Une méthodologie nationale pour le géoréférencement et la vectorisation des cartes d'état-major, minutes au 1/40 000

Thierry Lallemant – Thierry Touzet – Alain Gervaise

Depuis une vingtaine d'années en France, de multiples travaux ont été initiés autour des changements d'occupation historique des terres et des forêts anciennes qui constituent un témoignage fort de l'évolution et de la dynamique du paysage français. Les forêts ont connu des transformations majeures au fil des siècles en fonction des pratiques agricoles, de la démographie, du développement industriel et des guerres. Au XIX^{e} siècle, période à laquelle ont été produites les cartes d'état-major (figure 1, p. 342), la forêt ne comptait que 9 à 10 millions d'hectares (Cinotti, 1996) auxquels on se réfère en tant que « minimum forestier ». Aujourd'hui, la forêt française a presque doublé pour atteindre 16,7 millions d'hectares en France métropolitaine (IGN, 2016). On appelle ici « forêt ancienne » un ensemble boisé qui n'a pas connu de défrichement depuis au moins 150 ans. Cette ancienneté n'est pas relative à l'âge des arbres qui composent le peuplement forestier mais à la continuité de l'état boisé à travers le temps. L'ancienneté est uniquement liée à l'âge des cartes d'état-major et cela ne signifie pas que la forêt n'a pas été exploitée.

De nombreux organismes publics tels que l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), les parcs nationaux et régionaux, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), et le GIP Ecofor ont vite compris l'intérêt de numériser l'occupation du sol sur les cartes d'état-major. À ce titre, ils participent ou œuvrent, en priorité, à la production d'une carte des forêts anciennes sur leurs territoires d'étude. Par ailleurs, en marge de la thématique forestière, des études sur d'autres occupations ont été lancées concernant les zones humides ou les zones urbaines anciennes, voire aussi l'évolution des limites administratives.

Face à toutes ces initiatives plus ou moins indépendantes et grâce à l'impulsion de J.-L. Dupouey (INRA), le ministère en charge de l'environnement a confié à l'IGN la définition du cadre méthodologique national permettant d'orienter toute nouvelle initiative vers un modèle unique de production des données. L'objectif final de ce projet « OCS Ancienne » est de produire un référentiel cartographique d'une occupation historique des terres comprenant les forêts, homogène, visualisable sur le Géoportail[1] et de surcroît valorisable par l'ensemble des utilisateurs identifiés. Cette méthodologie nationale comporte deux grands axes :

- le géoréférencement des données vectorielles ;
- le modèle conceptuel de données (nomenclature, spécifications de saisie et de contenu).

La méthode de géoréférencement proposée est souple et basée sur une optimisation du temps de production. Elle est également réversible pour permettre la superposition avec les référentiels des cartes d'état-major et offre différents niveaux de précisions de calage au regard des objectifs d'utilisation.

(1) Portail national de la connaissance du territoire mis en œuvre par l'IGN – geoportail.gouv.fr

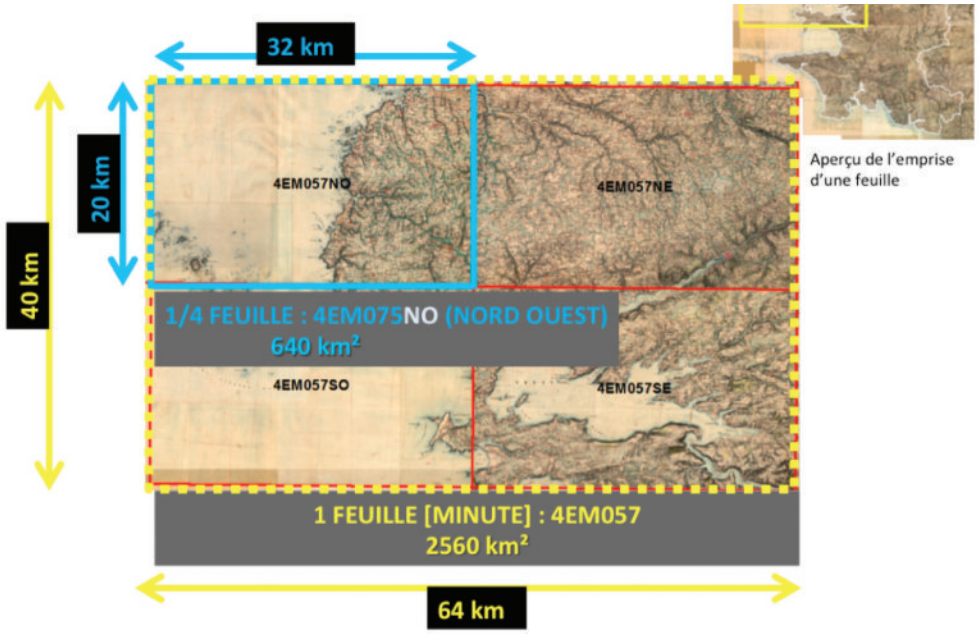
Le modèle de données permet de représenter tout ou partie des modes d'occupation du sol indiqués sur les cartes d'état-major. Ce modèle est associé à une nomenclature nationale, basée sur les travaux de l'INRA (Favre *et al.*, 2013) et validée par le comité de pilotage(2) du projet « OCS Ancienne ».

Cet article expose une synthèse du rapport méthodologique validé en juin 2016 (Lallemant et Touzet, 2016). Il présente de manière succincte et vulgarisée la méthodologie nationale de géoréférencement et de vectorisation pour toute personne voulant produire une occupation historique du sol à partir des cartes d'état-major.

