VERS LA RÉALISATION D'UNE CARTE GÉORÉFÉRENCÉE DES FORÊTS ANCIENNES DE FRANCE

par Jean-Luc Dupouey(1), Jean Bachacou(1), Régine Cosserat(1), Serge Aberdam(2),Daniel Vallauri(3), Gérard Chappart(4) et Marie-Anne Corvisier de Villèle(5)
(1) UMR Écologie et écophysiologie forestières, INRA-Nancy, 54280 Champenoux
dupouey@nancy.inra.fr
(2) Unité Transformations sociales et politiques liées au vivant, INRA-Ivry, 63 boulevard de Brandebourg, 94205 Ivry Cedex
aberdam@ivry.inra.fr
(3) Fondation WWF-France, 6 rue des Fabres, 13001 Marseille
dvallauri@wwwf.fr
(4) Cartothèque de l'IGN, 2 avenue Pasteur, 94165 St-Mandé Cedex
cartotheque@ign.fr
(5) Service historique de la défense, Château de Vincennes BP 107, 00481 Armées

RÉSUMÉ

Au cours des deux derniers siècles, les statistiques forestières nous indiquent que la forêt a presque doublé de surface en France, regagnant d'immenses terroirs agricoles abandonnés. Or, les recherches en cours en écologie forestière montrent l'impact majeur de cette mutation sur le fonctionnement actuel des écosystèmes forestiers. La fertilité des sols et des peuplements forestiers, la biodiversité sont modifiées de façon pérenne par l'agriculture ancienne. De nombreuses espèces herbacées forestières ne peuvent recoloniser les forêts récentes, et restent cantonnées aux forêts anciennes. Les gestionnaires de l'environnement ont donc besoin de données spatialisées précises sur l'ancienneté de l'état boisé des forêts actuelles. Les cartes anciennes apportent une information précieuse sur le milieu naturel et l'occupation du sol, même si tel n'était pas leur objectif premier. Ainsi, pour la Lorraine, les cartes des Naudin, des Cassini et de l'État-Major rendent compte de l'évolution du couvert forestier au cours des derniers 250 ans. Il reste à intégrer cette information sur l'usage ancien des sols dans des systèmes d'information géographique afin de pouvoir l'utiliser pleinement, en la croisant avec les cartes environnementales actuelles. Cette mise en œuvre soulève des problèmes d'acquisition numérique, d'extraction des contours forestiers et surtout de géoréférencement. La mise en correspondance des différentes cartes nécessite une rectification appropriée qui peut aller jusqu'à la déformation élastique des cartes les plus anciennes. La carte de l'État-Major est probablement le meilleur candidat pour la réalisation d'une carte des forêts anciennes de France, car elle est précise, couvre presque toute la France actuelle et a été levée dans la première moitié du XIXe siècle, à une date proche de celle du minimum de la couverture forestière. Ce travail de longue haleine nécessitera la collaboration de tous les gestionnaires de l'environnement, géographes et historiens concernés.

INTRODUCTION

La France, comme la plupart des pays d'Europe, connaît depuis deux siècles une évolution majeure de l'utilisation de son sol. Après plusieurs millénaires d'érosion plus ou moins continue, la forêt regagne aujourd'hui d'immenses territoires. La forêt française a presque doublé en surface depuis la date de son minimum, autour de 1830 (P. Rousseau, 1990 ; B. Cinotti, 1996 ; W. Koerner *et al.*, 2000). Cette recolonisation forestière a connu quelques périodes de forte accélération : reboisement des terrains de montagne à la fin du XIXe siècle, incitations à la plantation des terrains agricoles abandonnés par le Fonds forestier national de 1946 aux années 1990. Encore aujourd'hui, alors que la recolonisation forestière est très largement naturelle, on observe toujours une progression rapide des forêts. Au cours de la décennie 1993-2003, la forêt a regagné 60 000 ha par an en moyenne, d'après l'enquête Teruti (N. Hamza, 2005). La baisse des superficies forestières depuis le Néolithique avait bien été entrecoupée de quelques périodes de rémission, plus ou moins longues, lors des crises démographiques comme celle de la fin du Moyen Âge par exemple, mais jamais nos paysages n'avaient connu une reforestation d'une telle ampleur et durée. Il s'agit là d'une véritable révolution écologique, sans doute l'évolution la plus marquante des écosystèmes forestiers au cours du XXe siècle. Nous allons montrer ici pourquoi la prise en compte de ce changement de l'utilisation du sol intéresse potentiellement divers acteurs de la gestion du territoire, quels sont les documents cartographiques qui permettent d'envisager la reconstitution de l'usage ancien des sols à large échelle et où en est le travail de digitalisation de ces documents.

1 POURQUOI UNE CARTE DES FORÊTS ANCIENNES DU TERRITOIRE ?

On sait maintenant que, lorsqu'une forêt recolonise une zone agricole abandonnée, que ce soit par régénération naturelle ou artificielle (plantation), la forêt garde une trace à long terme de son usage agricole ancien (W. Koerner *et al.*, 1997). Les sols sont modifiés de façon pérenne. Leur acidité et leur teneur en carbone sont plus faibles, la réserve en eau, les teneurs en phosphore et en azote sont plus élevées dans les zones anciennement cultivées. L'augmentation de la réserve en eau résulte de l'épierrement qui précède ou accompagne le labour. Les modifications chimiques du sol

sont dues aux apports anciens de fumier, qui ont entraîné une augmentation à très long terme de la teneur en phosphore, et qui ont aussi profondément modifié l'activité microbiologique des sols, permettant le maintien d'une production élevée de nitrates. Dans le même temps, le pâturage et l'exportation d'éléments minéraux hors des prairies et des forêts sont allés de pair. L'élevage s'est donc accompagné, au cours des siècles, d'une redistribution des éléments fertiles des sols depuis les zones appauvries, pâtures et forêts, vers les zones enrichies, prairies, cultures et jardins. En région méditerranéenne, les phénomènes d'érosion peuvent aussi provoquer une altération irréversible des sols suite à la mise en culture.

La flore des parcelles forestières anciennement cultivées diffère de celle des parcelles non cultivées (J.-L. Dupouey *et al.*, 2002a). On y trouve une plus grande abondance d'espèces dites neutrophiles et nitrophiles, qui profitent des meilleures conditions de nutrition minérale : l'ortie (*Urtica dioica*), le géranium Herbe-à-Robert (*Geranium robertianum*), le groseillier à maquereau (*Ribes uva-cripa*) ou la pervenche (*Vinca minor*) par exemple. Ces espèces sont des colonisatrices efficaces des milieux enrichis par l'homme (espèces rudérales). À l'opposé, certaines espèces sont inféodées aux zones forestières qui n'ont pas été cultivées. Les plus communes et caractéristiques sont le muguet (*Convallaria majalis*) et l'anémone des bois (*Anemona nemorosum*). Outre leur plus faible adaptation à la concurrence sur des sols enrichis en azote et en phosphore, ces espèces se reproduisent principalement par voie végétative (rhizomes, stolons, bulbilles…). Elles ont une durée de vie longue et leur capacité de dispersion de semences est généralement très faible. L'ensemble de ces mécanismes explique qu'elles n'aient que partiellement recolonisé les milieux anciennement perturbés, même après plus d'un siècle d'abandon des activités agricoles. Cette difficulté à se déplacer dans des paysages en mutation les rend fragiles et leur confère une valeur patrimoniale plus élevée que celle des espèces des forêts anciennement cultivées. De nombreuses autres composantes de la biodiversité semblent elles aussi dépendre de la continuité temporelle de l'état forestier : mousses, lichens, champignons, insectes.

Ces différences de fertilité des sols et de biodiversité ont conduit à distinguer, dans le paysage actuel, les forêts préexistantes au minimum forestier de la première moitié du XIXe siècle, désignées par le terme précis de forêts anciennes, par opposition aux forêts dites récentes, installées par la suite. Cette distinction se réfère à la continuité de l'état boisé, et non à l'âge des arbres ou du peuplement, qui peuvent atteindre plus de 150 ans dans les forêts récentes.

Les différences de fertilité induites par l'agriculture ancienne affectent aussi la croissance et l'état de santé des arbres. La hauteur dominante des peuplements à un âge donné constitue un bon indicateur de leur productivité. Dans les plantations d'épicéa des Vosges, elle est très supérieure (de 3 à 5 mètres à 90 ans) sur les anciennes terres labourées par rapport aux zones jamais cultivées. Mais le bois de cœur des épicéas y est plus souvent dégradé par un champignon pathogène, le fomes (*Heterobasidion annosum*), qui profite de la richesse des sols. L'intensité des dépérissements forestiers actuels, de chêne dans le centre de la France ou de résineux en Europe continentale, dépend de l'histoire des prélèvements anciens (bois, litière, pâturage) qui ont provoqué un appauvrissement excessif des sols les plus sensibles.

Récemment, les études menées sur les abandons culturaux de l'époque gallo-romaine ont montré que cette mémoire des forêts pouvait s'étendre sur plusieurs millénaires puisque les sites anciennement cultivés entre le Ier siècle avant notre ère et le IIIe siècle après, puis abandonnés, montrent encore aujourd'hui un enrichissement significatif de leurs sols et des modifications importantes de la végétation du sous-bois (J.-L. Dupouey *et al.,* 2002b ; É. Dambrine *et al.*, 2007). La pérennité, voire l'irréversibilité des effets de l'agriculture ancienne, placent donc ce facteur historique quasiment au même rang d'importance que les facteurs stationnels classiques (topographie, substrat…) pour ce qui est de la caractérisation de la diversité des milieux forestiers et de leurs potentialités.

