



Faculté des Lettres et Civilisations

Département de Géographie

Rapport de stage dans l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA) effectué par Arnaud Caiserman (arnaudcaiserman@gmail.com) du lundi 02 juin au jeudi 31 juillet 2014.

Compte rendu du stage sur « l'évolution du couvert forestier de 1870 à nos jours en France » au sein de l'Irstea.



Vazken ANDREASSIAN
Irstea,
2015
1 rue Pierre Gilles de Gennes,
Antony, 92761

Michel Mietton
2014-

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier Vazken Andréassian de m'avoir proposé ce stage ainsi que pour toutes ses aides et réponses précieuses qu'il m'a fournies durant ces deux mois, aussi bien à propos du sujet que de l'univers professionnel d'un hydrologue. J'adresse également mes remerciements les plus chaleureux à Olivier Delaigue dont l'aide constante et inestimable m'a permis de surmonter des difficultés, et sans qui nous n'aurions pas pu faire nos travaux. Je remercie aussi Michel Mietton pour avoir accepté d'être mon tuteur universitaire pour ce stage qui fut une véritable chance et une très bonne expérience.

Mes remerciements les plus sincères vont finalement à toute l'unité HBAN qui m'a accueilli en son sein, qui a toujours été disponible pour répondre à mes questions mais aussi qui m'a appris à jouer au frisbee ultimate qui fut une grande découverte.

Introduction

Le stage dont ce dossier fait le rapport a été effectué au sein de l'unité de recherche Hydro systèmes et bioprocédés (HBAN) de l'Irstea au 1 rue Pierre Gilles de Gennes à Antony 92761, du lundi 2 juin au jeudi 31 juillet 2014. Dans cette unité, l'équipe HYDRO (Hydrologie des bassins versants) se penche principalement sur les comportements et fonctionnements hydrologiques des bassins versants. La pluie, les débits, les événements hydrologiques exceptionnels, les aménagements et les pratiques agricoles attirent ainsi toute l'attention de l'équipe de recherche.

L'objet de ce stage s'inscrit dans les problématiques hydrologiques mais à travers un angle historique. Il s'agit effectivement de cartographier le couvert forestier des cartes de l'Etat-Major de 1870 en France avec l'aide des technologies actuelles que sont les logiciels de cartographie (Arcmap). Avant tous travaux, la mission a consisté en un travail de documentation et de recherche d'une méthode adaptée ce qui a occupé les premiers jours du stage. L'interprétation d'une carte ancienne étant longue et fastidieuse, les deux mois de stage n'ont pas suffi à une cartographie complète de la France mais seulement à la cartographie du bassin de la Seine, de la Saône, de la Bretagne, de la Meuse, du Rhin et de ses affluents, de la Picardie ainsi que de la Loire. Elle nécessite donc la maîtrise de certains outils de programmation cartographique comme R dans la mesure où la systématisation du traitement de données rend la mission plus facile à exécuter. Cependant la mission de ce stage a pu être manuelle dans le sens où, n'ayant pas suffisamment de sources de données pour cartographier le couvert forestier de 1870, il nous faut regarder un à un les blocs de forêts sur tout le territoire en comparant la carte forestière de Cassini à l'actuelle de Corine Land Cover de 2006. La mission porte donc sur l'interprétation des cartes de l'Etat-Major, réalisée en 1827 par le Dépôt de la Guerre, à partir desquelles nous tentons de quantifier la couverture forestière de la fin du XIX^{ème} siècle. En générant ces données informatiques, l'exploitation des variables de la carte d'Etat-Major devient possible. Par exemple, en connaissant la quantité et les surfaces de la forêt de la fin du XIX^{ème} siècle, nous sommes à-même de comprendre des écosystèmes actuels, ou encore de préciser la constante croissance de la forêt française qui a plus que doublé depuis cette période. Cependant le stage a été agrémenté par d'autres activités annexes comme l'installation d'un pluviomètre sur le site l'Irstea ainsi que par diverses présentations de thésards ou des autres stagiaires de Master 1 et 2 dans l'unité HBAN.

Terminer la licence de géographie par un stage d'au moins un mois m'a paru intéressant afin d'approcher le cadre professionnel d'autant plus que celui du domaine de la recherche m'était totalement inconnu. J'ai donc pris contact avec différents instituts de recherche. Pour son unité de recherche hydro-systèmes et Bioprocédés, l'Irstea correspondait tout à fait au type d'institut que je recherchais puisqu'il s'intéresse aux problématiques hydrologiques. Aussi le sujet proposé me permettait de lier la question de l'eau au domaine forestier qui suscite mon intérêt mais sur lequel ma formation portait peu. Réaliser une telle carte, nécessaire et pourtant inexistante, a ensuite stimulé mon enthousiasme. C'est enfin le profil professionnel

de Monsieur Vazken Andréassian, mon maître de stage issu de l'ENGREF, qui a orienté mes choix. Etant issu d'une formation géographe et m'intéressant aux problématiques géopolitiques de l'eau, il m'était tout indiqué de contacter l'unité HBAN.

Après avoir exposé la problématique ainsi que l'intérêt d'une évaluation des forêts françaises de 1870, le sujet sera contextualisé, autant du point de vue des sources et de leurs limites que du contexte de la mission dans une unité de recherche. La méthodologie occupera le troisième temps de ce dossier afin de la justifier par rapport à d'autres méthodes qui ont déjà été utilisées sur ce sujet. Les résultats ainsi que les discussions viendront clore ce rapport tout en avançant des perspectives sur ce qu'il reste à faire à la fin de ma mission.

Remerciements	p2
Introduction	p4
Table des matières	p6
PARTIE I) Problématique	p10
1) L'évolution du couvert forestier de 1870 à nos jours	p10
<i>1.1) Présentation du sujet</i>	p10
1.1.1) Une évolution du couvert forestier ?	p10
1.1.2) Qu'est-ce qu'une forêt ?	p10
1.1.3) Transdisciplinarité du projet (histoire, géographie et hydrologie)	p11
1.2) Quelle occupation du sol au XIX ^{ème} siècle ?	p11
1.2.1) La prudence à adopter face aux sources.....	p11
1.2.2) Les données manquantes.....	p13
2) Pourquoi réaliser une telle carte ?	p13
<i>2.1) Reconstitution hydrométéorologique des variations climatiques passées</i>	p13
2.1.1) Les effets du couvert forestier sur l'écoulement de l'eau en surface ; une controverse.....	p13
2.1.2) Reconstitution des écoulements et de leurs variabilités depuis 1870.....	p16
<i>2.2) Comprendre l'histoire des sols forestiers actuels</i>	p16
2.2.1) Les terres anciennement cultivées ont été recouvertes de forêts.....	p16
2.2.2) Les effets de la fertilisation des terres.....	p17
<i>2.3) Participer à la gestion conservatoire des forêts françaises</i>	p18
2.3.1) Évaluer l'ancienneté des forêts.....	p18
2.3.2) Histoire des paysages et des hommes.	p18