DESCRIPTION DES RÉFÉRENTIELS DES CARTES D'ÉTAT-MAJOR, MINUTES AU 1/40 000

Succédant à la carte de Cassini devenue vieillissante, les cartes d'état-major ont été publiées au 1/80 000 grâce à des levés initiaux réalisés au 1/40 000 par des ingénieurs géographes entre 1818 et 1866. De nombreuses révisions ont été apportées par la suite qui ont permis, entre autres, d'intégrer les voies ferrées. La carte de France métropolitaine a été découpée en 272 feuilles de 64 km × 40 km, appelées minutes. Chacune de ces minutes est découpée en quatre quarts, nommés NO, NE, SE et SO selon leur orientation (figure 1, ci-dessous). Il y a un total de 976 quarts de feuille couvrant le territoire français de l'époque. Les feuilles d'état-major sont disponibles et téléchargeables sur le Géoportail depuis 2011 sous forme d'images non géoréférencées au format jpeg2000.

Figure 1 **PRÉSENTATION DU DÉCOUPAGE D'UNE MINUTE ET D'UN QUART DE FEUILLE ÉTAT-MAJOR SUR LE DÉPARTEMENT DU FINISTÈRE**



(2) Membres du comité de pilotage : G. Landmann et W. Heintz (GIP Ecofor), T. Mougey (Fédération des PNR), L. Larrieu (CNPF), J.-L. Dupouey et N. Leroy (INRA), L. Bergès (Irstea), J.-M. Fremont, A. Gervaise et J.-C. Hervé (IGN), L. Wlerick (MAAPRAT), J.-P. Cabaret et A. Lalanne (MTES), T. Bouix et M. Hermeline (ONF), M. Thomas (PNF), D. Vallauri (WWF).

Par ailleurs, l'IGN a entrepris l'assemblage des feuilles en y associant un premier niveau de géoréférencement pour mettre à disposition un produit appelé SCAN État-Major® 40k. Les images brutes ont été transformées dans le système géodésique RGF93 et en projection Lambert 93 de manière à les superposer à la cartographie moderne (géoréférencement dit de niveau 3 ci-après). Pour disposer d'une image continue sur la France entière, les zones cartographiques ont été détourées et assemblées. L'IGN a réalisé le tableau d'assemblage des quarts de feuille de la carte d'état-major en cohérence avec le produit SCAN État-Major® 40k. Une information sur l'année de la première édition du quart de feuille a été ajoutée. Cette couche est le référentiel de la méthodologie nationale des limites des feuilles.

UNE MÉTHODE NATIONALE DE GÉORÉFÉRENCEMENT

Associé à toute vectorisation des forêts et, plus généralement, de toute information géographique portée sur les feuilles d'état-major ou sur le référentiel SCAN État-Major® 40k, se pose la question élémentaire du géoréférencement. Comment réussir à superposer au plus près les forêts de la carte d'état-major aux référentiels actuels forestiers, tels que la BD Topo®, la BD Forêt v2®, ou encore le SCAN 25® ?

Pour rappel, l'utilisation du géoréférencement permet avant tout d'intégrer la donnée géographique dans un système géodésique et une projection connus en coordonnées planes X et Y. Ce qui permet à toute donnée géographique de se superposer aux autres référentiels cartographiques géoréférencés dans le même système. Dans le cas d'une saisie sur les cartes d'état-major, les deux circuits de géoréférencement présentés ci-dessous permettront de diminuer les écarts entre le référentiel ancien (cartes d'état-major) et les référentiels actuels. Il faut savoir qu'initialement les deux référentiels ne sont pas superposables essentiellement pour deux raisons : la première porte sur la précision de la méthode d'acquisition de l'époque. La triangulation repose sur des levés planimétriques à l'évidence moins précis qu'aujourd'hui ; la deuxième raison réside dans la nature du support. Les cartes d'état-major étant issues d'un scannage de cartes papier ont subi des déformations dans le temps. Ces deux raisons entraînent des distorsions géométriques entre feuilles qui doivent être corrigées pour produire une information continue et cohérente sur le territoire.

À titre d'information, les cartes d'état-major sont géoréférencées dans le système géodésique utilisé à cette époque qui est le système ATIG (ancienne triangulation des ingénieurs géographes) associé à la projection ancienne utilisée au XIX^{e} siècle, appelée « Bonne ». Cette projection est applicable sur l'ensemble du territoire français, y compris la Corse. Elle est basée sur l'ellipsoïde de Plessis 1817. Des coordonnées sont inscrites sur les quatre coins des quarts de feuille (figure 2, image 1, p. 345).

Les différents niveaux de géoréférencement

Le travail de géoréférencement est connu pour être chronophage. L'IGN a donc pris en compte cette problématique en mettant l'accent sur le rapport précision planimétrique / temps de production. En se référant aux travaux de l'INRA (Favre *et al.*, 2013), l'IGN a défini cinq niveaux de géoréférencement avec leurs caractéristiques propres. À chaque niveau, défini par un nom de géoréférencement normalisé, sont attachées une exactitude planimétrique et une charge de travail. Plus l'exactitude est grande, plus les écarts relatifs entre les référentiels anciens et actuels sont faibles. L'exactitude finale peut varier en fonction de l'option de géoréférencement choisie, à laquelle il faut ajouter la qualité des minutes d'état-major due au support papier d'origine et la topographie du lieu. Il est courant de constater une baisse de qualité en zone de montagne à cause du manque de points de calage.