L'intérêt pour une cartographie de l'histoire de l'occupation des sols dépasse largement le seul cadre forestier. Des phénomènes d'impact à long terme de l'agriculture ancienne sur la biodiversité des pelouses contemporaines, très semblables à ceux décrits pour les forêts, ont été récemment mis en évidence par T. Dutoit *et al*. (2005). Les zones humides sont probablement le type d'occupation du sol qui a subi la plus forte régression en Europe du fait des activités humaines. Or, ces zones humides jouent un rôle dans les dynamiques fluviales, la pollution des réseaux hydrographiques, le maintien dans le paysage de groupes d'espèces inféodées. La cartographie précise de leur évolution permettrait certainement de mieux comprendre et maîtriser certains aspects du fonctionnement actuel des hydrosystèmes (J.-M. Derex, 2001). Les cartes anciennes offrent la possibilité de retracer les changements du lit des grandes rivières. Le cadastre du duché de Savoie (dit mappe sarde), dressé entre 1728 et 1738, indique les zones inondées lors de la crue catastrophique de 1733. Cette information a été utilisée pour le tracé de l'autoroute de la vallée de la Maurienne. Les impacts du changement climatique en cours peuvent être étudiés au travers des cartes anciennes. Les glaciers sont actuellement en forte régression sous l'effet de l'élévation des températures. Or, les torrents glaciaires sont souvent dessinés avec précision sur les cartes anciennes. On peut ainsi reconstruire leur dynamique de régression, précieuse information pour la climatologie historique. Les changements à long terme de l'aire de répartition de la vigne, espèce sensible au climat, pourraient aussi être étudiés car c'est l'une des utilisations du sol, avec la forêt, la plus régulièrement représentée sur les cartes anciennes.

La gestion conservatoire de la nature doit aussi pouvoir s'appuyer sur des données historiques pour la recherche des sites d'espèces ou de milieux rares, la compréhension des causes de leur apparition et de leur maintien et, plus encore, la mesure de leur valeur patrimoniale, le choix du statut de protection à leur accorder et leur gestion ultérieure (D. Vallauri, 2007 ; E. Trotignon, 2006). La décision de mise en réserve intégrale par exemple devrait prendre en compte

l'antécédent historique, ce qui est pourtant rarement le cas aujourd'hui. Les opérations de restauration d'écosystèmes dégradés nécessitent la connaissance de la dynamique passée du milieu qui a été modifié et, en particulier, son état avant la perturbation. Ce besoin est de plus en plus ressenti dans les zones urbaines et péri-urbaines, où le lien avec le milieu naturel d'origine est souvent totalement rompu. Les cartes anciennes apportent alors des informations précieuses pour répondre à cette difficile question de l'état de référence des écosystèmes. Le projet Mannahatta vise à reconstruire une carte des écosystèmes du territoire de l'actuelle ville de New York tels que Henri Hudson les découvrit en 1609, et leur évolution ultérieure (E.W. Sanderson et D. LaBruna, 2005). Cette connaissance est mise à profit dans les opérations d'aménagement (parcs, berges…) afin, localement, de tenter de reconstruire des milieux proches de leur état initial. Mais surtout, elle a une forte valeur éducative pour le jeune public en lui faisant prendre conscience de l'origine de la ville. Ce projet repose principalement sur un examen des cartes anciennes de la région (plus de 80) et sur la numérisation d'une partie d'entre elles.

Pour toutes les raisons évoquées précédemment, l'ancienneté des forêts doit être un paramètre à intégrer dans la gestion des forêts, au même titre que la typologie des stations forestières ou des peuplements, par exemple, qu'elle vient compléter. Il est bien prévu dans les aménagements forestiers une partie historique, mais celle-ci est souvent très partiellement renseignée et surtout, elle ne prend en compte l'histoire qu'en tant qu'élément patrimonial et non comme outil de gestion. Nous proposons donc l'établissement d'une carte des forêts anciennes du territoire national. Cet objectif n'est pas si utopique qu'il pourrait paraître à première vue. A. Perpillou (1979) avait construit, au 1 : 1 400 000, une première carte d'utilisation du sol d'après les données du cadastre napoléonien. L'Angleterre s'est dotée d'une carte nationale des forêts anciennes (forêts déjà existantes en 1600) au 1 : 25 000, disponible sur Internet (http://www.english-nature.org.uk/pubs/gis/tech_aw.htm) et très utilisée (J.W. Spencer et K.J. Kirby, 1992). Les données sur l'environnement actuel se présentent sous des formes variées, cartes, bases de données, images aériennes ou satellites qui ont en commun d'être de plus en plus précisément géoréférencées. Pour être opérationnelle, la connaissance sur l'ancienneté des forêts devra être disponible sous forme directement cartographique, elle aussi géoréférencée et intégrée dans les systèmes d'information géographique déjà existants. Nous avons testé plusieurs approches pour atteindre cet objectif et nous présentons ici les résultats de ces premières recherches. cartes, bases de données, images aériennes ou satellites, qui ont en commun d'être de plus en plus précisément géoréférencées. Pour être opérationnelle, la connaissance sur l'ancienneté des forêts devra être disponible sous forme directement cartographique, elle aussi géoréférencée et intégrée dans les systèmes d'information géographique déjà existants. Nous avons testé plusieurs approches pour atteindre cet objectif et nous présentons ici les résultats de ces premières recherches.

2 QUELLES SOURCES CARTOGRAPHIQUES POUR UNE CARTE DES FORÊTS ANCIENNES ?

2.1 Avant et pendant Cassini

Dès la fin du Moyen Âge, on dispose de plans terriers qui, moyennant un long et minutieux travail, permettent de reconstruire les parcellaires anciens, leur utilisation et donc une histoire de l'utilisation des sols. L'informatisation de ces données a été, par endroits, entamée, afin d'étudier les changements d'utilisation du sol (N. Poirier, 2006). Mais ce travail reste limité aux zones, très localisées semble-t-il, où des données sont disponibles. Il en est de même pour les nombreux plans de bornage réalisés dans les forêts, aujourd'hui domaniales, à l'époque de la réformation de Colbert (1661-1680). C'est le cas par exemple du plan de bornage de la forêt de Tronçais (Allier), réalisé en 1665, qui couvre plus de 10 000 ha à l'échelle de 1 : 10 000.

Si la carte des Cassini est la première à couvrir l'ensemble de la France, elle est précédée, dès la fin du XVIIe, ou accompagnée, tout au long du XVIIIe, de cartes régionales qui ont l'avantage d'être dressées à des échelles souvent plus fines que celle des Cassini et, surtout, avec un certain souci de représentation de la nature des sols. Lorsqu'il s'agit de cartes militaires, les forêts sont souvent représentées avec soin, car ce sont des obstacles à la progression des troupes, des zones où l'ennemi peut se cacher. L'ingénieur du Génie d'Arçon écrit en 1775 à ses officiers : «on distinguera, par exemple, […] les bois, les prés, les vignes, les pelouses, les terres labourées, les parties incultes, les terrains arides et pierreux et autres détails semblables qu'il suffira de désigner en masse et exactement, partout où il y en a ». Nous présentons ici une liste des cartes à grande échelle et ayant une grande extension qui pourraient aider à la réalisation de la carte des forêts anciennes de France. Elles sont pour la plupart conservées par la Cartothèque de l'IGN, les Archives de la Défense (M.-A. Corvisier-de Villèle et C. Ponnou, 2002), la Bibliothèque nationale ou les Archives nationales.

Dans le Nord, les cartes des Naudin, levées entre 1728 et 1739, couvrent une partie de l'Alsace, de la Lorraine, de la Champagne-Ardennes et du Nord-Pas de Calais (M.-A. Corvisier-de Villèle, 1995 ; P.-E. Wagner, 2003). Elles ont été dressées au 1 : 28 800. La largeur minimale des bois y est de l'ordre de 125 m. Le Conseil régional de Lorraine en a mis la plus grande partie en ligne (www.chr-lorraine.fr/naudin).

Les Alpes sont levées au 1 : 14 400 depuis le comté de Nice jusqu'au Bugey par les ingénieurs de Montannel et Pierre-Joseph de Bourcet, entre 1749 et 1758. De ces levés est issue la *Carte géométrique du Haut-Dauphiné et de la frontière ultérieure*, publiée en 1758 au 1 : 86 400. Ce travail est poursuivi aux mêmes échelles de 1775 à 1786 dans le Jura, jusqu'à la frontière du Rhin, par l'ingénieur d'Arçon. Une nouvelle carte du comté de Nice est dressée en 1763-1764, toujours au 1 : 14 400, par les ingénieurs piémontais. Le duché de Savoie (actuels départements de la Savoie et de la Haute-Savoie) est couvert par une première carte au 1 : 47 200 en 1728. Mais surtout, pendant les dix années qui suivent, est réalisé le cadastre de la région à l'échelle

extraordinairement fine de 1 : 2 372. Le détail des utilisations du sol y est luxueux (P. Guichonnet, 1942). Il est progressivement accessible sur Internet, mais en mode payant, aux Archives départementales de Savoie (www.savoie-archives.fr).