PARTIE II) Contexte du projet.....	p20
1) Présentation d'IRSTEA et du projet.....	p20
<i>1.1) Irstea Antony.....</i>	<i>p20</i>
1.1.1) Financements globaux.....	p20
1.1.2) L'unité de recherche HBAN.....	p20
<i>1.2) Le projet HyMet20C et mes objectifs.....</i>	<i>p20</i>
1.2.1) HyMet20C.....	p20
1.2.2) Les contributeurs au projet à HBAN.....	p20
1.2.3) Mes objectifs.....	p22
2) Sources, données et absences de données.....	p22
<i>2.1) La carte d'Etat-major et son contexte.....</i>	<i>p22</i>
2.1.1) Sources et dates de réalisation des cartes.....	p22
2.1.2) La légende et ses problèmes de lectures.....	p24
2.1.3) Des erreurs dans les révisions des cartes.....	p25
<i>2.2) La carte de Cassini au format vectoriel.....</i>	<i>p25</i>
2.2.1) La carte originale.....	p25
2.2.2) La carte vectorisée.....	p26
2.2.3) Les marges d'erreur à prévoir.....	p26
<i>2.3) La carte d'occupation du sol de Corine Land Cover 2006.....</i>	<i>p26</i>
2.3.1) Une image satellite et une carte vectorielle.....	p26
2.3.2) Types et tailles de l'occupation forestière.....	p29
<i>2.4) Les dalles de l'Etat-major.....</i>	<i>p31</i>
2.4.1) L'ortho-photo.....	p31
2.4.2) Provenance de la source.....	p32
<i>2.5) Statistiques forestières de Daubrée, 1912.....</i>	<i>p32</i>
2.5.1) Un Atlas forestier.....	p32
2.5.2) Un référence au Cadastre napoléonien.....	p32

PARTIE III) Méthodologie	p33
1) Outils mis à disposition	p33
1.1) Matériel et mode opératoire	p33
1.1.1) Un travail collectif et individuel.....	p33
1.1.2) RStudio.....	p34
1.1.3) Arcmap.....	p34
2) Méthode	p35
2.1) Explications	p35
2.1.1) Ce qu'on ne peut pas faire.....	p35
2.1.2) Télédétection.....	p36
2.1.3) Une autre façon de procéder à l'échelle au moins départementale.....	p37
2.2) Les étapes de la comparaison entre CLC et Cassini	p37
2.2.1) Sélection des forêts de Cassini et Corine Land Cover.....	p37
2.2.2) Intersection des forêts Cassini et Corine Land Cover.....	p38
2.2.3) Identification des polygones de forêts en évolution avec RStudio.....	p39
2.2.4) Légende et typologie.....	p40
2.3) Interprétation de la carte d'Etat-major	p41
2.3.1) Projection de points d'échantillonnage.....	p41
2.3.2) Programmation dans R.....	p41
2.3.3) Les points en images ; un travail manuel.....	p42
2.3.4) Sélection des points et calcul des surfaces.....	p43
2.3.5) Département, Région, bassin versant et canton ?	p44

PARTIE IV) Résultats et discussions	p46
1) Examen de la méthode	p46
1.1) Résultats	p46
1.1.1) Les cartes et les quantités obtenues.....	p46
1.1.2) Comparaisons avec d'autres sources.....	p47
1.2) Discussions	p48
1.2.1) Limites et atouts de la méthode.....	p48
1.2.2) Nouveaux essais.....	p50
2) Perspectives	p51
2.1) Ce qu'il reste à faire	p51
2.1.1) Finir la carte.....	p51
2.1.2) Projeter des points dans les polygones de forêt maintenue.....	p52
2.2) Pour aller plus loin	p52
2.2.1) Reconstitution hydrologique.....	p52
2.2.2) Observer les effets des sols autrefois agricoles sur la forêt d'aujourd'hui.....	p52
Conclusion	p53
Bibliographie	p55
Annexe	p58
Annexe : 1.....	p58
Annexe : 2.....	p59
Annexe : 3.....	p60
Annexe : 4.....	p61
Annexe : 5.....	p62
Annexe : 6.....	p63
Annexe : 7.....	p64
Annexe : 8.....	p65
Annexe : 9.....	p65

PARTIE I) Problématique

1) L'évolution du couvert forestier de 1870 à nos jours

1.1) Présentation du sujet

1.1.1) Une évolution du couvert forestier ?

La couverture forestière française n'a pas toujours été celle que l'on connaît aujourd'hui. Il est effectivement admis que la surface de la forêt aurait doublé depuis le milieu du XIX^{ème} siècle où elle avait atteint son point le plus bas en raison de son exploitation massive à des fins industrielles et navales. S'intéresser à une telle évolution revient à se concentrer sur une étude quantitative de la surface forestière, et non qualitative qui aurait donné lieu à un tout autre projet. Certaines forêts ont disparu, lorsque d'autres sont apparues. *A priori*, il existe un premier facteur explicatif de ces mutations : l'agriculture. Cette dernière étant une priorité pour alimenter les hommes, elle a façonné les paysages, décidant souvent du sort de certaines forêts. A l'inverse, certaines surfaces agricoles cultivables abandonnées ont été recouvertes par des forêts. D'autres explications de cette évolution peuvent être la plantation d'arbres en montagne pour tenir les terrains soumis à l'érosion (restauration des terrains en montagne, RTM), ou l'assainissement de marais et des landes. Ainsi, pour connaître cette évolution, il nous faut cartographier la surface de la forêt française de 1870 qui ne nous est donnée que par des documents anciens, mais dont il ne faut pas sous-estimer la richesse.

1.1.2) Qu'est-ce qu'une forêt ?

Afin de quantifier le couvert forestier de la fin du XIX^{ème} siècle, il est nécessaire de connaître la définition que l'on attribuait à la forêt à cette époque. Celle-ci peut différer de la définition actuelle. Certaines sources de la période étudiée proposent donc des définitions comme le Cadastre institué par Napoléon I^{er} sous la loi du 15 septembre 1807 à des fins fiscales sur lequel Lucien Daubrée réalisera un atlas forestier en 1912 et un inventaire. Le Cadastre comprend treize groupes de surfaces non-bâties dont un groupe intitulé « bois », lui-même réparti en huit sous-groupes : bois divers, futaies feuillues, futaies mixtes, peupleraies, futaies résineuses, taillis-sous-futaie et taillis simples (Cinotti, 1996). Avant 1889, les oseraies, les aulnaies, les saussaies et les châtaigneraies n'étaient pas considérées comme « bois » afin d'éviter une surévaluation du couvert forestier. L'utilisation de la carte d'Etat-major permet de simplifier la définition forestière en se rapportant à un type d'occupation du sol qu'est la forêt. La carte d'Etat-major a en effet d'autres objectifs que la classification des forêts. Ses fins sont militaires et elle doit fournir une carte qui permette de mesurer les angles c'est-à-dire les tirs d'artillerie. Les officiers chargés de réaliser la carte ont ainsi eu pour mission de cartographier

sous le nom de forêt tout ce qui était boisé pouvant faire office d'obstacle ou d'abri pour une armée. Au total, suivant les espèces considérées comme « bois », la quantité de forêt varie. La référence à la carte d'Etat-major simplifie ces divergences sémantiques. Nous verrons que nous adapterons cette définition en fonction des espèces forestières cartographiées par nos sources.