Les paragraphes suivants détaillent d'un point de vue théorique chaque niveau. Ils sont classés du moins précis au plus précis.

• *Le référencement « Image » (niveau 1)*

Les images, appelées « images brutes » par la suite, correspondent aux feuilles d'état-major téléchargeables sur le site du Géoportail. Ces images ne sont pas géoréférencées au sens où aucune projection n'y est associée. Elles correspondent à une matrice de cellules (ou pixels) organisées en lignes et en colonnes (grille).

• *Le géoréférencement en « ATIG-Bonne » (niveau 2)*

Il est basé sur la triangulation France métropolitaine « ATIG » qui s'appuie sur la Méridienne de Paris, mesurée pour la définition du mètre (1/10 000 000 du quart de méridien), et la projection de Bonne(3) utilisée au XIX^{e} siècle, avant l'adoption du datum NTF (Nouvelle triangulation de la France) et de la projection Lambert, puis ensuite du RGF93 et de la projection Lambert93. Chaque feuille possède un carroyage dont chaque intersection est connue en coordonnées pixel et en coordonnées Bonne. Ces points de calage, indispensables au géoréférencement, sont appelés des points d'amer (figure 2, image 2, p. 345). Cette projection ancienne de Bonne n'est superposable à aucun référentiel actuel sachant qu'elle n'est plus utilisée de nos jours.

• *Le géoréférencement « Lambert 93 Géoportail » (niveau 3)*

Il est identifié comme le socle de référence. Pour le mettre en œuvre, le service de géodésie et de nivellement de l'IGN a sélectionné 30 points issus des fiches géodésiques présents dans les deux systèmes (ATIG et NTF(4)). Chaque jeu de coordonnées a été transformé en coordonnées tridimensionnelles cartésiennes géocentriques. À partir de ces coordonnées, il a été possible d'obtenir les valeurs de translation du système ATIG vers NTF. Le passage ATIG-NTF a été réalisé grâce à une transformation au niveau de la France entière appelée similitude 3D à 7 paramètres. Dans notre cas, le modèle a été réduit à trois paramètres de translation (TX, TY, TZ), car aucune rotation ou défaut d'échelle globale n'ont pu être mis en évidence. Dans un deuxième temps, l'IGN a procédé à la transformation des cartes NTF vers le RGF93, devenu la référence légale depuis 2000. Certes, il reste le moins précis des géoréférencements superposables aux référentiels actuels mais a le bénéfice d'être superposable au produit image SCAN État-Major® 40k et aux flux Géoportail, uniques supports visuels couvrant en continu l'ensemble du territoire.

Pour définir l'exactitude (écarts relatifs) de chaque niveau de géoréférencement, l'IGN a pris comme référence 28 quarts de feuille fournis par l'INRA. Ces quarts de feuille ont été réalisés avec un géoréférencement local d'une exactitude planimétrique évaluée à moins de 10 m par l'INRA. Plus de 35 000 points de recalage ont été nécessaires pour ce travail. L'IGN a évalué le résultat du géoréférencement en calculant une erreur quadratique moyenne (EMQ) pour chacun des 28 quarts de feuille. Les valeurs EMQ s'étalent entre 47 m et 143 m avec une moyenne sur les 28 feuilles de 85 m.

(3) La projection de Bonne, basée sur l'ellipsoïde de Plessis 1817, est une projection cartographique où les parallèles sont représentés par des cercles concentriques équidistants dont le centre est situé sur une droite figurant le méridien central. Les longueurs sont respectées sur le méridien central et sur les parallèles, et les surfaces sont conservées, mais les angles ne sont pas conservés (sauf au voisinage du point origine) et les méridiens et parallèles ne sont plus perpendiculaires. C'est donc une projection équivalente, mais non conforme, sauf au voisinage de son point d'origine.
(4) NTF : Nouvelle triangulation de la France. Système de projection qui était en usage en 1997 appelé communément « système Lambert ». Il a été remplacé aujourd'hui par le RGF93 avec la projection Lambert 93.

• *Le géoréférencement « Lambert 93 Amélioré » (niveau 4)*

Il est le résultat de l'utilisation d'une grille de transformation à l'échelle nationale, produite par l'IGN, permettant de diminuer significativement et rapidement les écarts relatifs entre le système ancien ATIG-Bonne et le système actuel RGF93-Lambert 93 (figure 2, image 3, ci-dessous). Il permet ainsi de rapprocher automatiquement toute saisie des forêts de la carte d'état-major des forêts actuelles. Pour générer cette grille de transformation, l'IGN a sélectionné un grand nombre de points homologues répartis de façon uniforme sur l'ensemble du territoire. Ce sont 11 865 clochers d'églises et chapelles qui ont servi au calcul de la grille, localisables dans les deux systèmes, ancien et actuel. En reprenant le même procédé de qualification que le niveau précédent, les valeurs EMQ s'étalent entre 41 m et 95 m avec une moyenne sur les 28 feuilles de 60 m. L'exactitude est liée au nombre de points homologues trouvés sur le quart de feuille.