Une partie importante de l'actuelle région Provence-Alpes-Côte d'Azur est couverte par la carte au 1 : 14 400 de d'Arçon, en 1777 et 1778. La réalisation du cadastre de la Corse, au 1 : 10 800, démarre à la fin des années 1760 et durera trente ans. Les 57 rouleaux correspondants sont conservés au Service historique de la Défense.

De nombreuses cartes apportant des informations intéressantes sur la répartition des masses forestières à une échelle suffisamment grande pour notre objectif couvrent les environs de Paris (Dufay J.-P., 1997-1998) :
- la *Carte particulière des environs de Paris* au 1 : 86 400, éditée en 1678 par l'Académie des sciences ;
- la carte des *Environs de Paris* levée par l'abbé de La Grive à partir de 1731 au 1 : 17 280 ;
- la *Carte topographique des environs de Versailles dite des chasses royales,* réalisée entre 1764 et 1773 et complétée sous l'Empire, publiée au 1 : 28 800, mais levée au 1 : 14 400 ou 1 : 7 200 par endroit (Rambouillet) ;
- la carte de Dom Coutans, au 1 : 64 520, réalisée entre 1773 et 1786 ;
- le cadastre par masses de culture de Bertier de Sauvigny, réalisé de 1776 à 1791 (M. Touzery, 1995), à une échelle plus grande que le 1 : 10 000 ; il est consultable, pour les Yvelines, sur le site des Archives départementales (www.cg78.fr/archives/seriec/db).

Dans le Sud-Ouest de la France, on trouve la carte du littoral de l'Atlantique, par Claude Masse, au 1 : 28 800, réalisée entre 1688 et 1724. Une partie de cette zone, l'Aunis, est cartographiée à nouveau entre 1778 et 1786 par Bartholomé au 1 : 14 400.La carte de Guyenne, levée entre 1761 et 1789 au 1 : 43 200 par Pierre de Belleyme, est accessible en ligne aux Archives du Lot-et-Garonne (http://www.cg47.fr/archives/coups-decoeur/Belleyme_infos/Belleyme_.htm). Elle recoupe les départements de la Dordogne et Gironde, des Landes et du Lot-et-Garonne. Le figuré et les contours des cultures pérennes, et en particulier des forêts, y sont très clairs.

On citera pour mémoire les cartes des diocèses qui, malheureusement, sont le plus souvent dressées à des échelles trop petites pour apporter une information fine sur l'emplacement des forêts. Les cartes des diocèses publiées à une échelle supérieure au 1 : 100 000 (Senlis, Meaux…) sont trop rares pour avoir un intérêt autre que local.

Un ensemble de cartes à grande échelle ont la caractéristique commune de suivre de près des éléments géographiques linéaires : frontières, côtes, rivières, routes, canaux… Lorsque la bande cartographiée est assez large, ces cartes peuvent se révéler très utiles pour la cartographie de l'occupation ancienne du sol. On citera dans cet ensemble :
- L'atlas des routes de Trudaine (1745-1780), qui couvre une bande de 2,5 km en moyenne de chaque côté des principales routes d'une partie de la France, au 1 : 8 640 (ces plans sont en partie numérisés et accessibles en ligne : http://www.culture.gouv.fr/documentation/archim/atlasdetrudaine.htm).
- Les cartes de la frontière du Nord et du Nord-Est de la France, « depuis Dunkerque à Mertzig » et « depuis le Rhin jusqu'à Givet », datées de 1773 et réalisées au 1 :14 400 ; la même frontière est cartographiée à nouveau « depuis la mer du Nord jusqu'au Rhin » en 1816, toujours à la même échelle.
- La carte des côtes de Bretagne de 1776 ; cette série de 61 feuilles couvre la côte au 1 : 14 400 jusqu'à 4 km de profondeur, parfois nettement plus ; l'occupation du sol y est figurée avec soin. Dans son « Instruction pour les Ingénieurs-Géographes des Camps et Armées chargés de lever la carte militaire des Côtes de l'océan », le comte d'Hérouville indique : « Quant à la minute qu'ils feront en campagne, ils se conformeront tous à mettre au carmin les villes, villages, hameaux, fermes, murs de maçonnerie etc. Toutes les montagnes, ravins, escarpements et falaises seront hachés à l'encre de chine. Les marais seront ondoyés avec la même encre mêlée à un peu de vert de pré et de vert d'eau. Les prés seront seulement désignés par un (P) après quoi on y étendra une teinte de vert un peu clair, les bois par un (B) puis par une teinte de vert fort jaunâtre, les landes ou bruyères par un (L) et une teinte rougeâtre ; les vignes par un (V) et une teinte rousseatre ; les terres labourables resteront blanches. ». La structure des forêts doit aussi être précisée : « On aura soin de distinguer entre les bois ceux qui sont taillés en futaies ; et dans chaque espèce ce qui est clair ou fourré, ainsi que les clairières quand il y en a. Dans les cartes mises au net, le dessin fait avec soin peut rendre assez distinctement ces différences. » (1771, cité par E. Gløersen, 2001).
- *La Carte du canal royal de la province de Languedoc* au 1 : 17 280, achevée en 1774.

2.2 La carte des Cassini

Levée entre 1749 et 1790, la carte des Cassini couvre en 181 feuilles l'ensemble de la France (hors la Corse, et une partie des actuels départements de Savoie, Haute-Savoie et des Alpes-Maritimes qui ne faisaient pas partie du royaume) à l'échelle de 1:86 400 (une ligne pour 100 toises). C'est la première carte homogène de l'ensemble du territoire. Comment ont été levées et sont représentées les forêts sur cette carte ? Ce document est-il utilisable pour atteindre notre objectif ? Le travail de M. Pelletier (2002) éclaire la façon dont les forêts sont représentées sur la carte des Cassini. Les contours des bois ne sont probablement pas relevés avec exactitude sur le terrain, comme l'indique Cassini III (César-François Cassini de Thury) : « Au travail de la journée devoit succéder celui de cabinet : il falloit, sur l'idée qu'ils avoient prise de la situation du pays, dessiner à peu près les hauteurs, les vallons, le contour des bois, la direction des chemins, le contour des rivières, la nature du terrein » (cité par M. Pelletier, 2002, p. 123-124). On comprend dès lors que la précision atteinte dans le positionnement de ces éléments soit faible. La figure 1 montre un exemple de comparaison entre les cartes des Naudin, des

Cassini et de l'État-Major. Sur la carte des Cassini, la ferme isolée (au lieu-dit Candal) est située au nord de la rivière, alors qu'elle est en réalité au sud. Le tracé de la rivière est lui-même beaucoup trop rectiligne. Mais, surtout, la représentation des forêts subit les mêmes approximations. Le bois situé à l'ouest de la ferme n'est pas représenté, alors qu'il apparaît bien sur les cartes des Naudin et de l'État-Major. Il en est de même du bois ceinturant le Grand Mont, au sud-ouest de la zone étudiée. Ainsi, il est probable que de nombreux bois ne soient pas figurés sur la carte des Cassini. La largeur minimale des bois représentés est assez élevée, de l'ordre de 250 m, plus élevée que celle des Naudin. En conséquence, le taux de boisement calculé à partir de cette carte est sans doute sous-estimé et la vitesse de recolonisation forestière qu'on en déduit par comparaison avec les cartes actuelles est surestimée. Pour les 6 feuilles des Préalpes du Sud, D. Vallauri (1997) estime que le taux de boisement est multiplié par 3 (de 13% à 40%) entre les années 1770-1780 et la période actuelle. Cette valeur est probablement un majorant de l'évolution réelle.

De fait, dès l'utilisation de la carte des Cassini, la localisation des bois est critiquée. César-François Cassini de Thury considère que, parmi les éléments du paysage, seuls les éléments permanents (les clochers principalement) méritent un positionnement précis pour cette entreprise difficile à financer, immense et nouvelle : « la Topographie de la France étoit sujette à trop de variations, pour pouvoir l'assujettir à des mesures fixes & invariables ; la seule position des Clochers étoit plus constante, & par conséquent déterminable » (cité par Pelletier, 2002, p. 133). Les boisements font typiquement partie de cette partie fluctuante du paysage qu'il ne faut pas essayer, selon lui, de délimiter avec précision. La situation n'évoluera d'ailleurs pas au cours du temps. En 1784, Jean-Dominique Cassini (Cassini IV), fils du précédent, écrit : la topographie « qui offre la description détaillée et scrupuleuse, non seulement des objets, mais même de la conformation du terrain, de l'élévation et du contour exact des vallées, des montagnes, des coteaux, des rivières, prés, bois, etc. […] est une partie de la géographie tellement étendue, si minutieuse, si longue et si coûteuse dans l'exécution, qu'elle ne peut pas être entreprise dans une carte générale. » (cité par M. Pelletier, 2002, p. 191).