1.1.3) Transdisciplinarité du projet (histoire, géographie et hydrologie)

Ces premières explications révèlent la transdisciplinarité du projet. Les recherches préliminaires ainsi que certaines sources sont à caractère historique comme la carte de Cassini, le Cadastre ou la carte d'Etat-Major. Cela implique également de s'intéresser à des inventaires forestiers départementaux aujourd'hui classés en archive pour, par exemple, comparer nos résultats aux données de l'époque sur un département. La question de l'évolution du couvert forestier de 1870 à nos jours suppose aussi une connaissance des grands aménagements du territoire en matière de boisement ou de reboisement. Des politiques de grande ampleur de restauration ou d'assainissement de terres non-forestières ont parfois modifié considérablement la quantité de forêt à l'échelle départementale voire nationale. Enfin, pour mieux cerner l'enjeu de cette évolution, il est nécessaire de comprendre l'effet de la forêt sur les comportements hydrologiques des bassins versants en faisant appel à des considérations hydrologiques.

1.2) *Quelle occupation du sol au XIX^{ème} siècle ?*

1.2.1) La prudence à adopter face aux sources

C'est bien au nom d'importantes évolutions de l'occupation forestière depuis le XIX^{ème} siècle en France que le sujet s'impose à nous. S'il n'y avait pas eu d'évolution durant cette période, une seule carte de la couverture forestière sur un siècle et demi aurait suffi pour connaître la quantité de la forêt française. Or, nous savons que la surface de la forêt a doublé entre le milieu du XIX^{ème} siècle et aujourd'hui, passant d'une fourchette estimée entre 8,9 et 9,5 millions d'hectares en 1830 (B.Cinotti, 1996) à 16,4¹ millions d'hectares aujourd'hui (IGN). En revanche la surface boisée évolue timidement pendant le XIX^{ème} siècle (Figure 1).

¹ Le mémento Édition 2013, Inventaire Forestier, IGN.

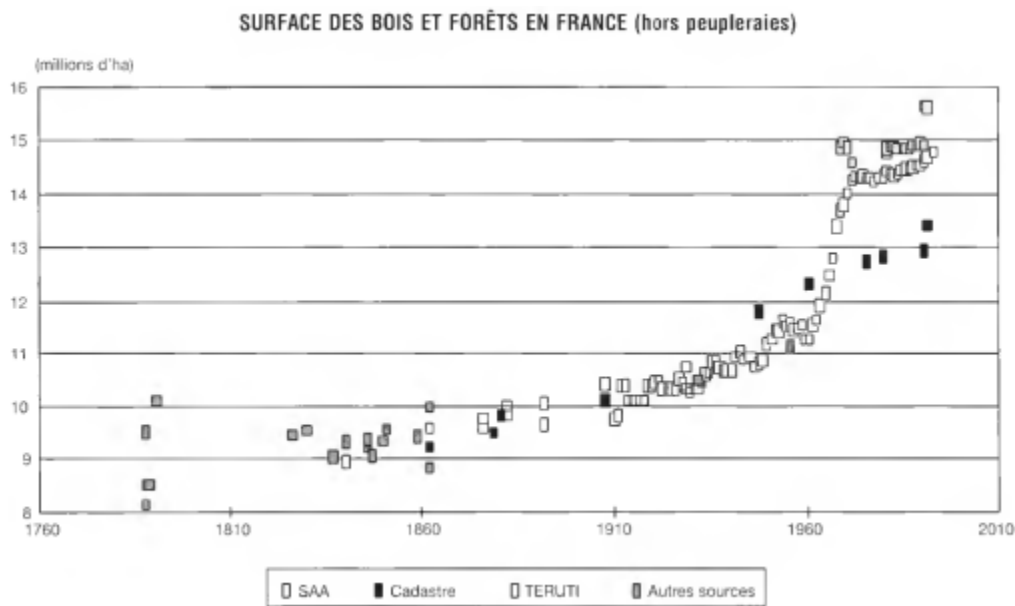


Figure 1 : Evolution de la surface des bois et forêts en France (B. Cinotti, 1996)

En effet, de 1810 (date du premier cadastre) à 1862 (date des Résultats généraux de l'Enquête décennale), la surface boisée nationale passe de 14,6% à 16% tandis que de 1862 à 1908, celle-ci passe de 16% à 18,7% (B.Cinotti, 2000). Rousseau (1990) relève également qu'un inventaire a été fait en 1878 par Mathieu Faré, alors Directeur Général des Forêts qui charge une commission de répertorier la forêt en 1876, à partir du cadastre. La surface boisée française est alors estimée à 10 280 000 hectares dans les limites actuelles de la France. Notons cependant que l'élaboration du premier cadastre s'achève en 1850 et que les résultats généraux de l'Enquête décennale, qui se base sur le Cadastre, ne sont éloignés que de 12 ans après achèvement du cadastre. Ainsi les résultats de l'Enquête décennale semblent corrects pour les quelques communes récemment cadastrées autour de 1850, mais ceux qui concernent les premières communes cadastrées en 1810 risquent de souffrir d'une absence de mise à jour. L'évolution du couvert forestier serait donc à examiner au cas par cas pour cette période. De plus, les méthodes d'investigation diffèrent légèrement entre l'Enquête décennale de 1862 et les Statistiques forestières de l'Administration des Forêts de 1872 qui ont été utilisées pour évaluer l'occupation du sol forestier dans la deuxième période citée. Il en résulte une surestimation en 1872, augmentant la surface forestière de 1,1% en seulement dix ans, peut-être provoquée par la Restauration de Terrains de Montagnes dont les terrains reboisés auraient été surévalués (Cinotti, 2000). Il est donc préférable d'adopter une certaine prudence quant aux recensements du XIX^{ème} siècle bien que ceux-ci soient des sources à prendre en compte.