• *Le géoréférencement « Local » (niveau 5)*

Il permet de superposer encore plus finement les géométries anciennes sur les référentiels actuels en atteignant une meilleure exactitude. Cette méthode nécessite d'augmenter considérablement le nombre de points homologues pour obtenir des déformations locales précises sur toute la carte. Le nombre de points nécessaire par feuille est estimé entre 500 à 3 000. La méthode consiste à saisir manuellement des points d'intérêt sur les deux cartographies (ancienne, cartes d'état-major et récente, SCAN 25®, BD ORTHO® ou encore BD TOPO® : chapelles, châteaux, manoirs, maisons, moulins, fermes isolées, croix de chemin, carrefours, sommets de buttes, angles de courbures et confluences des réseaux hydrographiques ou routiers, etc.) et de lancer un algorithme de déformation élastique. Ce travail est aussi long que la vectorisation des occupations du sol. La qualification de l'exactitude planimétrique n'a pas été calculée car elle dépend fortement du nombre de points homologues saisis. Conceptuellement, plus il y aura de points, plus la valeur de l'EMQ diminuera.

Figure 2 **IMAGE 1) APERÇU DE COORDONNÉES BONNE SUR LE COIN HAUT-GAUCHE D'UNE FEUILLE D'ÉTAT-MAJOR**
IMAGE 2) LES 38 POINTS D'AMER CONNUS DANS LE SYSTÈME DE PROJECTION BONNE SUR LA FEUILLE 191NE
IMAGE 3) RÉSULTATS SUPERPOSÉS À LA BD ORTHO AVEC EN VERT, LA VECTORISATION DES FORÊTS RÉALISÉE SUR LE SCAN ÉTAT-MAJOR (NIV3), EN VIOLET, LA VECTORISATION BÉNÉFICIANT DE LA GRILLE DE TRANSFORMATION (NIV4)

Les outils de transformation

Cette partie présente les méthodes et les outils mis à disposition par l'IGN pour les utilisateurs. L'objectif étant de passer le plus simplement possible d'un géoréférencement de niveau N à un géoréférencement de niveau N + 1 de meilleure précision. Dans la majorité des cas, les outils de transformation présentés sont libres et les bibliothèques associées sont Open Source, c'est-à-dire gratuites. Selon le support visuel choisi pour la vectorisation des forêts de la carte d'état-major, la méthode identifie deux circuits (figure 3, p. 347). Chaque circuit utilise un outil de transformation matérialisé par un script qu'il suffit de lancer en ligne de commande. Ces scripts sont utilisables par tous puisqu'ils fonctionnent avec une bibliothèque libre appelée « ogr2ogr[5] » :

— circuit 1 : la vectorisation est faite sur les images brutes des feuilles d'état-major, avec des transformations possibles du niveau 1 au niveau 4 ;

— circuit 2 : la vectorisation est faite sur le socle de référence, c'est-à-dire sur le produit SCAN État-Major® avec transformation du niveau 3 au niveau 4.

Le circuit 1 correspond au scénario où l'opérateur vectorise sur une feuille d'état-major brute, téléchargée sur le site du Géoportail. À ce stade, nous travaillons sur un géoréférencement de niveau 1. Ce qui signifie que la donnée ne possède pas de géoréférencement connu et qu'elle est produite à l'échelle de la feuille. Ce dernier point occasionnera par la suite un traitement supplémentaire d'assemblage des feuilles. L'avantage du circuit 1 repose sur le fait que la saisie est basée sur une image brute n'ayant subi aucune transformation relative à un changement de système de projection. Sachant que le script utilise les points d'amer des feuilles, il y a autant de scripts qu'il existe de quarts de feuille d'état-major, soit 976 fichiers texte (extension .txt).

On parle de circuit 2 lorsque l'opérateur a fait le choix de numériser sur la mosaïque d'images état-major possédant un géoréférencement identique au socle de référence, c'est-à-dire de niveau 3. Deux produits répondent à cette exigence : le produit SCAN Historique® 40k et le flux Géoportail. L'IGN préconise d'utiliser ce circuit 2 car il ne faut plus se préoccuper de la jonction des feuilles puisque la saisie se réalise sur une image continue mosaïquée France entière. De plus, le circuit 2 ne possède qu'un seul et unique script, ce qui facilite le passage du niveau 3 vers le niveau 4. Ce circuit est utilisé dans la production du nouveau produit BD Carto® État-Major de l'IGN.

Un manuel d'installation et d'utilisation des scripts de transformation est disponible en annexe du rapport méthodologique (Lallemant et Touzet, 2016). L'ensemble des données (scripts, fichiers, base de points) sont récupérables à la demande.

Les deux circuits présentés permettent de géoréférencer jusqu'à une précision maximale de niveau 4 « Géoréférencement amélioré ».

Le géoréférencement local de niveau 5 est facilité par la mise à disposition par l'IGN de nombreux points susceptibles d'être retrouvés sur les cartes anciennes pour former des points homologues utilisés pour la transformation. Il n'y a pas de traitement automatique pour réaliser ce travail. L'IGN dispose d'une base de données topographique France entière (BD Topo®) contenant maintes informations de géométrie linéaire utiles au recalage, comme les réseaux routiers et hydrographiques, ou encore les limites administratives. L'IGN propose d'extraire de cette base des points de référence pour chaque feuille d'état-major afin d'aider au calage local. Les points de référence seront les carrefours du réseau routier, les confluences hydrographiques, les ponts, les intersections de limites de communes, les sommets des montagnes. L'idée est bien de proposer les points d'origine des vecteurs de déplacement permettant la déformation élastique.