Si la localisation des forêts est imprécise, qu'en est-il de leur figuration ? Il n'est pas publié de tableau général des signes conventionnels utilisés pour les représenter avant l'achèvement de la carte. Dans l'« Explication des caractères géographiques employés dans la Carte de France de l'Académie » de Jean-Claude Dezauche, on trouve deux figurés concernant les bois : « Bois ou forêt » et « Bois de sapins ». Dans leur remarquable travail d'inventaire des figurés et indications écrites de la carte des Cassini, C. Motte et M.-C. Vouloir (2006) indiquent la présence d'au moins onze types se rapportant à la présence de ligneux (hors arboriculture fruitière et parcs) : Arbres, Bois, Forêt (3 types), Pins, Pinède, Sapins, Garenne, Lande, Broussailles. Il pourrait donc sembler, au premier abord, que la carte des Cassini soit porteuse de riches informations sur l'état du boisement. Il n'en est rien. Plusieurs de ces figurés sont très semblables. Seul le texte qui leur est superposé permet de les distinguer (garenne et forêt, ou lande et marais par exemple). Mais l'utilisation de ces textes complémentaires, en dehors du nom des forêts, est rare dans la carte des Cassini. Les figurés concernant les bois peuvent être classés selon deux critères : le type d'essence (résineuse ou feuillue) d'une part, et le stade de dégradation de la forêt (bois et forêts *versus* landes et broussailles) d'autre part. Si la séparation entre résineux et feuillus semble bien tranchée, le degré de dégradation des forêts est plus ou moins bien représenté par une gamme de densités de bosquets très variables selon les feuilles ou au sein d'une même feuille, sans limites précises entre les classes de dégradation. Au-delà de leur définition, la façon dont ont été utilisés ces figurés est elle-même problématique. L'examen des limites entre feuilles montre qu'une même zone peut être représentée avec des figurés très variables (fig. 2). L'inspection visuelle de nombreuses feuilles suggère que les divers figurés utilisés dans la carte des Cassini ne visent à représenter, dans l'immense majorité des cas, que deux catégories de forêts : les bois fermés et les boisements lâches, ouverts (regroupant probablement les forêts dégradées plus ou moins pâturées, les landes, une partie des friches). L'utilisation des figurés indiquant la présence de résineux n'est pas systématique. Ils sont presque totalement absents de la montagne vosgienne par exemple, où les sapins, pins et épicéas étaient pourtant très fréquents. Parmi les 6 feuilles qui couvrent les Préalpes du Sud, D. Vallauri (1997) note que seule la carte d'Embrun distingue les forêts feuillues des forêts résineuses. On retrouve la même pauvreté de représentation de l'utilisation du sol dans les zones non boisées, qui sont le plus souvent figurées par le seul fond blanc des cartes. Les vignes, beaucoup plus étendues à cette époque qu'aujourd'hui, sont rarement représentées (fig. 3). En résumé, la carte des Cassini ne permet donc de séparer, sauf exception locale, que les trois catégories d'occupation agraire du sol suivantes : (1) les forêts fermées, (2) les forêts ouvertes, dégradées, les landes et friches et (3) les zones de cultures et prairies.

Il faut signaler qu'il existe, à la Cartothèque de l'IGN, des minutes de la carte des Cassini qui peuvent aider à interpréter le dessin des bois sur la carte finale. Les cartes des diocèses, publiées à la même époque et utilisant en partie les mêmes bases géographiques, sont probablement plus précises quant à la représentation de l'occupation du sol, comme elles le sont pour la présence des chemins ou la toponymie. Elles ont pu, en effet être vérifiées, par les diocèses. C'est le cas des cartes des diocèses du Languedoc éditées par César-François Cassini de Thury à la demande des États de Languedoc.

2.3 Le cadastre napoléonien

Le cadastre napoléonien est le premier document dont l'objectif est de rendre compte, à l'échelle nationale, de l'utilisation réelle des sols. Il a connu deux phases de réalisation. De 1802 à 1807 est réalisée une première tentative dite « par masses de cultures ». Tous les terrains cultivés de la même manière et portant des récoltes de même nature sont réunis en une seule et même masse puis reportés sur le plan, qui n'indique donc pas les limites des parcelles. Dans un premier temps, ce plan a été réalisé dans 1915 communes, à rai-

son de 2 à 8 communes choisies au hasard dans chaque arrondissement. Fin 1803, ce système est étendu à l'ensemble de la France. Au total, 15 935 communes auraient ainsi établi un plan de masses (A. Maurin, 1992). L'aspect de ces cartes varie de simples ébauches à de très beaux plans aquarellés, dressés généralement au 1 : 5 000. Mais leur qualité reste à quantifier. Ainsi, J.-B. Truchy de Bazouche, géomètre, fait le constat suivant en 1818 : « Ni les uns, ni les autres, ne connaissaient bien l'étendue de leurs devoirs. Les géomètres en chef, entrepreneurs de tout le travail, ne s'occupèrent qu'à tirer parti de la circonstance, et comme ils n'espéraient pas que ces travaux seraient de longue durée, ils les exploitèrent à leur profit, et les confièrent, presque partout, à des arpenteurs incapables de les exécuter [...]. Ce fut à ces agents, étrangers aux opérations géodésiques, que l'on confia cette vaste entreprise, et encore ne prit-on aucune précaution pour les former à l'avance, aux travaux qu'ils allaient exécuter [...]. Quelques géomètres même poussèrent l'oubli de toute convenance jusqu'à construire leurs plans d'après d'anciens plans qui leur avaient été communiqués. À peine prenaient-ils le soin de paraître dans les communes et d'opérer visuellement ». La série CP F[31] (105 à 165) des Archives nationales recèle les plans de 2 295 communes pour 71 départements. Où se trouvent les 13 640 autres ? Des originaux sont probablement restés dans les services du cadastre ou ont été versés aux archives départementales, mais les copies prévues ont dû être centralisées dans les services nationaux du cadastre, où elles ne sont plus accessibles aujourd'hui.

À partir de 1807 est établi un cadastre parcellaire. En 1827, il couvre 32% du territoire actuel. À la fin de 1850, il ne manque plus que le comté de Nice, la Corse, la Savoie et la Haute-Savoie. Ce document, parfois disponible en mairie, mais le plus souvent aux archives départementales, permet de reconstruire avec précision l'occupation du sol à sa date de réalisation, puisqu'il recense et cartographie, parcelle par parcelle, la nature des propriétés et leur valeur d'imposition. Il est d'ailleurs curieux qu'aucun document de synthèse des résultats à l'échelle nationale, qui ont probablement existé, n'ait jamais été mentionné. Divers types de plans sont fournis par le cadastre : le tableau d'assemblage d'une part, qui représente les différentes sections d'une commune, et les feuilles parcellaires, qui cartographient toutes les parcelles d'une section. Deux approches sont possibles pour reconstruire la carte des utilisations du sol à partir du cadastre parcellaire : reprendre le plan parcellaire de chaque section, rechercher pour chaque parcelle son type d'utilisation dans ce qu'on appelle les états de sections et construire ainsi petit à petit le plan de l'ensemble de la commune. L'échelle de ces feuilles parcellaires varie, suivant le morcellement et la date de réalisation, du 1 : 500 au 1 : 5 000, l'échelle pouvant même être plus petite encore. Mais dans beaucoup de cas, le plan d'assemblage global de la commune, établi à la suite des plans parcellaires, présente l'intérêt d'indiquer les masses forestières, avec les principaux chemins, cours d'eau, lieux-dits… Ainsi, on peut travailler directement sur ce plan. Cependant, il s'agit d'une réduction des plans parcellaires, souvent au 1 : 10 000 ou au 1 : 20 000. Ce plan peut donc être moins précis que les plans parcellaires. De plus, il n'est pas certain que toutes les parcelles boisées soient toujours représentées sur ce plan d'assemblage qui, en outre, est parfois absent ou ne représente pas les masses forestières. Dans de nombreux départements (Aveyron, Pyrénées-Atlantiques, Yvelines…), le cadastre napoléonien est en cours de numérisation comme le montre la liste partielle, accessible sur le site du Ministère de la culture et de la communication (www.numerique.culture.fr). Il s'agit bien sûr de scannage, et non de vectorisation des parcellaires.

On rencontre dans les états de sections du cadastre une grande variété de termes pour décrire la nature des terrains boisés. P. Derioz (1999) met en garde contre une utilisation trop naïve de ces catégories. Les « landes » par exemple peuvent indiquer des étendues stériles en raison d'un substrat rocheux affleurant, des parcours pastoraux plus ou moins envahis par les ligneux, des accrus forestiers, mais aussi de vraies landes, garrigues ou maquis. Par suite d'un impôt foncier moindre pour les landes que pour les forêts, mais aussi par ignorance de l'état de leurs anciennes terres agricoles, abandonnées parfois depuis longtemps, les propriétaires tardent à déclarer les accrus forestiers. Le cadastre tendrait ainsi à sous-estimer le taux de boisement réel. À l'inverse, J. Lepart *et al*. (1996) montrent que, dans la région méditerranéenne du moins, le pâturage et la surexploitation forestière ont progressivement transformé d'anciens bois en buissons et garrigues. Or, ces terrains continuent pendant longtemps à être déclarés au cadastre selon leur potentialité forestière supposée. On aboutit alors à un effet inverse du précédent, la surestimation du taux de boisement. Finalement, comme sur la carte des Cassini, seule la distinction entre les 3 catégories (1) forêts fermées, (2) espaces en déprise (friche, chaume, landes, broussailles…) ou forêts dégradées, et (3) zones cultivées nous semble pertinente pour la description de l'état du boisement sur l'ensemble du territoire à partir du cadastre.