1.2.2) Les données manquantes

En raison de ces inexactitudes, le sujet soulève un manque de données sur le couvert forestier de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle. Les statistiques ne sont pas suffisamment fiables au point de les utiliser sans envisager des erreurs. Si les statistiques ne sont pas satisfaisantes, il est proposé de refaire, 140 ans plus tard, une sorte de nouveau relevé de terrain mais à travers la carte correspondant à cette période qu'est la carte d'Etat-Major. Cette carte permettrait effectivement de faire la jointure au XIX^{ème} siècle entre les données forestières de la carte de Cassini et la carte forestière actuelle. Il s'agit donc de générer des données à partir de la carte d'Etat-Major; données que nous pourrions ensuite systématiser dans un programme informatique pour évaluer la quantité de forêt de 1870.

2) Pourquoi réaliser une telle carte ?

2.1) Reconstitution hydrométéorologique des variations climatiques passées

2.1.1) Les effets du couvert forestier sur l'écoulement de l'eau en surface ; une controverse

Une des clés de ce projet est le lien qui existerait entre les Eaux et les Forêts, lien qui fut au moins constaté par quelques membres des sociétés anciennes comme Platon dans le Critias en rappelant qu'avant la coupe de la forêt : *« la terre récoltait les bénéfices de la pluie annuelle, elle ne la perdait pas comme aujourd'hui en la laissant ruisseler sur le sol nu et rejoindre la mer. Il y avait de l'eau partout en abondance, la terre la recevait en son sein et la conservait dans le sol argileux, relâchant dans des creux les rivières qu'elle avait absorbées des hauteurs, fournissant partout d'abondantes fontaines et rivières »*. C'est à l'œil nu et selon de simples observations que les hommes constatent la relation entre l'eau et la forêt. Or, la maîtrise de l'eau étant un enjeu de première importance notamment pour l'agriculture, les scientifiques se devaient de se pencher plus précisément sur la question de cette relation.

Des effets de la forêt sur l'eau sont ainsi mis en lumière (Figure 2). Un des premiers réside en la réduction des écoulements de l'eau proportionnellement à la densité des arbres. Plus une forêt est abondante, plus l'écoulement est réduit dans la mesure où les arbres entravent la chute et le ruissellement de l'eau. De fait, un bassin versant couvert d'une forêt verra les débits de ses cours d'eau ainsi que les crues diminuer contrairement à un bassin versant dont le sol serait nu (parcelle de Wischmeier) dans le cadre d'une étude comparative de bassins. Selon le même effet, les étiages sont réduits par la présence d'une forêt. Mais ces réductions ne sont pas synonymes de disparition d'eaux en forêt, au contraire. Une forêt permet une meilleure utilisation des pluies pour des raisons pédologiques et forestières. Tout d'abord, les formations superficielles sont plus profondes lorsque le sol est occupé par une forêt pour que

celle-ci puisse s'enraciner correctement. Un sol profond renforce ses capacités de stockage des eaux de pluies avec un temps de réponse plus tardif c'est-à-dire une saturation des sols plus tardive lors des précipitations. Si le sol est suffisamment profond, la réserve en eau durera plus longtemps, ce qui n'est pas un détail dans les climats à saisons contrastées. A l'inverse, un sol de type « *ranker* » ne permettrait pas un stockage en eau suffisant puisqu'il serait trop mince. C'est aussi la morphologie d'une forêt qui expliquerait la meilleure utilisation de l'eau. Les précipitations tombent des nuages et rencontrent en premier la canopée de la forêt. Cette biomasse aérienne retient une partie des précipitations qui ne tomberont jamais au sol, mais qui seront directement évaporées. Cela s'appelle l'interception. C'est enfin l'évapotranspiration qui attire l'attention lorsque l'on s'intéresse à la relation entre l'eau et la forêt. Dans la mesure où une forêt profondément enracinée a accès à l'eau stockée dans le sol pendant une plus grande partie de la saison végétative (par rapport à une prairie par exemple), elle est susceptible d'évaporer davantage.

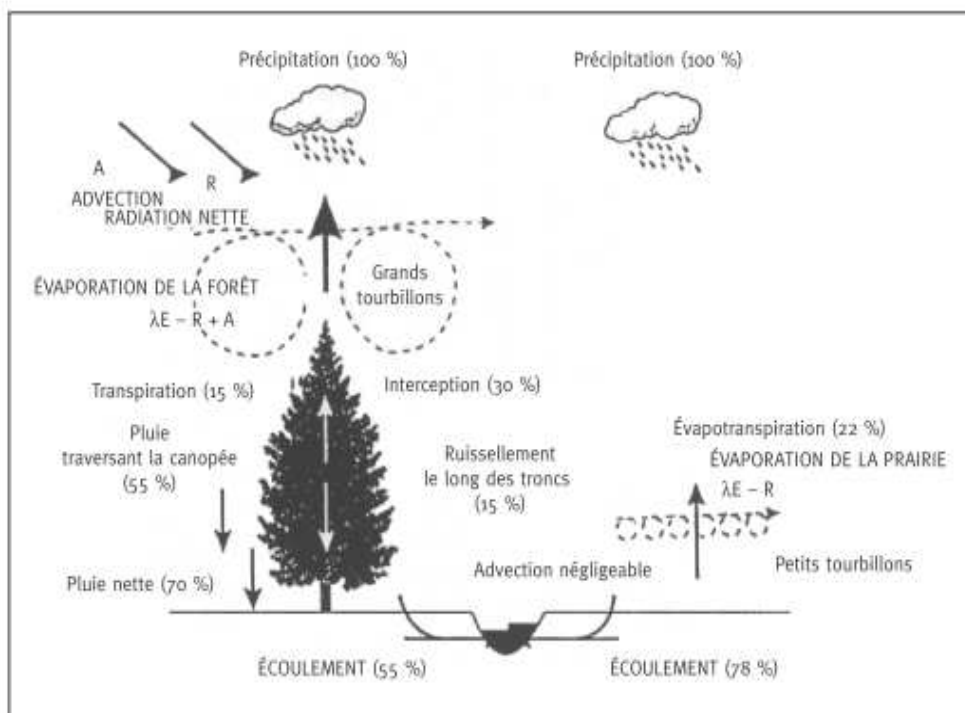


Figure 2 : le cycle de l'eau dans la forêt (Cosandey, 1995)

Néanmoins, l'ancienneté des observations et le caractère scientifique de ces études n'excluent pas des controverses et beaucoup d'incertitudes concernant les relations entre Eaux et Forêts. Dès le XIX^{ème} siècle, forestiers et ingénieurs s'opposent sur la question (Andréassian, 2001). Les forestiers sont convaincus que la forêt attire les précipitations en prenant l'exemple de l'île Maurice tandis que les ingénieurs comme Surell en 1841 leur reprochent de ne pas s'appuyer sur des démonstrations rigoureuses². En 1872, Cézanne, qui est ingénieur, montre