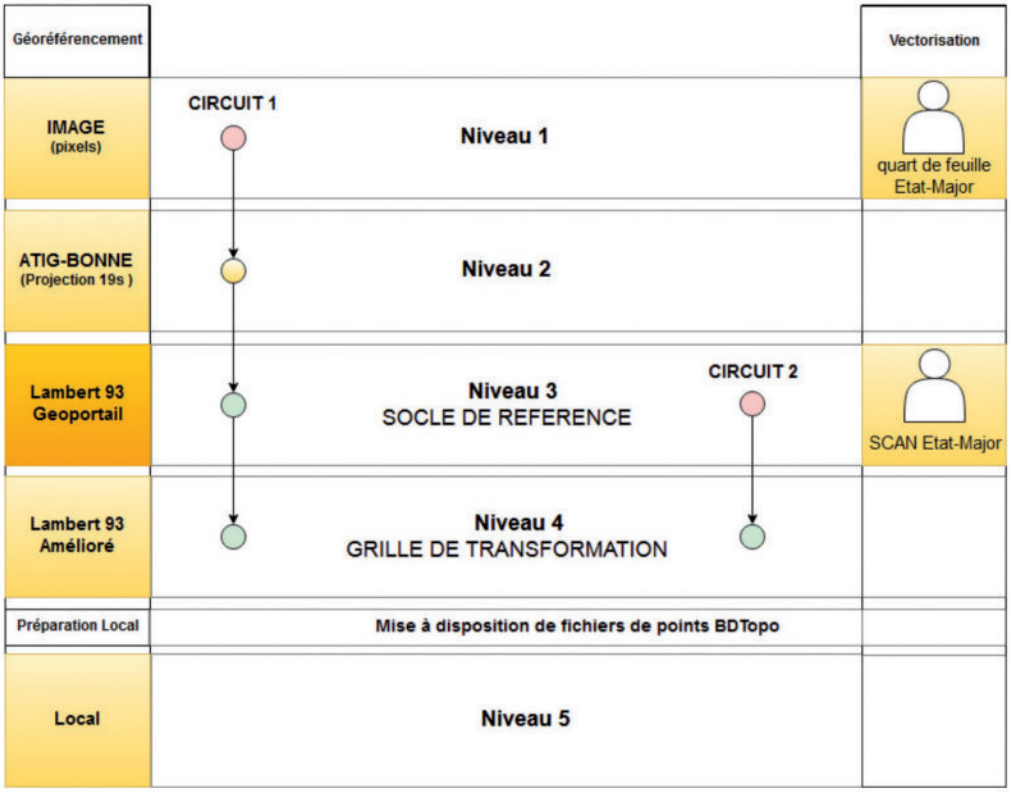
(5) Exécutable de la bibliothèque de traduction géospatiale raster/image, appelée GDAL.

Dans le travail de géoréférencement local, il existe deux méthodes, une méthode manuelle et une méthode optimisée :

— la méthode manuelle consiste à enrichir ligne par ligne une table de correspondance des coordonnées des points BD Topo® avec celles des points saisis sur la feuille d'état-major pour la proposer en entrée à un outil de déformation élastique de type « rubbersheeting ». Cette méthode peut être longue ;

— la méthode optimisée, utilisée par l'IGN, consiste en l'extraction semi-automatique de couples homologues. Cette méthode est possible si et seulement si les couches linéaires sur les cartes d'état-major sont initialement saisies, en plus des forêts. C'est pourquoi l'IGN a fait le choix de saisir l'ensemble des linéaires et des classes d'occupation historique pour définir son nouveau produit BD Carto® État-Major. Un traitement permet alors de rechercher automatiquement, pour un nœud ancien donné, son nœud actuel voisin le plus proche possédant la même origine et le même degré (ou valence). L'homologie de ces paires de points est alors vérifiée et les vecteurs de déplacement correspondants sont générés.

Figure 3 **SCHÉMA PRÉSENTANT LES DIFFÉRENTS NIVEAUX DE GÉORÉFÉRENCEMENT AVEC LES DEUX CIRCUITS PROPOSÉS**



Dans le cadre d'études comparatives entre les forêts de la carte d'état-major et les forêts actuelles, on recherche la précision maximale de positionnement des limites des massifs forestiers (Salvaudon *et al.*, 2013 ; Renaux *et al.*, 2016). Pour ce travail, il est recommandé d'utiliser les géoréférencements à partir du niveau 4. L'objectif étant de superposer au mieux la vectorisation de

la carte d'état-major et celle de forêts actuelles en utilisant par exemple la BD Forêt® v1 ou v2. Le passage au niveau local est légitime si l'apport de la grille n'est pas suffisant et que le temps disponible pour cette tâche est important. Quant au géoréférencement de niveau 3, il est une bonne option pour un produit de communication sachant qu'il sera superposable au support visuel des cartes d'état-major.

UNE MÉTHODE NATIONALE DE VECTORISATION DES CARTES D'ÉTAT-MAJOR

Parmi les nombreuses classes historiques paysagères qu'il est possible de vectoriser sur les cartes d'état-major, telles que les prairies, les pâquis/pâtures, les vignes, les vergers, les marais, l'hydrographie, le bâti..., les forêts apportent des éléments de connaissance très intéressants sur la biodiversité actuelle, parce que celle des forêts anciennes diffère de celle des forêts récentes. C'est le cas également d'autres classes d'occupation du sol comme les zones humides anciennes.

La classe forêt s'intègre dans une nomenclature nationale de l'occupation du sol historique comptabilisant 37 postes. Cette nomenclature simplifiée a été établie à partir de celle dressée par l'INRA (Favre *et al.*, 2013), elle-même basée sur l'analyse des figurés rencontrés lors de la vectorisation de 195 quarts de feuille répartis dans diverses régions de France. La nomenclature synthétique est structurée sur deux niveaux avec une troisième entrée exposant le concept de double occupation du sol, appelée également classe d'occupation « composite » ou « paysage complexe » (figure 4, ci-dessous).