2.4 La carte de l'État-Major

Levée de 1818 à 1866, la carte de l'État-Major couvre l'ensemble de la France en 273 feuilles au 1 : 80 000. Elle est éditée en noir et blanc. C'est la première carte qui allie grande précision géométrique et détail dans la représentation de l'utilisation du sol (fig. 1 et 4). Les levés sont faits initialement au 1 : 10 000, dans les environs de Paris, puis au 1 : 20 000 après 1823. Le cadastre, en cours de réalisation à la même époque, n'est utilisé qu'à partir de 1824 ou 1825. À partir de 1830, la carte de l'État-Major est systématiquement réalisée à partir de plans cadastraux réduits au 1 : 40 000, complétés par des levés de faible étendue au 1 : 20 000 lorsque le cadastre manque (A.-L. Blondel, 1853). Les minutes de la carte, en couleur, sont conservées à la Cartothèque de l'IGN. Comment le levé des utilisations du sol a-t-il été réalisé lorsque le cadastre n'était pas encore achevé ? Comment les plans cadastraux ont-ils été vérifiés et corrigés sur le terrain ? Il serait intéressant de préciser les relations entre ces deux opérations, afin de mieux comprendre leur contenu respectif.

Toujours est-il que les minutes de la carte de l'État-Major donnent, sur de grandes surfaces, une représentation très détaillée des contours forestiers, beaucoup plus fine que celle de la carte des Cassini. La largeur minimale des bois représentés s'approche de la valeur actuelle, d'environ 25 m.

Sont aussi bien représentées les prairies et les cultures pérennes (vignes et vergers). Cette précision se dégrade dans plusieurs régions de France, en particulier en montagne (fig. 5), dans le Sud et dans l'Ouest de la France où la limite entre espaces forestiers, en friches ou pâturés est souvent plus floue. Est-ce lié au caractère réellement plus diffus de la limite entre zones de cultures et forêts dans ces régions, en comparaison avec les zones de grandes cultures de plaine où ces limites sont depuis longtemps très tranchées ? Ou bien est-ce lié à l'absence de cadastre au moment de la réalisation de la carte ? Encore une fois, il serait intéressant de mieux le comprendre.

Les instructions de 1823 indiquent la possibilité pour les ingénieurs cartographes de distinguer par des lettres la composition en essences (C pour chêne, H pour hêtre… en majuscules ou minuscules selon la dominance) et le traitement sylvicole (F pour futaie, T pour taillis) des masses forestières (H. Berthaut, 1898, p.301). Mais nous n'avons jusqu'à maintenant observé aucune marque de ce type sur les cartes que nous avons examinées, où les forêts sont toutes représentées de façon homogène. Il faut attendre la révision de 1889 de la carte de l'État-Major pour voir apparaître les « Broussailles » parmi les figurés utilisés dans la publication au 1 : 80 000 (H. Blumenfeld *et al*., 1997), témoin probable d'une recolonisation forestière en marche.

3 MÉTHODE DE RÉALISATION ET ÉTAT D'AVANCEMENT

Comment intégrer dans un système d'information géographique les usages du sol à partir de ces documents anciens ? Cinq étapes sont nécessaires : la photographie de la carte, le scannage de la photographie qui permet d'obtenir un fichier informatique, la vectorisation des contours forestiers ou d'usage des sols à partir de ce fichier, le redressement final de la carte afin de pouvoir la superposer aux cartes actuelles, le raccordement des contours des forêts représentées sur deux feuilles.

3.1 Photographie de la carte

C'est une étape nécessaire ou conseillée dans la plupart des cas, pour plusieurs raisons.

- Les documents originaux sont souvent très grands, et leur scannage direct est donc cher et techniquement difficile, voire impossible. La « Carte très particulière du pays compris entre les villes de Sierques, Remich, Treves, Bern Castel, Traerbach » des Naudin (1737, Bibliothèque municipale de Metz, RES ROL 011) par exemple mesure 3,5 x 2,4 m.

- La valeur des documents, souvent des originaux anciens détenus en un seul exemplaire, leur fragilité, leur état parfois mauvais font déconseiller leur manipulation et leur transport. Or, les travaux de scannage ne peuvent pas toujours avoir lieu sur place.

- Le support photographique permet le stockage de l'information à une résolution suffisante. Un ektachrome (diapositive de grande taille) offre une résolution de l'ordre de 100 lignes par mm (environ 2500 dpi -*dots per inch* ou points par pouce-). À cette résolution, la réalisation de seulement 4 ektachromes de 20 x 25 cm de la carte des Naudin citée ci-dessus permettrait de la reproduire avec une résolution de 300 dpi sur le document d'origine. On peut multiplier les ektachromes pour augmenter cette résolution, sans oublier que l'assemblage des images nécessitera ensuite des opérations de rectification. L'utilisation de supports photographiques de grande taille permettra d'éviter ces problèmes d'assemblage, tout en augmentant les risques de déformation. Mais, pour beaucoup de cartes anciennes, le document original est plus petit, et une seule photographie suffit.

Quelques précautions élémentaires doivent être prises lors de la photographie pour assurer la qualité du travail de géoréférencement ultérieur : une mire de taille connue sera posée sur le côté de la carte, ou, beaucoup mieux, on en disposera plusieurs sur les côtés ou aux angles. Ces mires sont nécessaires afin de pouvoir calculer, à partir des images numérisées, l'échelle de la carte. Si on veut aussi conserver une information sur l'orientation de la carte, il faut que ses bords soient visibles sur la photographie. Les mires pourront aussi servir à estimer les inévitables déformations introduites par la photographie. Mais une façon plus efficace de contrôler ces déformations consiste à photographier une grille à maille carrée de même taille que la carte. Avec le matériel photographique utilisé lors de la numérisation de la carte des Naudin, nous avons ainsi estimé la déformation moyenne à 1,1 mm sur une grille de 60 x 96 cm, soit plus de 30 m sur le terrain (E. Gløersen, 2001).

3.2 Scannage

La qualité du fichier informatique obtenu dépend bien sûr de la résolution du scannage de la photographie effectuée à l'étape précédente. On a les relations suivantes entre les résolutions sur le scan, sur la carte et sur le terrain :
- résolution sur la carte = résolution du scan de la photographie x rapport de réduction lors de la photographie, et :
- résolution sur le terrain = résolution sur la carte x échelle de la carte
= résolution du scan de la photographie x rapport de réduction lors de la photographie x échelle de la carte

Dans le cas de nos travaux sur les minutes au 1 : 40 000 de la carte de l'État-Major, chaque feuille a une taille de 50 x 80 cm, le support photographique est un ektachrome de 20 x 25 cm, la réduction photographique est de 1 : 4,5 et la résolution du scannage de la photographie est de 1600 dpi. Nous travaillons donc, lors de la vectorisation, avec des pixels qui représentent 0,07 mm sur la carte (356 dpi), et 2,9 m sur le terrain. L'image ainsi scannée occupe 240 Mo. À l'usage, cette résolution de 356 dpi nous est apparue très satisfaisante pour la vectorisation des contours forestiers, mais encore limitée pour la lecture des plus petits caractères. Un scannage à une résolution plus élevée (3200 dpi) aurait permis d'améliorer la lisibilité de l'image.

Pour les Naudin en Lorraine, les cartes initiales ont des tailles variables : 190 x 240 cm pour le fol. 8, 200 x 254 cm

pour le fol. 10. Le support photographique est un ektachrome de 10 x 12,5 cm, la réduction photographique est proche de 1 : 20 et la résolution du scan est de 3200 dpi environ. Les pixels ont alors une taille de 0,17 mm sur la carte d'origine (150 dpi) et de 5,1 m sur le terrain. Cette résolution a été certes suffisante pour repérer les limites forestières, mais trop limitée pour identifier de nombreux détails de la carte. Dans ce cas, le facteur limitant a été le rapport de réduction de la photographie et il aurait été préférable de travailler avec des ektachromes de 20 x 25 cm afin de l'augmenter.

De nouveau, il est nécessaire, pour un travail de précision destiné à couvrir de grandes surfaces, de scanner, en même temps que la photographie de la carte, des mires bien calibrées afin de connaître et éventuellement corriger les déformations liées à l'étape de scannage.

3.3 Vectorisation et classification des usages du sol

Le contour de chaque tache homogène d'utilisation du sol est vectorisé, c'est-à-dire transformé en un polygone. La tache est classée dans un type d'utilisation du sol. C'est l'étape la plus longue, puisqu'elle ne peut aujourd'hui être automatisée, mais aussi la plus importante, car elle va permettre de numériser le contenu sémantique de la carte. Cette approximation des contours initiaux par des polygones introduit une nouvelle erreur qu'il faut essayer de limiter et quantifier. Dans la plupart des cartes du XVIIIe siècle, le figuré des forêts est une imitation du paysage (dessin d'arbres, de buissons plus ou moins stylisés) et les taches ne sont pas délimitées par un trait (fig. 1). Sur la carte des Naudin, la hauteur de ces symboles peut atteindre, à l'échelle du terrain, plus de 100 m de haut (3,3 mm sur la carte). Le polygone a alors été tracé à mi-hauteur… Ce n'est qu'au XIXe siècle, avec le cadastre napoléonien et la carte de l'État-Major, que les figurés conventionnels représentés par des aplats de couleur et délimités par un trait continu se généralisent. Sur la carte de l'État-Major, nous avons vectorisé les contours de toutes les utilisations du sol, soit principalement forêts, prés et cultures de labour. Nous avons décidé que les côtés des polygones ne devaient pas s'écarter du contour réel sur la carte de plus d'une épaisseur de trait (0,2 mm environ). Parmi les autres problèmes rencontrés à cette étape sur la carte de l'État-Major, il faut noter la présence de couleurs ambiguës, de contours flous (fig. 5), de plages incomplètement colorées ou non délimitées par un trait.