² Tout en reconnaissant un rôle incontestable des forêts dans la restauration des sols montagnards, Surell rappelle que « [...] cette influence [des forêts] n'est pas rigoureusement démontrée, et on l'appuie sur des présomptions

finalement à partir d'expériences sur un bassin versant que l'interception a bien un effet sur le ralentissement des crues, mais pas sur les crues majeures. A l'issue de ce débat, ce sont les forestiers qui ont le dernier mot puisqu'ils sont en charge de la Restauration de Terrains de Montagnes. Il est aussi pressenti que les effets cités plus hauts sont davantage marqués sous des climats à saisons contrastées comme le climat tropical, réduisant la pertinence de la relation entre eau et forêt sous un climat tempéré. Aussi les effets ne sont constatables qu'à des échelles globales sur de grands massifs forestiers comme sur les travaux de Poncet en France en 1981³. L'échelle nationale du projet est donc préférable. Claude Cosandey souligne également la complexité de cette relation en s'appuyant sur les critiques de Boch et Helwett en 1982 qui montrent la faible corrélation entre le taux de forêt et la réduction des écoulements d'autant plus que les estimations des effets ont des ampleurs fortement diverses comme le montre le graphique de Cosandey (Figure 3).

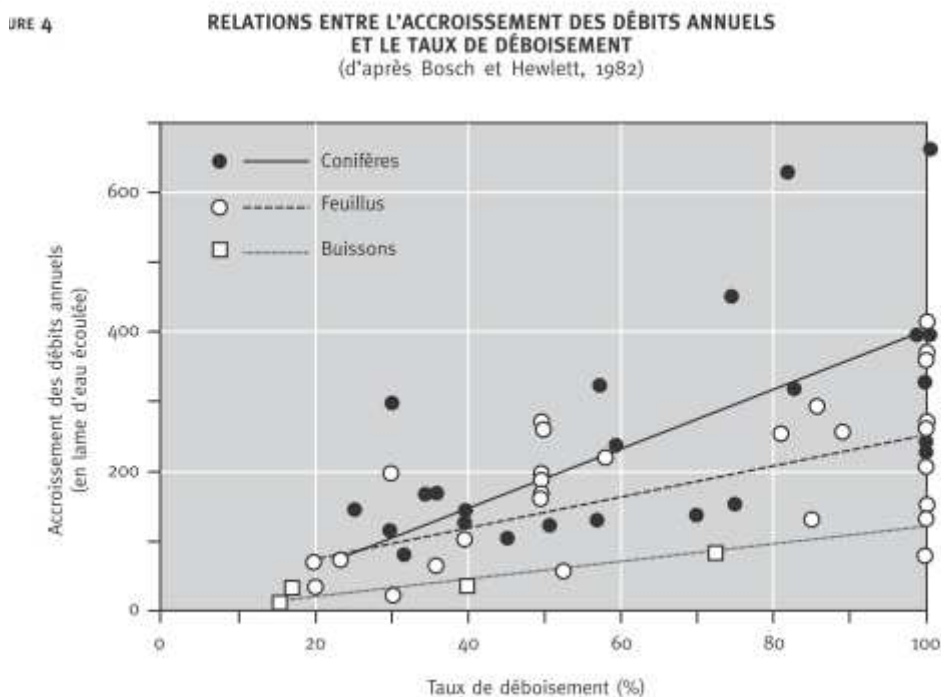


Figure 3 : Relation entre l'accroissement des débits annuels et le taux de déboisement
(Cosandey, 1995)

plutôt que sur des observations positives » in Surell A., 1841 : *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes* ; Carilian-Goeury et Victor Dalmont, Paris, 283p.

³ Poncet apporte une conclusion originale mais qui confirme que quels que soient les résultats, les effets ne sont visibles qu'à échelle globale : « Ce n'est que depuis quelques années, et à l'initiative de chercheurs soviétiques, que la comparaison, par méthodes statistiques, des débits écoulés par de vastes bassins de fleuves ou rivières, couvrant plus de 1000 kilomètres carrés, différents par leur couverture végétale mais par ailleurs similaires (géologie, relief, climat...) a pu témoigner d'un accroissement des débits écoulés, donc du bilan hydrique global des grands bassins, parallèles à l'augmentation de leur taux de boisement » in Poncet (A), *Interactions forêts et climats* – Mélanges offerts à Ch. P. Peguy – Gap, 1981 – pp 445-462.

Pour un même type de forêt, comme les conifères, l'accroissement des débits annuels est compris entre 200 et 700 millimètres. La dispersion des résultats est trop importante pour caractériser précisément la relation entre le taux de boisement et l'accroissement des débits.

2.1.2) Reconstitution des écoulements et de leurs variabilités depuis 1870

Si une relation entre l'eau et les forêts est démontrable à partir d'expériences sur de grands espaces supérieurs à 1 000 kilomètres carrés comme le préconisait Poncet (1981), réaliser une carte des forêts de 1870 à l'échelle nationale semble tout à fait indiqué. A partir de cette carte, il serait possible d'estimer des écoulements de grands fleuves français en prenant en compte le taux de boisement de leur bassin versant en 1870. Ce taux n'étant pas le même entre la carte de Cassini, la fin du XIX^{ème} siècle et aujourd'hui, cette carte permettrait de retracer la variabilité des écoulements sur le long terme.

Une fois la carte réalisée, il sera intéressant d'en confronter les taux de boisement des bassins versants avec ses données hydrologiques de 1870. Pour le moment, nous pouvons calculer la corrélation entre les résidus des débits et le taux de forêt des grands bassins versants français. Si la corrélation est forte, la forêt exerce bien une influence sur les débits des bassins versant. Pour ce faire le modèle hydrologique de Turc (1954), présenté ci-dessous, permet de calculer un débit simulé que l'on soustrait ensuite au débit observé. Le résultat de la soustraction correspond aux résidus. Pour calculer le débit de Turc, il faut connaître les précipitations moyennes et l'évapotranspiration potentielle de chaque bassin. L'analyse météorologique Safran (Vidal *et al.*, 2010) nous propose ces données sur 600 bassins versants français aujourd'hui (données disponibles depuis 1958).

$$Q = P - \frac{P}{\sqrt{1 + \left(\frac{P}{E}\right)^2}}$$

Modèle de Turc (1954)

Les figures 4 et 5 en annexe ne nous permettent que difficilement d'obtenir une conclusion claire quant au rôle de la forêt. Dans les bassins dont le couvert forestier est inférieur à 40%, le modèle de Turc sous-estime la réalité tandis qu'au-delà de 40% il surestime la réalité. Ces tendances des moyennes des résidus nous font cependant remarquer qu'il existe bien une influence et une relation justifiant davantage la cartographie d'une forêt passée pour en reconstituer les variabilités hydrologiques et climatiques.