Figure 4 **EXTRAIT DE LA NOMENCLATURE NATIONALE AVEC LES ENTRÉES FORÊT (EM9) ET ZONE HUMIDE (EM11) GESTION DANS LE MODÈLE DE DONNÉES DU THÈME FORÊT MARÉCAGEUSE, CLASSE COMPOSITE COMBINANT LES DEUX TYPES DE NIVEAU 2 : FORÊT + MARAIS**

Extait de la nomenclature nationale		
EM9 Forêt	EM9.1 Forêt [1], [24]	**Forêt pâturée** [57] [58] [59] = EM8.1 + EM9.1 **Forêt marécageuse** [20] = EM9.1 + EM11.1
EM11 Zone Humide	EM11.1 Marais [38], [55]	**Culture marécageuse** [49] = EM4.1 + EM11.1 **Prairie marécageuse** [9] = EM7.1 + EM11.1 **Pâquis, pâture marécageux** [48] = EM8.1 + EM11.1 **Forêt marécageuse** [20] = EM9.1 + EM11.1
	EM11.2 Marais salé endigué [71]	
	EM11.3 Estran [63]	

Extrait du tableau des représentations						
code	couleur	libellé	observations	figuré	type A (niv2)	type B (niv2)
1	Vert, vert-jaune ou jaune	**Forêt**			**EM9.1 Forêt**	
20	Traits et taches bleues irrégulières sur fond vert forêt	**Forêt marécageuse**	ressemblance avec l'unité 9 (prairie marécageuse), mieux délimitée et dessinée sur fond de carte par rapport au fond forêt.		**EM9.1 Forêt** **EM11.1 Marais**	**EM11.1 Marais** **EM9.1 Forêt**

Une classe d'occupation du sol peut être représentée sur les cartes d'état-major de deux manières :

— une classe est matérialisée par un aplat de couleur uniforme, ou une juxtaposition de taches de deux couleurs, de formes irrégulières. La classe forêt est représentée majoritairement par une teinte vert-jaune. Ce type de représentation est identifié comme une classe d'occupation « simple », c'est-à-dire qu'elle possède uniquement une occupation principale appelée de type A. Une autre occupation, de type B, est inexistante ;

— plus rarement, un paysage peut être représenté d'une manière complexe. En superposition à un premier aplat de couleur, ou à la juxtaposition de deux couleurs, la représentation cartographique peut voir s'ajouter soit un semis de points, régulier ou irrégulier, soit des motifs répétés, soit du relief. Dans ce cas, on parle de classe d'occupation « composite » qui combine occupation principale de type A et occupation secondaire ou complémentaire de type B. Les forêts marécageuses, par exemple, appartiennent à ce deuxième type.

La liste des combinaisons possibles est répertoriée dans les spécifications du produit occupation du sol historique (Lallemant et Touzet, 2016). Cette nomenclature n'est pas figée. C'est une première version qui a vocation d'évoluer grâce au comité de pilotage « OCS Ancienne » regroupant les experts associés aux travaux liés à la vectorisation des forêts anciennes.

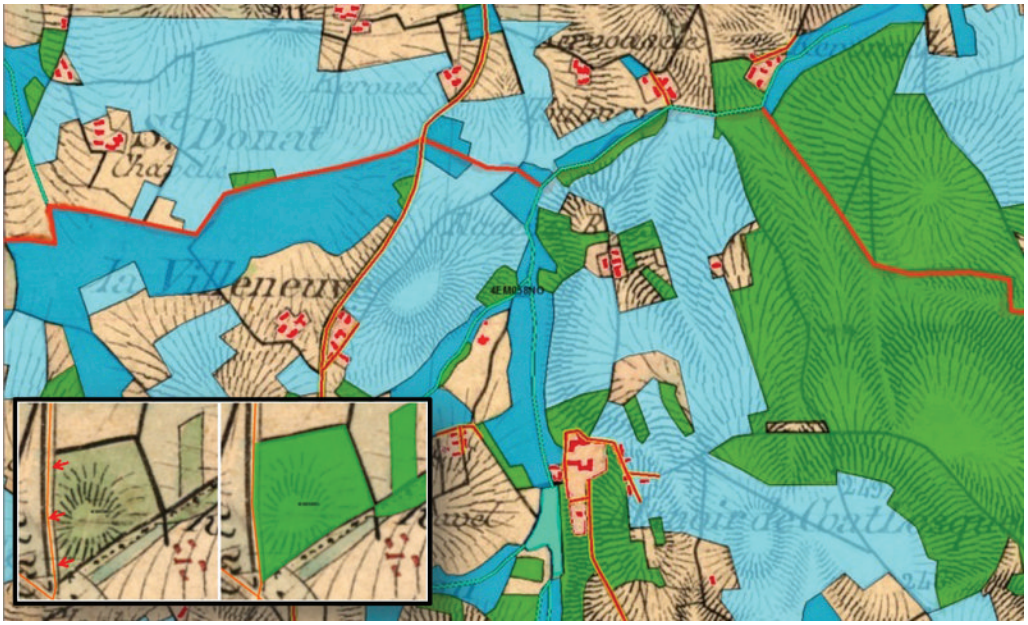
La méthodologie nationale préconise de vectoriser les forêts de la carte d'état-major de manière manuelle pour assurer une interprétation de qualité, permettant une valorisation maximale. Le travail consiste donc en l'interprétation et la vectorisation par un opérateur des emprises des forêts représentées sur les cartes d'état-major.