3.4 Géoréférencement

C'est l'étape qui consiste à transformer la carte ancienne de façon à pouvoir la représenter dans un référentiel géographique choisi. Le choix de ce référentiel est bien sûr fondamental. Il conditionne en particulier la possibilité de superposer la carte ancienne à d'autres couches d'informations géographiques : utilisation actuelle des sols, limites administratives, cartes d'autres époques… Nous avons choisi comme référence la carte IGN actuelle. Plus précisément, nous nous sommes basés sur le SCAN 25 de l'IGN, image scannée de la carte au 1 : 25 000. Ce choix n'est pas optimal, puisqu'il faut aujourd'hui lui préférer les couches de la BD TOPO, plus précise, mais plus chère à acquérir.

Afin de redresser la carte, on choisit un ensemble d'objets géographiques présents à la fois sur la carte ancienne et sur la carte de référence actuelle, si possible le plus régulièrement répartis sur l'ensemble de la carte, et on les met en correspondance. Il faut bien sûr s'assurer que l'emplacement de ces objets n'a pas bougé entre l'époque des levés de la carte ancienne et celle de la carte actuelle. Ce sont le plus souvent des églises, mais aussi des chapelles, châteaux, manoirs, maisons, fermes isolées, moulins, croix de chemin, carrefours, sommets de butte… L'une des difficultés que nous avons rencontrées est que ces points de géoréférencement stables se trouvent généralement loin des forêts et permettent de ne corriger que faiblement les erreurs de positionnement à l'intérieur des masses forestières. La recherche de points situés à l'intérieur des massifs forestiers doit donc être minitieuse. La détermination des coordonnées de ces objets sur les cartes anciennes est souvent imprécise, en raison de la grande taille des figurés utilisés pour les représenter. Pour les clochers d'église par exemple, la précision du positionnement passe d'une centaine de mètres sur la carte des Naudin à 70 m environ sur la carte des Cassini et 40 m sur les minutes de la carte de l'État-Major.

On applique ensuite une transformation mathématique à la carte d'origine, en utilisant les vecteurs de correspondance précédemment calculés. Plusieurs types de transformations sont applicables :
- des transformations affines, des plus simples (combinaison d'une translation, une rotation et une homothétie, qui miment ce qu'on ferait « à la main » avec un calque transparent et un photocopieur permettant d'agrandir ou rétrécir la carte) aux plus complexes (intégrant des possibilités de cisaillement de la carte par exemple) ;
- des transformations non affines, dites élastiques, dans lesquelles sont appliquées les déformations affines précédentes non pas à l'ensemble de la carte, mais séparément à de petits triangles pavant l'ensemble de la carte et délimités par les points de géoréférencement.

À chaque type de transformation de la carte est associée une erreur quadratique moyenne qui est la moyenne quadratique des distances entre les points de géoréférencement de la carte ancienne, après sa transformation, et les points correspondants du SCAN 25 (tableau I). L'erreur obtenue par transformation affine à quatre paramètres est un bon indicateur des déformations dues aux calculs des topographes, au dessin de la carte mais aussi à sa numérisation. L'erreur liée à la transformation élastique donne une idée de la précision maximale de positionnement qu'il sera possible d'obtenir sur la carte géoréférencée finale. Comme attendu, la précision géométrique des cartes se dégrade avec leur ancienneté. Pour la carte des Naudin, cette erreur reste élevée, supérieure à 300 m après application d'une déformation élastique (tableau I) sur un semis dense de 314 points de géoréférencement (W. Koerner *et al.,* 2003). Cassini de Thury garantissait des erreurs inférieures à 100 toises (195 m) (1754, p. 4) : «dans la Carte que nous publions aujourd'hui […] il seroit impossible (à moins de supposer des erreurs énormes,) qu'on se fût trompé de 100 toises sur la situation d'aucun lieu ». Si cela se révèle juste en

moyenne, puisque nous observons des erreurs de 91 et 151 m sur les feuilles 142 et 111, respectivement, ce n'est pas le cas pour des points pris individuellement, puisque cette erreur atteint 298 m sur seulement 28 points étudiés sur ces deux feuilles. Lorsque la zone cartographiée est plus petite, la précision peut être bien meilleure. Sur la carte de l'île d'Ouessant dressée en 1776 au 1 : 14 400 par les ingénieurs militaires cartographiant les côtes atlantiques, E. Gloersen (2001) mesure ainsi une erreur quadratique moyenne de 30 m seulement (géoréférencement affine des côtes de l'île à partir de plusieurs centaines de points de calage). À la même époque, en1782, l'État-Major anglais réalise une carte au 1 : 9 746 de l'île de Manhattan avec une erreur quadratique moyenne estimée à une quarantaine de mètres (E.W. Sanderson et D. LaBruna, 2005, p.3). L'erreur quadratique moyenne sur la feuille de l'État-Major de Nancy (69NE), calculée à partir de 32 points n'est que de 49 m. Mais la carte des déformations (fig.6) montre que les erreurs de positionnement ne sont pas réparties aléatoirement. Il est probable que les erreurs dans la carte de l'État-Major soient plus importantes dans les zones de raccord entre communes, puisque cette carte est construite à partir de la réduction puis de l'assemblage des plans cadastraux de chaque commune. Or, c'est justement aux confins des communes que le taux de boisement est le plus élevé.

La carte ancienne fournit parfois les coordonnées, dans un carton séparé ou dans des documents annexes, de points remarquables (églises le plus souvent) qui ont servi lors des levés. Il est préférable alors d'inclure ces points dans l'étape de géoréférencement de la carte ancienne, car ils sont supposés avoir une précision de positionnement meilleure que d'autres points. On trouve de tels points dans les feuilles de la carte des Cassini (documents annexes), ainsi que dans la carte de l'État-Major (cartouche intégré à la feuille). Lorsque le type de projection cartographique utilisé pour établir la carte est connu, il peut être utile, dans une première étape, d'appliquer une transformation permettant de reprojeter ces points remarquables dans le nouveau système de référence. Pour la carte de l'État-Major par exemple, la projection utilisée est celle dite de Bonne. L'ellipsoïde de référence correspondant est celui de Plessis 1817 (a=6 376 523,0, b=6 355 863,0 soit f=1 : 308,64). La position du centre de l'ellipsoïde dans le système de référence terrestre WGS84 est dX = 1 118 m, dY = 23 m et dZ = 66 m. Nous n'avons cependant réussi à retrouver ces paramètres que grâce à des informations fournies par Michelin. En effet, à l'origine, les cartes Michelin ont utilisé comme fond une réduction au 1 : 200 000 de la carte de l'État-Major. Nous aimerions pouvoir confirmer ces valeurs par d'autres sources. De même, le système de référence géodésique utilisé par les Cassini ne nous est pas formellement connu. Une transformation inverse à celle de Bonne, puis dans le système Lambert par exemple, permet de retrouver les coordonnées théoriques de chacun des points du cartouche de la carte de l'État-Major sur le SCAN 25 de l'IGN. La comparaison du positionnement théorique de ces points et de leur positionnement « réel », dans la carte de référence actuelle, permet de calculer les erreurs qu'il faudrait imputer aux seuls levés et calculs des cartographes, indépendamment des déformations liées au dessin de la carte, à son vieillissement et au processus de numérisation.

Pour la carte de l'État-Major, les quinze clochers positionnés dans le cartouche de la feuille de Nancy (69NE nous donnent une erreur quadratique moyenne de 20 m (erreur maximale de 55m), liée aux calculs des coordonnées par les géographes, et de 51 m (maximum de 134 m) lorsqu'on inclut les déformations dues au dessin de la carte et à sa numérisation.

De façon annexe, ce travail de géoréférencement permet de calculer avec exactitude l'échelle et l'orientation réelles de la carte ancienne. Dans le cas des Naudin, l'échelle réelle diffère nettement de l'échelle théorique annoncée (3 lignes pour 100 toises, soit 1 : 28 800), puisqu'elle est par exemple de 1 : 29 850 pour le fol. 8 et de 1 : 30 025 pour le fol. 10. L'orientation réelle de ces deux cartes est décalée, respectivement, de 5,3° et 11° vers l'ouest.

Nous avons, pour l'instant, vectorisé les contours forestiers sur les fol. 8 (1736, 69 x 54 km) et 10 (1733, 73 x 58 km) de la carte des Naudin et géoréférencé ces documents (314 et 466 points respectivement). Sur les minutes des feuilles de l'État-Major, nous avons vectorisé les contours d'utilisation du sol de 21 feuilles (12 160 km^2, 6 mois de travail), trois autres étant scannées et prêtes à la vectorisation.