2.2) Comprendre l'histoire des sols forestiers actuels

2.2.1) Les terres anciennement cultivées ont été recouvertes de forêts

Les forêts qui ont poussé après le XIX^{ème} siècle recouvrent souvent d'anciennes terres agricoles dont les traces sont actuellement visibles. Ces traces sont avant tout d'ordre chimique. Les modifications chimiques dues aux apports anthropiques anciens de fumiers et d'engrais sur les terres agricoles expliquent le taux anormalement élevé de phosphore et d'azote ainsi que la forte production de nitrate dans les sols forestiers récemment plantés (Koerner et al., 1997). Par exemple, l'apport de fumier dans un champ augmente la production de phosphore, intensifiant l'activité microbologique à l'origine des nitrates. Les déjections d'animaux de pâturages produisent les mêmes effets sur l'activité microbologique et sur la composition chimique des sols. De cette façon, la connaissance des forêts de 1870 indiquerait la localisation et l'étendue de ces zones anciennement cultivées ce qui participerait de la gestion forestière actuelle. Aussi la mise en valeur d'une terre agricole, qu'il s'agisse d'un champ ou d'une prairie, passe par l'épierrage du terrain surtout lors des labours. Cet épierrage permet aux couches superficielles de gagner en profondeur, augmentant comme il est expliqué plus haut la capacité de réserve du sol en eau. Une fois qu'une forêt a été plantée sur cet ancien sol agricole épierré, la réserve en eau ne peut qu'être optimisée dans la mesure où les arbres retiennent l'eau et que leurs racines s'enfoncent profondément dans ces couches déjà profondes. Ceci pourrait constituer un facteur explicatif des variations des réserves en eau entre une forêt ancienne et une forêt récente. L'évaluation de la forêt de 1870 n'en devient que plus utile.

2.2.2) Les effets de la fertilisation des terres

Mais ces différentes caractéristiques d'anciens sols agricoles sont non sans effet sur les forêts récentes, surtout du point de vue de la composition chimique des sols. Une des premières conséquences semble être méliorative pour la forêt actuelle. Dupouey (2007) prend l'exemple des forêts récentes des Vosges qui ont poussé sur d'anciennes terres agricoles. Les remaniements chimiques de ces sols au XIX^{ème} profitent aujourd'hui une bonne hauteur dominante dans les peuplements d'épicéas. Cette hauteur est de 3 à 5 mètres à l'âge de 90 ans sur des terres anciennement labourées ce qui est nettement supérieur à celle des épicéas sur des sols sans modifications pédologiques.

A l'instar de ces améliorations de productivité, l'apport d'éléments fertiles par les agriculteurs du XIX^{ème} siècle sur ces sols affecte la santé des arbres. Au bout d'un certain temps, ces mêmes épicéas des Vosges voient leurs cœurs pourris par un agent pathogène, *Heterobasidion annosum*, qui jouit de l'enrichissement anthropique des sols. Aussi le dépérissement des forêts de chênes dépend fortement de l'histoire de ces anciennes terres agricoles. Par exemple, une forêt a pu être plantée à partir du XIX^{ème} siècle sur une ancienne

prairie. Or les prairies ont été vidées de leurs éléments fertiles naturels au profit de champs. L'appauvrissement de ce sol affecte donc la croissance de la forêt récente de chêne. En cela, la cartographie des forêts de 1870 permettrait de prévenir les risques qu'une nouvelle forêt encourrait s'il elle devait être plantée sur un sol artificiellement appauvrie si tant est que tous ces anciens sols ne sont pas déjà reboisés.

2.3) Participer à la gestion conservatoire des forêts françaises

2.3.1) Évaluer l'ancienneté des forêts

La carte des forêts de 1870 distinguerait les forêts anciennes des forêts récentes. Selon Decocq (2012), une forêt ancienne est une forêt établie sur un sol dont la continuité forestière est assurée depuis plusieurs siècles, en tout cas avant 1750. La définition de la forêt récente se rapporte directement à l'histoire de son usage du sol : « une forêt récente est établie sur un sol anciennement cultivé » en plus des forêts des RTM qui ont considérablement changé les paysages montagnards en recouvrant des pentes nues ou en obstruant parfois les points de vue depuis certains sommets. L'évaluation de l'ancienneté d'une forêt aide à sa patrimonialisation et éventuellement à sa conservation tandis que Corvol (2011) écrit que la forêt est entendue chez les hommes comme une réserve de terre propice à des aménagements. « Ainsi, pour le tracé d'une autoroute, le choix est rapide: mieux vaut abattre les arbres qu'arracher les vignes » dont la valeur ajoutée est supérieure à celle de la forêt à tel point que la ville de Beaune limite son extension urbaine à l'est où se trouvent les vignobles, préférant gagner du terrain sur des forêts par exemple. Mais l'histoire de la forêt devrait constituer un outil de gestion forestière aux services comme l'ONF, sans se cantonner seulement à la valeur patrimoniale. Comme nous l'avons vu plus haut, l'histoire de l'usage des sols influence le sol et son occupant actuels. Une gestion qui prendrait davantage en compte le passé fertile d'une terre serait plus pertinente qu'une simple datation de la forêt. Il serait par exemple possible de déterminer quelles espèces sont vouées à mourir si elles sont plantées sur d'anciennes terres agricoles souffrant de l'agent pathogène *Heterobasidion annosum*. L'évaluation de cette forêt du XIX^{ème} siècle constituerait un document sur lequel les gestionnaires forestiers pourraient s'appuyer afin de confirmer leurs connaissances historiques des sols forestiers.

2.3.2) Histoire des paysages et des hommes.

Il est à noter que l'histoire du paysage peut être un miroir d'une histoire des hommes dans la mesure où la place de l'homme dans le paysage est prédominante et manifeste autant par sa présence que par son absence. L'homme met plus en valeur qu'il n'abandonne de territoire et ce, en fonction de ses besoins et de ses conceptions du paysage. Robic (1996) souligne les conceptions d'hygiénisme et d'esthétisme qui muent les esprits des hommes aménageurs au

XVIII^{ème} siècle. Par exemple, les marais sont perçus comme de « mauvaises terres » propices à tous les miasmes. Leur assèchement n'est pas neutre et il procède de ce souci d'hygiénisme et d'esthétisme en plus du besoin de terres. En ce qui concerne la forêt du XIX^{ème} siècle, le changement d'occupation du sol n'est pas seulement d'ordre forestier. L'augmentation des surfaces boisées est notamment due à l'exode rural vers la ville. En 1860, il y a plus de ruraux que de citadins en France et en 1930, les deux populations sont égales. L'abandon des terres au profit de nouvelles forêts a donc été croissant depuis la fin du XIX^{ème} siècle. Cet abandon lié à un contexte socio-économique, politique et culturel est directement lisible dans le paysage forestier qui recouvre un ancien paysage agricole. Une carte de la forêt de 1870 en comparaison avec la carte des forêts actuelle pourrait quantifier ces terres abandonnées, c'est-à-dire les parcelles cultivées devenues forestières. D'une certaine façon cela reviendrait à quantifier une variable de cet exode rural grâce à l'histoire des paysages.

