthèse générale. CRPF Champagne-Ardennes. 49 p.
- Bédeneau M., Sindou C., Ruchaud F., Bailly A., Crémère L., 2001 - Un partenariat scientifique original: la Coopérative de Données sur la croissance des arbres et peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 2, pp. 171-177.
- Bornand M., Robbez-Masson J. M., 1998 - Cartographie des sols et informatique: pour une thématique au service des utilisateurs. *Mappemonde*, 49, 1998.1, pp. 36-39.
- Bréda N., Granier A., Peiffer M., 2006 - BILJOU, a forest water balance model to evaluate the duration and intensity of drought in forest stands. Communication orale. *Workshop of the ICP-Forests expert Panel on Meteorology and Phenology Comparison of different water budget models at an European Scale, Freising, Allemagne.*

- Brêthes A., Party JP., Gégout JC., Dambrine E., Nicolas M., 2007 - Carte de sensibilité des sols de France aux exportations minérales. *RDV techniques ONF*, 15, p. 42.
- Cacot E. (coord.), Eisner N., Charnet F., Léon P., Rantien C., Ranger J., 2006 - La récolte raisonnée des rémanents en forêt. Angers, ADEME, 36 p.
- Claessens H., Lejeune P., Cuvelier M., Dierstein A., 2001. Vers une cartographie informatisée des stations forestières. *Forêt Wallonne*. 57 (19) pp. 22-30.
- Collard F., Kempen B., Heuvelink G.B.M., Saby N.P.A., Richer de Forges A.C., Lehmann S., Nehlig P., Arrouays D., 2014 - Refining a reconnaissance soil map by calibrating regression models with data from the same map (Normandy, France). *Geoderma Regional* 1, pp. 21-30.
- Drapier J., Cluzeau C., 2001 - La base de données écologiques de l'IFN. *Revue Forestière Française*, 3-4, pp. 365-371.
- Dumé G., 2010. Tentative de bilan du programme national de relance de la typologie des stations forestières. Présentation orale, Atelier Aforce 2010.
- Forêt M., Dumé G., 2003 - Les outils d'aide à la reconnaissance des stations forestières et au choix des essences. Méthodes et recommandations pratiques ou Guide-âne. IFN. 224 p.
- Gaultier JP., Legros JP., Bornand M., King D., Favrot JC., Hardy R., 1993 - L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées: le projet Donesol. *Revue de Géomatique*, 3, pp. 235-253.
- Gégout JC., 2001 - Création d'une base de données phytoécologiques pour déterminer l'autécologie des espèces de la flore forestière de France. *Revue Forestière Française*, 3-4, pp. 397-403.
- Gégout JC., Coudun C., Bailly G., Jabiol B., 2005 - Ecoplant: a forest site database linking floristic data with soil and climate variables. *Journal of Vegetation Science*, 16, pp. 257-260.
- Gégout JC., Hervé JC., Houllier F., Pierrat JC., 2003 - Prediction of forest soil nutrient status using vegetation. *Journal of Vegetation Science*, 18, pp. 517-524.
- Gégout JC., Piedallu C., Cornu J., Cluzeau C., 2008 - La cartographie prédictive des stations forestières: un nouvel outil au service du gestionnaire. *Revue Forestière Française*, 1, pp. 37-60.
- Goutal N., Bottinelli N., Gelhaye D., Bonnaud P., Nourrisson G., Demaison J., Brêthes A., Capowiez Y., Lamy F., Johannes A., Boivin P., Ranger J., 2013 - Le suivi de la restauration de deux sols forestiers après tassement dans le Nord Est de la France. *Etude et Gestion des Sols*, 20, 2, pp. 163-177.
- Granier A., Badeau V., Bréda N., 1995 - Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 2, pp. 59-68.
- Granier A., Bréda N., Badeau V., 2013. Modélisation du bilan hydrique des forêts: les besoins en données. Présentation orale, Atelier REGEFOR 2013 n° 4.
- Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S., 1999 - A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, pp. 269-283.
- Grolleau E., Bargeot L., Chafchafi A., Hardy R., Doux J., Beaudou A., Le Martret H., Lacassin JC., Fort JL., Falipou P., Arrouays D., 2004 - Le système d'information national sur les sols: DONESOL et les outils associés. *Etude et Gestion des Sols*. 11 (3). pp. 255-269.
- IFN, 2010. Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines. Edition 2010. 200 p.
- King D. et Saby N., 2001 - Analyse de la représentativité des cartes pédologiques de France au 1/100000 pour la connaissance des sols du territoire. *Etude et Gestion des Sols*. 8 (4) pp. 247-267.
- Lagacherie P., 1992 - Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris comme référence. Cas de la petite région naturelle moyenne vallée de l'Hérault. Univ. Montpellier, thèse, 175 p.
- Larrieu L., Gonin P., 2008 - L'indice de biodiversité potentielle (ibp): une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 6, pp. 727-748.
- Martin M., Eglin T., Maurice D., 2013 - La valorisation des données de sols: mobilisation, validation, exploitation, diffusion. Présentation orale, Atelier REGEFOR 2013 n° 4.
- Nivet C., Bonhême I., Peyron JL. (coord.), 2012 - Les indicateurs de biodiversité forestière. Synthèse des réflexions issues du programme de recherche « Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques ». Gip Ecofor-MEDDE, 144 p.
- ONF Alsace (1990) - Cartographie des stations forestières et aménagement. 15 p.
- Party JP., Beauflis T., 2010 - Catalogue des types de stations forestières du Vexin, du Valois et de la Vieille-France. CRPF Centre-Ile de France. 284 p.
- Picard O., Perrier C., 2013 - Aperçu des données de sols forestiers disponibles dans les organismes partenaires d'Aforce. Evaluation des besoins. Présentation orale, Atelier REGEFOR 2013 n° 4.
- Ranger J., Goutal N., Gelhaye D., Bonnaud P., Nourrisson G., Demaison J., Lefevre Y., Brêthes A., 2010 - Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols forestiers: dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. Rapport technique annuel, INRA Champenoux, BEF, 60 p.
- Richer de Forges A.C., Baffet M., Berger C., Coste S., Courbe C., Jalabert S., Lacassin JC., Maillant S., Michel F., Moulin J., Party JP., Renouard C., Sauter J., Scheurer O., Verbègue B., Desbourdes S., Héliès F., Lehmann S., Saby N.P.A., Tientcheu E., Jamagne M., Laroche B., Bardy M., Voltz M., 2014 - La cartographie des sols à moyennes échelles en France. *Etude et Gestion des Sols*, 21, pp. 25-36.
- Robbez Masson J. M., 1994 - Reconnaissance et délimitation de motifs d'organisation spatiale. Application à la cartographie des pédopaysages. Th. Doct. ENSAM, 161 p. + annexes.
- Roger-Estrade J., Adamiade V., Arrouays D., Baranger E., Bartoli M., Boizard H., Brêthes A., Brisson N., Capowiez Y., Chanzy A., Chaplain V., Cousin I., Cosenza P., Cui K., Cui Y.-J., Debuisson D.S., Défossez P., Gérard F., Jayet P.A., Labreuche J., Le Bas C., Lefèvre Y., Léonard J., Lévêque E., Lévêque F., Mary B., Mumen M., Ranger J., Tabbagh A., Tabbagh J., Tang A.-M., Tessier D., Richard G., 2011. Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement: principaux résultats du projet GESSOL-ADD DST. *Etude et Gestion des Sols*, 18, 3, pp.187 - 189.