CONCLUSION

Les minutes de la carte de l'État-Major semblent aujourd'hui réunir toutes les caractéristiques nécessaires pour leur utilisation en vue de la réalisation d'une carte des forêts anciennes de France : précision géométrique élevée, proche de celle des cartes actuelles, couverture géographique nationale, représentation fine des forêts, date de réalisation proche du minimum forestier. Nous avons entamé un premier test qui devrait permettre, lorsque nous aurons achevé le travail de scannage, vectorisation et géoréférencement pour l'ensemble de la Lorraine, d'opérer les premières comparaisons, sur un vaste territoire, entre paysage forestier actuel et ancien. Si ce test s'avère concluant, viendra le temps d'envisager l'extension de ce travail à l'ensemble de la France. La coopération de tous les organismes intéressés sera nécessaire pour mener à bien ce projet de longue haleine.

Les autres cartes anciennes gardent bien sûr tout leur intérêt. La carte des Cassini pourrait fournir, pour une période antérieure de presque un siècle à la carte de l'État-Major, une carte des noyaux forestiers anciens du XVIIIe siècle. Son échelle plus petite de moitié et le nombre de massifs forestiers plus faible, en raison de la moindre qualité de la représentation des forêts, permettraient de réaliser la vectorisation des contours forestiers beaucoup plus rapidement.

Ces travaux ouvrent des communications entre les disciplines biologiques et historiques. Réalisés pour les gestionnaires de l'environnement, ils ont besoin de s'appuyer sur les travaux des historiens de la cartographie et du paysage. Nos connaissances sur le mode exact de réalisation de la carte de l'État-Major sont faibles. La fidélité de représentation des usages anciens du sol reste à préciser. La collaboration entre forestiers et historiens est là encore nécessaire.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Colette Favre et Frank Radnai pour leur aide technique lors de la numérisation et la vectorisation des cartes anciennes, ainsi que Claude Ponnou et Catherine Cluzeau pour la relecture de ce texte.

BIBLIOGRAPHIE

Berthaut Henri, 1898, La carte de France 1750-1898, étude historique, Paris, Service géographique de l'armée, 2 t.

Blondel Antoine-Lucien, 1853, *Notice sur la grande carte topographique de la France dite carte de l'État-major*, Paris, Imprimerie de Maulde et Renou.

Blumenfeld Hervé, Hermelin Michel et Thibault Christian, 1997, « La carte de France dite carte « d'État Major » », dans Jean-Pierre Dufay, dir, *Trois siècles de cartographie en Île-de-France*, Paris, IAURIF, vol.1, p.114-141.

Cassini de Thury César-François, 1754, *Avertissement ou introduction à la carte générale et particulière de la France*.

Cinotti Bruno, 1996, « Évolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle», *Revue forestière française*, vol. 48, n° 6, p.547-562.

Corvisier-de Villèle Marie-Anne, 1995, « Les Naudin et la cartographie militaire française de 1688 à 1744 », dans Catherine Bousquet-Bressolier, dir, *L'oeil du cartographe et la représentation géographique du Moyen Âge à nos jours*, Paris, CTHS, p. 147-174.

Corvisier-de Villèle Marie-Anne et Ponnou Claude, 2002, *La France vue par les militaires : catalogue des cartes de France du Dépôt de la guerre*, t. 1, Château de Vincennes, Service historique de l'armée de terre.

Dambrine Étienne, Dupouey Jean-Luc, Laüt Laure, Humbert Lionel, Thinon Michel, Beaufils Thérèse et Richard Hervé, 2007, « Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture », *Ecology*, sous presse.

Derex Jean-Michel, 2001, « Pour une histoire des zones humides en France (XVIIe-XIXe siècles) : des paysages oubliés, une histoire à écrire », *Histoire et sociétés rurales*, vol. 15, p.11-36.

Dérioz Pierre, 1999, « Comment quantifier le phénomène du boisement spontané : inventaire des inventaires à l'échelle nationale », *Ingénieries : eau, agriculture, territoires*, n° spécial *Boisements naturels des espaces agricoles en déprise*, p.11-23.
Dufay Jean-Pierre, dir., 1997-1998, *Trois siècles de cartographie en Île-de-France*, Paris, IAURIF (Les Cahiers de l'IAURIF).
Dupouey Jean-Luc, Sciama Delphine, Koerner Waltraud, Dambrine Étienne et Rameau Jean-Claude, 2002a, « La végétation des forêts anciennes », *Revue forestière française*, vol. 54, n° 6, p.521-532.

Dupouey Jean-Luc, Dambrine Étienne, Moares Concha et Laffite Jean-Denis, 2002b, « Irreversible impact of past land use on forest biodiversity », *Ecology*, vol. 83, n° 11, p.2978–2984.

Dutoit Thierry , Forey Estelle, Römermann Christine, Buisson Elise, Fadda Sylvain, Saatkamp Arne, Gaignard Pauline, Trivelly Elise, 2005, « Rémanence des utilisations anciennes et gestion conservatoire des pelouses calcicoles en France », *Biotechnologie, agronomie, société et environnement*, vol. 9, n° 2, p.125–132.

Gløersen Erik, 2001, « Modalités d'exploitation numérique des cartes topographiques du XVIIIe siècle » : DEA Sciences de l'information géographique, Université de Marne-la-Vallée.

Guichonnet Paul, 1942, « Le cadastre savoyard de 1738 et son utilisation pour les recherches d'histoire et de géographie sociales », *Revue de géographie alpine*, vol. 43, n° 2, p.255-298.

Hamza Nabila, dir, 2005, *Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises 2005*, Nogent-sur-Vernisson, Inventaire forestier national.

Koerner Waltraud, Dupouey Jean-Luc, Dambrine Étienne et Benoît Marc, 1997, « Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains », *Journal of ecology*, vol. 85, p.351-358.

Koerner Waltraud, Cinotti Bruno, Jussy Jean-Hugues et Benoît Marc, 2000, « Évolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIXe siècle : identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés », *Revue forestière française*, vol. 52, n° 3, p.249-270.

Koerner Waltraud, Dupouey Jean-Luc, Buisson-Delandre Arnaud, Bachacou Jean, Bienaimé Élisabeth, Riéla Régine, Corvisier de Villèle Marie-Anne et Gloersen Erik, 2003, « De la carte des Naudin à la carte IGN : précision et déformations spatiales de la feuille de Nancy », dans Pierre-Edouard Wagner, dir, *Les Naudin entre Meuse et Vosges*, Metz, Médiathèque du Pontiffroy, p.47-56.

Lepart Jacques, Dervieux Alain et Debussche Max, 1996, « Photographie diachronique et changement des paysages : un siècle de dynamique naturelle de la forêt à Saint-Bauzille-de-Putois, vallée de l'Hérault », *Forêt méditerranéenne*, vol. 17, n° 2, p.63-80.

Maurin André, 1992, *Le cadastre en France, histoire et rénovation*, Paris, CNRS.
Motte Claude et Vouloir Marie-Christine, dir, 2006, *Territoires et populations, deux siècles d'évolution : des villages de Cassini aux communes d'aujourd'hui*, www.cassini.ehess.fr.

Pelletier Monique, 2002, *Les cartes des Cassini : la science au service de l'État et des régions*, Paris, CTHS.

Perpillou Aimé, 1979, *Carte de l'utilisation du sol en France, XIXe siècle*, Paris, CNRS.

Poirier Nicolas, 2006, « Des plans terriers au cadastre ancien : mesurer l'évolution de l'occupation du sol grâce au SIG », *Le médiéviste et l'ordinateur*, n° 44 (Les systèmes d'information géographique) [En ligne] http://lemo.irht.cnrs.fr/44/plans-terriers.htm

Rousseau Pierre, 1990, « L'évolution des forêts françaises métropolitaines d'après les statistiques forestières », *Revue forestière française*, vol. 52, n° 1, 56-65.

Sanderson Eric W. et LaBruna Danielle, 2005, *Mapping the historical ecology and reconstructing the historical flora of the lower Bronx River: a guide for ecosystem restoration and outreach*, New York, Wildlife Conservation Society. [En ligne] http://www.wcs.org/mannahatta

Spencer Jonathan W. et Kirby Keith J., 1992, « An inventory of ancient woodland for England and Wales », *Biological conservation*, vol. 62, p.77-93.

Touzery Mireille, 1995, *Atlas de la Généralité de Paris au XVIIIe siècle, un paysage retrouvé*, Paris, CHEFF.

Trotignon Élisabeth, 2006, « Histoire d'un paysage de Brenne (Indre) : le domaine de Chérine et ses environs (1838-2004)», *Études de la réserve naturelle de Chérine*, n° 1, p.1-64.

Truchy de Bazouche Jean-Baptiste, 1818, *Du cadastre et de son amélioration*, Paris, Delaunay.

Vallauri Daniel, 1997, « Aperçu sur l'évolution écologique des forêts dans les Préalpes du Sud depuis la Révolution », *Forêt méditerranéenne*, vol. 18, n° 4, p.327-339.

Vallauri Daniel, 2007, *Biodiversité, naturalité, humanité : application à la gestion forestière*, Marseille, WWF.

Wagner Pierre-Edouard, dir, 2003, *Les Naudin entre Meuse et Vosges*, Metz, Médiathèque du Pontiffroy.