PARTIE II) Contexte du projet

1) Présentation d'IRSTEA et du projet

1.1) Irstea Antony

1.1.1) Irstea et ses acteurs

Le CEMAGREF, qui est devenu en 2012 l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea), est un établissement public à caractère scientifique et technologique qui comporte neuf centres en France entre Bordeaux, Lyon-Villeurbanne, Aix-en-Provence, Grenoble, Montpellier, Clermont-Ferrand, Rennes, Antony et Nogent-sur-Vernisson. C'est à l'IRSTEA d'Antony que ma mission doit se réaliser puisqu'elle relève de problématiques hydrologiques. IRSTEA s'intéresse effectivement aux eaux continentales, à la gestion des déchets, au génie des procédés frigorifiques et de la chaîne du froid, ainsi qu'aux équipements agricoles, ce qui nécessite certaines infrastructures comme les laboratoires sur le Grand Froid. IRSTEA développe ainsi de nombreux partenariats avec des entreprises extérieures dont l'ONEMA, VEOLIA, SUEZ, RMC ou EDF pour la recherche hydrologique.

1.1.2) Financements globaux

Le budget global de l'IRSTEA est de 115 millions d'euros en 2011, dont 32% de ressources propres. Les sources de ces financements pour les projets sont diverses : Banque Publique d'Investissement, Pôles de Compétitivités, le Crédit Impôt Recherche, des financements européens ou encore des Régions. Ainsi IRSTEA travaille sur sept domaines d'intervention en France et à l'étranger (Écotechnologies pour le traitement de l'eau et des déchets, agroécologie, Froid et procédés agro-industriels, Gestion environnementale et restauration des milieux, Prévention des risques naturels et environnementaux, Aménagement et développement durable des territoires, Métrologie environnementale) dont les financements varient selon les projets.

1.1.3) L'unité de recherche HBAN

Mon stage s'est déroulé dans l'unité de recherche HBAN Hydro-systèmes et Bioprocédés, plus précisément dans l'équipe HYDRO composée de six scientifiques permanents, quatre doctorants, six ingénieurs contractuels et qui est animée par Charles Perrin (Annexe 3). Ses partenaires sont variés entre UMR, EDF, AgroParis-tech, MétéoFrance ou SCHAPI. Les comportements hydrologiques des bassins versants à travers des modèles constituent la principale activité de l'équipe dans la perspective de prévision de crues, des étiages et de gestion des ressources en eau. En 2010, à l'IRSTEA d'Antony, neuf thèses ont été soutenues par des étudiants. A l'échelle nationale, IRSTEA accueille environ soixante-dix stagiaires par an. Il en résulte une moyenne d'âge assez jeune dans les équipes de recherche. Dans la mesure où je ne m'attendais pas à cette composition des unités de recherche, il me paraît important de le faire apparaître dans ce rapport. J'ai donc pu assister aux présentations de travaux de thésards lors de commissions d'avancement en salle de réunion.

1.2) Le projet HyMet20C et mes objectifs

1.2.1) HyMet20C

HyMet20C est le nom du projet qui est à l'origine du sujet sur l'évolution du couvert forestier depuis 1870. Celui-ci implique une complémentarité entre la climatologie, l'hydrologie, la géographie, les statistiques et l'histoire de l'environnement, engageant une collaboration entre LTHE, IRSTEA, CNRS, Météo France, EDF, CNR ainsi que Acthys Diffusion pour les partenaires industriels. En effet, son objectif principal est d'établir une méthode rigoureuse pour effectuer une reconstitution hydrométéorologique des régimes hydrologiques français au XXème siècle. Pour cela, HyMet20C entend retracer l'évolution hydrologique française sur les 140 dernières années et en étudier la variabilité. Mais une telle tâche est compliquée par le manque de données avant le XXe siècle cité plus haut. HyMet20C propose ainsi quatre thèmes de travail (Thematic Work Packages) : Le premier consiste à générer et à récupérer des données historiques fiables sur les précipitations, les températures et les débits en France depuis le XIXème siècle. Le deuxième se penche sur la meilleure méthode à trouver pour une reconstitution météorologique en France. Le troisième identifie quel modèle hydrologique serait le plus efficace pour établir cette reconstitution et pour fournir des données fiables. Enfin, le quatrième thème tend à caractériser les débits, leurs variations et leurs tendances ainsi qu'une étude des plus grands événements hydrologiques de la période étudiée.

1.2.2) Les contributeurs au projet à HBAN

Bien que le stage à IRSTEA et le sujet m'aient été proposés, le projet HyMet20C n'est pas encore financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Pourtant, certains

scientifiques permanents de HBAN sont chargés de ce projet. J'ai donc été amené à travailler avec certains d'entre eux, notamment avec le géomaticien de l'unité de recherche sur des questions de programmation et de cartographie. Au total, au moment du stage, HyMet20C n'est pas au cœur des travaux de l'unité HBAN mais il s'agit bien d'un appel à projet sur lequel elle travaillera si le projet est financé par l'ANR.

1.2.3) Mes objectifs

L'objet du stage n'est évidemment pas de répondre aux quatre thèmes de travail mais constitue un premier pas vers la constitution d'une base de données de couvert forestier au XXème siècle. Cette étape est nécessaire à la prise en compte de l'impact des forêts sur les reconstitutions hydrologiques. Le temps de ma mission étant relativement court pour un nombre considérable de données à générer, nous nous limiterons à la cartographie forestière du bassin versant de la Seine, de la Saône, du Rhin et de ses affluents, de la Meuse, à la Bretagne, et à la Loire en 1870. Pour comprendre l'évolution stipulée par le sujet, ma tâche consiste en la recherche d'informations et de sources les plus fiables traitant déjà du sujet. Croiser ces sources a été nécessaire afin de discerner les similitudes ou les différences notamment sur les statistiques forestières. Nous verrons que les sources trouvées appellent parfois à la prudence. Ma mission a aussi consisté en l'application de la méthode la plus efficace pour cartographier la forêt de 1870. L'entrée des nouvelles données est la partie la plus longue à mener en raison du nombre important d'entités à traiter. L'interprétation et la discussion des résultats sur les bassins versants cartographiés viennent clôturer la mission de mon stage. Outre les tâches relatives au sujet, les objectifs du stage portent aussi sur la sensibilisation à des logiciels de programmation auquel je n'avais jamais été confronté comme R.