En marge de ce projet, plusieurs travaux d'extraction automatique des informations d'occupation du sol ont été développés. On peut citer un travail de thèse (Herrault *et al.*, 2015) ayant abouti au développement d'un *plug-in* sous le logiciel QGIS, appelé *Historical Map*, permettant d'extraire automatiquement les thèmes colorés bien distincts de la carte d'état-major, tels que les forêts, les prairies ou les vignes. L'automatisation permet seulement de détecter ces trois grands thèmes dans des zones simples, peu chargées en informations, et dans des zones avec un relief peu marqué (zones de plaine). En raison d'un nombre assez important d'erreurs de vectorisation, l'utilisation de cette méthode se limite à la production de données pour des analyses ciblées et sur des surfaces peu importantes. Les données produites ne sont pas comparables à celles saisies manuellement. Il faut souligner qu'une reprise des contours de la vectorisation automatique est nécessaire pour obtenir un résultat conforme aux objectifs fixés par la méthodologie nationale répondant aux besoins exprimés pour la constitution d'une carte nationale des forêts anciennes. La charge allouée à la reprise sur des feuilles d'état-major n'est pas négligeable et peut devenir plus importante que la saisie manuelle en partant de zéro. De plus, l'hétérogénéité de la qualité des cartes, les incohérences colorimétriques et, parfois, la surcharge d'informations ne permettent pas de récupérer des résultats de qualité acceptable sur un bon nombre de feuilles. L'IGN se limite à l'extraction automatique uniquement pour la classe bâtiment, car celle-ci fonctionne bien quelle que soit la carte.

Dans un scénario où l'intégralité des classes d'occupation est saisie manuellement, il est recommandé de vectoriser selon un ordre précis afin de faciliter le partage de géométrie interclasses indispensable dans la production de n'importe quelle couche d'occupation du sol (voir paragraphe suivant). Dans un premier temps sont saisies les couches linéaires (limites administratives, réseau routier principal, réseau ferré, réseau hydrographique) et, dans un second temps, les couches surfaciques (culture, forêt, prairie, pâture, hydrographie surfacique…). Les couches surfaciques s'imbriquent parfaitement avec les couches linéaires. Dans un troisième et dernier temps, les couches surfaciques générées automatiquement sont ajoutées : les bâtiments, les zones urbaines et les surfaces administratives (entité linéaire vers polygone).

Le concept de partage de géométrie est essentiel pour la constitution de la couche ancienne d'occupation du sol, que l'on saisisse les seules forêts ou l'ensemble des classes (figure 5, ci-dessous). Pour expliquer le principe, rien de mieux qu'un exemple concret : un massif forestier bordant une route principale doit s'appuyer sur l'axe de la route, de façon à ce qu'une saisie *a posteriori* de la route puisse partager la géométrie de la lisière du massif forestier. Les limites administratives, les réseaux linéaires sont souvent des limites partagées avec d'autres objets. Cette manière de procéder permet de garantir l'absence de recouvrements (ou trous) entre les objets adjacents même s'il ne s'agit pas de structure topologique car il y a bien deux lignes qui se superposent avec les mêmes coordonnées géographiques (route et lisière). La continuité et la cohérence géométrique sont alors assurées.

Figure 5 **EXTRAIT DE LA BD CARTO® ÉTAT-MAJOR SUR LE FINISTÈRE EN RESPECTANT LE CONCEPT DE PARTAGE DE GÉOMÉTRIE (IMBRICATION DES ENTITÉS LINÉAIRES AVEC SURFACIQUES)**



CONCLUSIONS

La méthodologie nationale proposée pour le géoréférencement et la vectorisation des cartes d'état-major fournit un cadre de travail homogène et répond aux besoins des futurs producteurs et utilisateurs des zones où les cartes de forêts anciennes n'ont pas encore été produites. Elle définit une méthodologie unique qu'il est conseillé d'utiliser pour réussir la production des cartes de forêts anciennes ou d'autres classes d'occupation du sol sur l'ensemble du territoire métropolitain. Grâce au premier volet de la méthode, il est devenu possible de géoréférencer sa vectorisation conformément au socle de référence et de l'améliorer rapidement grâce à la grille de transformation. Des outils de transformation sont mis à disposition, ainsi que des points de référence pour

la préparation du géoréférencement local. Le deuxième volet, quant à lui, permet de proposer aux utilisateurs une nomenclature nationale, un modèle de données, ainsi qu'un concept de saisie.

L'IGN en tant qu'établissement public de l'État responsable national de l'information géographique et forestière de référence est garant du continuum national de la couche d'occupation du sol historique. L'utilisation de la présente méthodologie permettra d'assurer une homogénéité du résultat sur le territoire métropolitain garantissant sa visualisation sur le Géoportail et le téléchargement des données sur le site de l'IGN. L'enjeu affiché est la centralisation de l'ensemble des initiatives de digitalisation des forêts anciennes avec pour objectif de constituer un référentiel national. Ce dernier offrira une utilisation optimale pour une multitude d'acteurs comme les gestionnaires de milieux naturels, urbanistes, paysagistes, collectivités locales, chercheurs, historiens, botanistes, phytosociologues, etc.