		Naudin fol. 10	Naudin fol. 8	Naudin fol. 8	Cassini Toul (feuille 111)	Cassini Nancy (feuille 142)	État-Major Toul-Nancy (69NE)
date		1733	1736		1756-1759	1754-1763	1834
nombre de points de calage		466	314	17	14	14	32
transformation affine 4 paramètres	erreur quadratique moyenne	749 m	1111 m	450 m	151 m	91 m	49 m
	erreur maximale	1936 m	2670 m	690 m	298 m	185 m	118
transformation affine 6 paramètres erreur maximale	erreur quadratique moyenne	700 m	876 m	377 m	134 m	83 m	33 m
	erreur maximale	585 m	337 m	144 m	84 m		
transformation polynomiale d'ordre 2 erreur maximale	erreur quadratique moyenne	324 m	125 m	59 m	22 m		
	erreur maximale	603 m	309 m	80 m	53 m		
transformation élastique	erreur quadratique moyenne	233m	320 m				22m
	erreur maximale	1330m	1680m				

Tableau I : Erreurs de positionnement sur les cartes Naudin, Cassini et de l'État-Major mesurées par rapport à la carte 1 : 25 000 actuelle (SCAN 25) de l'IGN. L'erreur est calculée selon 4 modèles d'ajustement entre la carte ancienne et la carte actuelle. La transformation affine à 4 paramètres correspond à ce que l'on obtiendrait par une simple combinaison d'agrandissement ou réduction, rotation et translation d'une carte par rapport à l'autre

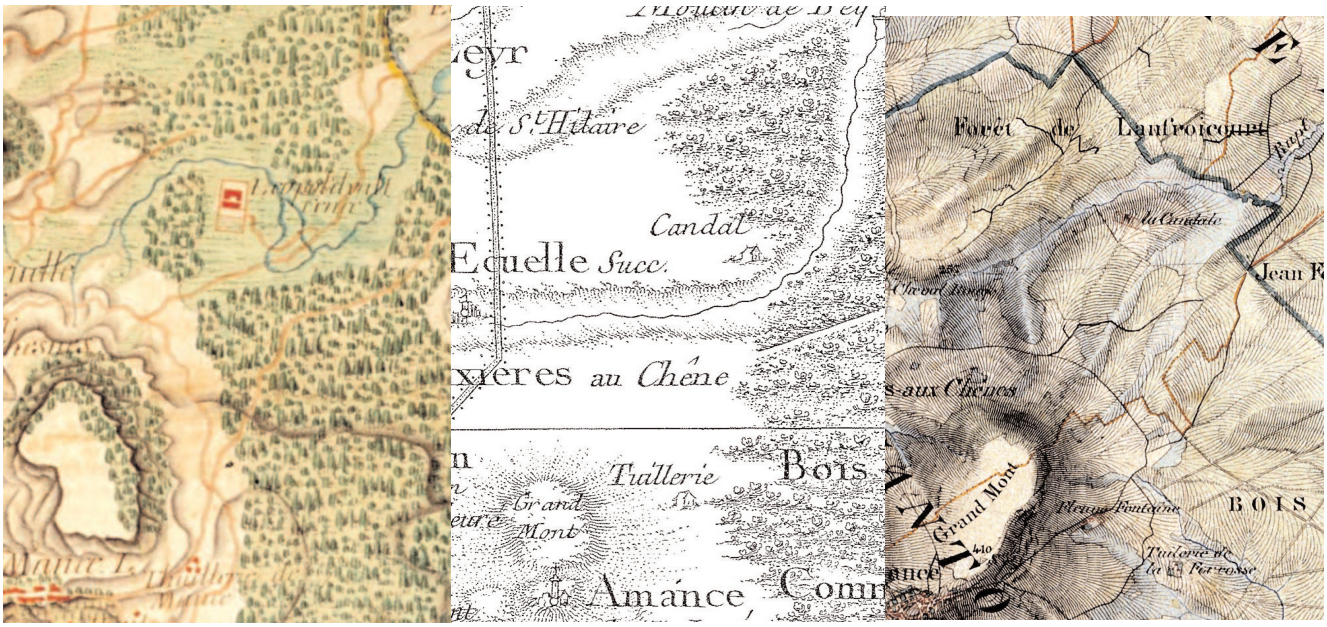

Figure 1 : Comparaison de la représentation de la partie nord-ouest de la forêt d'Amance sur les carte des Naudin (fol. 10, 1733, à gauche), Cassini (feuille n° 142, 1754-1763, au centre) et de l'État-Major (feuille Toul-Nancy n° 69NE, 1834, à droite)1

Figure 2 : Carte des vecteurs de déformation de la carte de l'État-Major, feuille de Nancy (69NE). Les vecteurs indiquent les positions du point sur la carte de l'État-Major et de son équivalent sur la carte IGN (SCAN 25). La longueur de chaque vecteur a été multipliée par 100. La carte initiale, dont le bord est représenté, fait 80 x 50 cm

Figure 3 : Représentation de la vigne au sud du village de Villey-le-Sec dans les cartes des Naudin (fol. 8, 1736, en haut à gauche), de l'État-Major (minute de Nancy, n°69NE, levés 1826-1833, en bas à gauche) et de l'IGN (en bas à droite). Elle n'est pas figurée sur la carte des Cassini (feuille n°111, 1756-1759, en haut à droite).

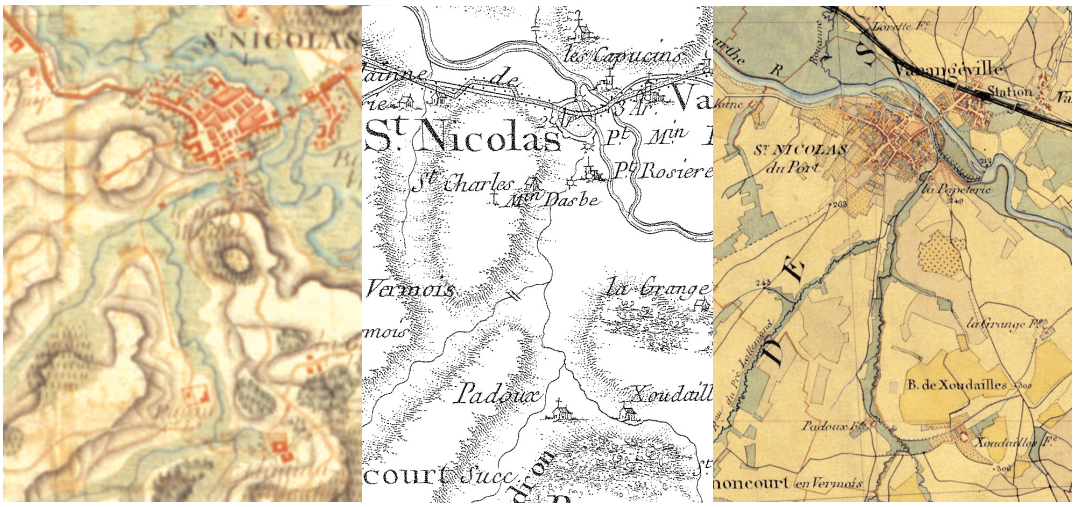

Figure 4 : Comparaison de la région de Saint-Nicolas-de-Port sur les cartes des Naudin (fol. 10, 1733, à gauche), Cassini (feuille n° 142, 1754-1759, au centre) et de l'État-Major (minute de Lunéville, n°70NO, levés 1826-1830, à droite). On remarque la qualité de la représentation des usages du sol sur la carte de l'État-Major : bois en jaune, prairies en vert, vignes en gris, cultures en blanc et vergers, représentés par un maillage de points. Sur la carte des Naudin, seuls les vergers sont absents. Sur la carte des Cassini, on ne retrouve que deux usages, zones boisées ou non boisées

Figure 5 : Extrait de la carte de l'État-Major d'Épinal (minute n°85SE, levés 1830-1832). Dans les zones de montagne, les limites entre usages du sol deviennent floues

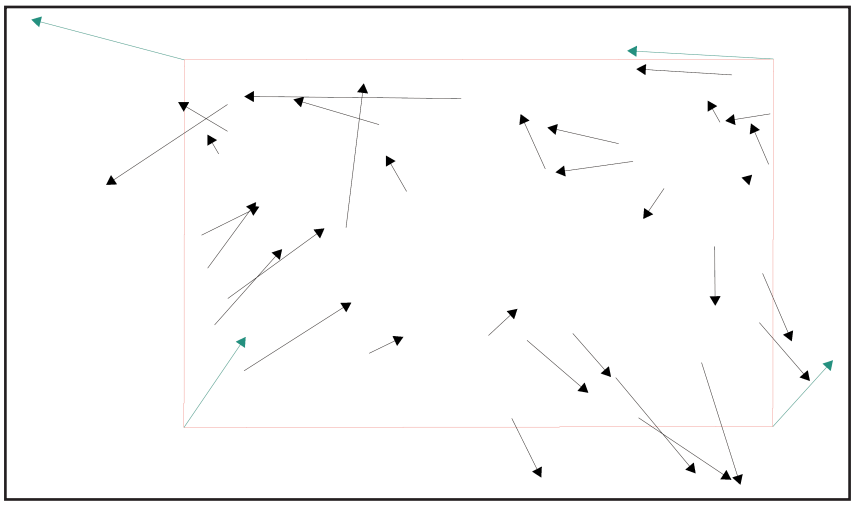

Figure 6 : Vecteurs de déformation de la carte de l'État-Major, minute de Nancy (69NE). Les vecteurs indiquent les positions du point sur la carte de l'État-Major et de son équivalent sur la carte IGN (SCAN 25). La longueur de chaque vecteur a été multipliée par 100. La carte initiale, dont le bord est représenté, fait 80 x 50 cm