Thierry LALLEMANT
Ingénieur, chargé produit BD Carto® État-Major
IGN
Service des bases vecteurs
Direction de la production des référentiels
73 avenue de Paris
F-94164 SAINT-MANDÉ CEDEX
(thierry.lallemant@ign.fr)

Thierry TOUZET
Chef de produit « inventaire forestier et environnemental »
IGN
Service de l'inventaire forestier et environnemental
Direction de la production des Référentiels
Château des Barres
F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON
(thierry.touzet@ign.fr)

Alain GERVAISE
Directeur de programme « Forêt et Environnement »
IGN
Service des programmes
Direction des programmes civils
73 avenue de Paris
F-94164 SAINT-MANDÉ CEDEX
(alain.gervaise@ign.fr)

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude aux relecteurs dont les remarques ont permis d'améliorer la compréhension de l'article, à forte dimension technique.

BIBLIOGRAPHIE

CINOTTI B., 1996. Évolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle. *Revue forestière française*, vol. XLVII, n° 6, pp. 547-562.

FAVRE C., GREL A., GRANIER E., COSSERAT-MANGEOT R., BACHACOU J., DUPOUEY J.-L., 2013. *Digitalisation des cartes anciennes. Manuel pour la vectorisation de l'usage des sols et le géoréférencement des minutes 1 : 40 000 de la carte d'État-Major*. Champenoux : INRA. Version 12.7.3, 54 p.

LALLEMANT T., TOUZET T., 2016. *Méthodologie nationale pour le géoréférencement et la numérisation des cartes d'État-Major, minutes au 1 : 40 000*. 177 p.

IGN, 2016. *Descriptif de contenu SCAN Historique – Scan État-Major 1/40 000*. Saint-Mandé : IGN. 16 p.

IGN, 2016. *La Forêt en chiffres et en cartes*. Saint-Mandé : IGN. 29 p.

HERRAULT P.-A., 2015. *Extraction de fragments forestiers et caractérisation de leurs évolutions spatio-temporelles pour évaluer l'effet sur la biodiversité : une approche multi-sources*. Université de Toulouse. 410 p. (Thèse de doctorat en Géographie et aménagement).

HERRAULT P.-A., SHEEREN D., FAUVEL M., PAEGELOW M., 2015. Vectorisation automatique des forêts dans les minutes de la carte d'État-Major du 19e siècle. *Revue Internationale Géomatique*, vol. 25, n° 1, pp. 35-51.

RENAUX B., VILLEMEY A., TILLIARD-BLONDEL J., HAMADJIAN V., VERGNE T., PERERA S., 2016. *Forêts anciennes de l'Allier... un patrimoine d'avenir*. Poster, CBN Massif Central. [En ligne] disponible sur : http://www.cbnmc.fr/index.php/fr/doc/publications/autres-publications?download=139:les-forets-anciennes-de-l-allier-un-patrimoine-d-avenir

SALVAUDON A., HAMEL A., GREL A., ROSSI M., VALLAURI D., 2013. *Notice de la carte des forêts anciennes du Parc Naturel Régional du Luberon (1:40 000) avec référence aux autres usages du sol.* PNR Luberon, WWF. 8 p.

Sites Internet :

Géoportail : geoportail.gouv.fr

UNE MÉTHODOLOGIE NATIONALE POUR LE GÉORÉFÉRENCEMENT ET LA VECTORISATION DES CARTES D'ÉTAT-MAJOR, MINUTES 1/40 000 [Résumé]

Les cartes d'état-major, levées entre 1818 et 1866, s'avèrent un excellent révélateur historique des forêts anciennes. Elles permettent de qualifier le minimum forestier en France et d'étudier la continuité de l'état boisé jusqu'à nos jours en permettant par exemple la conception de cartes diachroniques, riches en enseignements. Dans l'optique de proposer un cadre et d'homogénéiser les pratiques, le ministère de l'Environnement a confié à l'IGN la rédaction d'une méthodologie nationale qui permette à chaque organisme public ou privé de se lancer, sans difficulté, dans la saisie des forêts anciennes mais aussi des autres occupations historiques du sol présentes sur les cartes. L'article présente une synthèse de la méthodologie proposée. Cette dernière apporte, dans un premier temps, des méthodes et des outils pour géoréférencer au mieux la géométrie des occupations du sol de la carte d'état-major, avec la mise à disposition d'une grille de transformation. Dans un second temps, la méthode apporte des éléments sur le modèle de données, la nomenclature et les concepts de saisie à s'approprier pour être conforme aux attentes. L'objectif étant de produire un référentiel homogène France entière pouvant être utilisé par de nombreux acteurs, et valorisé sur le Géoportail.

A NATIONAL METHODOLOGY FOR GEO-REFERENCING AND VECTORISATION OF ÉTAT-MAJOR MAPS, 1/40 000 FIELD SKETCHES [Abstract]

French Ordnance Survey (Etat-Major) maps, surveyed between 1818 and 1866, prove to be an excellent historical indicator of ancient forests. They have been used to characterise the historical minimum forest area in France and to study forest continuity up to the present day, for instance by providing the material for drafting enlightening diachronic maps. With a view to offering a framework and standardising practices, the Ministry of the Environment has entrusted IGN [National Geographic Institute] with establishing a national methodology that will enable public and private bodies to easily venture into the digitization of ancient forests but also of the other historical uses of the land present on the maps. The article presents a summary of the proposed methodology. In the first place, it provides methods and tools for optimally geo-referencing the land cover and the other layers of Etat-Major maps using a transformation grid. As a second step, the method provides elements on the data model, the nomenclature and the digitization concepts. The aim is to produce a uniform frame of reference for the whole of France that can be used by many players and leveraged on the IGN's Géoportail website.