2) Sources, données et absences de données

2.1) *La carte d'Etat-Major et son contexte*

2.1.1) Sources et dates de réalisation des cartes

La première source à laquelle nous faisons appel est la carte d'Etat-Major. Commandé par l'Ordonnance Royale de 1827 au Dépôt de la Guerre, cette carte couvre l'ensemble du territoire français tel qu'il était durant sa cartographie entre 1818 et 1866 (comprenant la Corse, les deux Savoie et le Comté de Nice). Le tableau d'assemblage (Figure 6) permet de visualiser les quatre étapes de relevés à commencer par les frontières avec la Belgique et la Prusse Rhénane ainsi que la région parisienne démontrant ainsi la fin militaire de cette carte. Elle est la deuxième carte à prétendre à une telle ambition après la carte de Cassini.

Cependant, la carte d'Etat-Major est établie à partir de nouveaux travaux de triangulation sur le terrain, qui réduisent certaines erreurs de la carte de Cassini. 274 feuilles, le méridien de Paris et l'échelle Bonne structurent ainsi la carte nationale de l'Etat-Major.

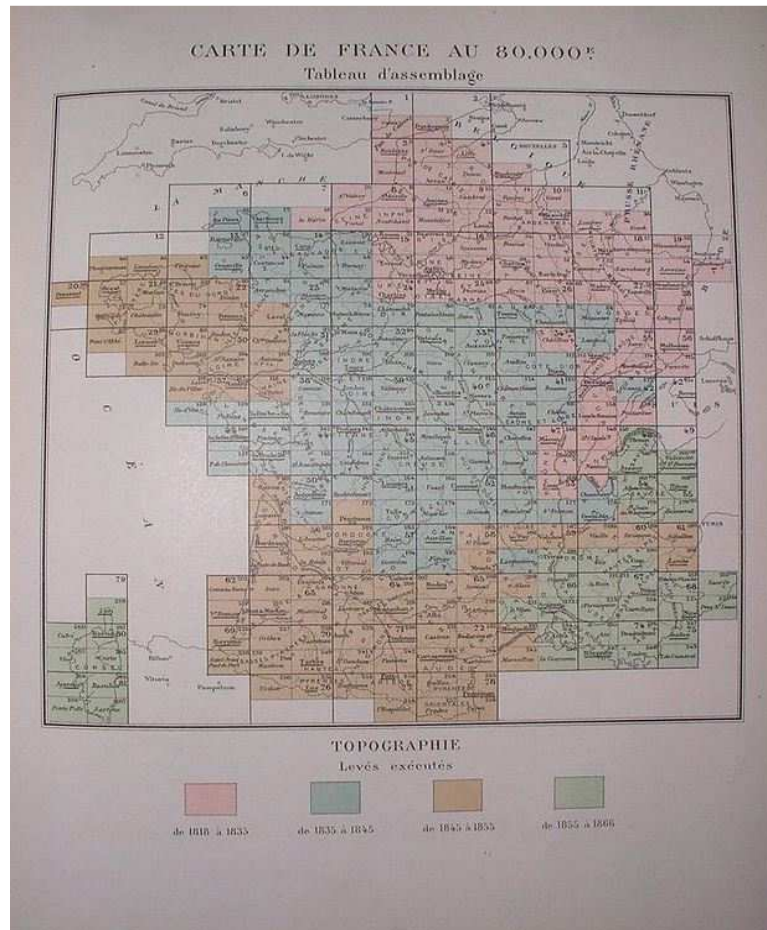


Figure 6 : Tableau d'assemblage des cartes de l'Etat-major (Wikipedia)

2.1.2) La légende et ses problèmes de lectures

La carte d'Etat-Major est une source très riche concernant l'occupation du sol. Il est néanmoins à noter qu'elle présente certaines difficultés dans son interprétation. La principale est la lecture de la légende qui n'est pas être toujours évidente. Les légendes disponibles dans des ouvrages ou sur les sites web de l'IGN et de Géoportail idéalisent la qualité des figurés. La forêt est ainsi légendée comme un polygone dont le vert ne pose aucun doute. En revanche sur la carte, les teintes de vert sont de bien moindre qualité en raison de l'âge de la carte et des couleurs utilisées. De cette façon, la forêt peut apparaître en vert très clair, voire jaune et parfois même bleu sur la carte et le point peut être difficile à interpréter lorsque la forêt se trouve dans des reliefs topographiques (Figure 7). Or, la couleur bleue est utilisée pour un autre figuré qu'est celui des prés. Il s'agit donc de ne pas confondre ces figurés d'occupation du sol, ce qui requiert une certaine attention.



Figure 7 : Exemples d'occupation du sol difficiles à interpréter sur la carte de l'Etat-Major

2.1.3) Des erreurs dans les révisions des cartes

Une deuxième difficulté est à prendre en compte. Celle-ci concerne la précision des localisations sur la carte. Bien que la carte d'Etat-Major soit plus précise que celle de Cassini pour géolocaliser les types d'occupation du sol français, elle souffre de lacunes dans ses mises à jour. Entre 1840 et 1870, le Dépôt de la Guerre somme les Eaux et Forêts de lui communiquer toutes les modifications entreprises sur le couvert forestier durant cette période. Mais la Commission des Révisions juge trop onéreux et donc inutile la nouvelle dépêche de plusieurs topographes sur le terrain seulement pour des mises à jour Gaumet, fin XIX^{ème} siècle). Ainsi, les modifications de l'occupation forestière ne sont pas vérifiées par du personnel compétent. Cette lacune a été confirmée par les Allemands qui récupèrent les cartes d'Alsace et de Lorraine après 1970 et constatent d'importants retards de cinquante ans (*Gazette de Darmstadt*, 3 février 1875). Aussi, toutes les cartes n'ont pas été révisées, perturbant davantage l'exactitude de nos résultats. Il est difficile de déterminer quelle parcelle de forêt a fait l'objet d'oublis entre 1840 et 1870.

2.2) *La carte de Cassini au format vectoriel*

2.2.1) La carte originale

La cartographie relevant de la « science des princes » (Bailly, 1995) ou encore d'un instrument du pouvoir (Olson, 2007), Louis XV ordonna, au XVII^{ème} siècle, à Cassini de produire une carte du royaume à des fins fiscales et stratégiques (Figure 8). A l'époque le royaume ne comprenait pas la Corse, les Deux Savoie ni le Comté de Nice). Elle a été réalisée par quatre pères et fils Cassini jusqu'au XVIII^e siècle. Il s'agit de 180 feuilles de 85 sur 50 kilomètres, établies par la triangulation qui est alors toute nouvelle. Pourtant la carte de Cassini s'inspire de quelques cadastres déjà conçus et de modèles comme les « mappes sardes » qu'étaient les cartes fiscales commandée par Victor Amédée en 1728 pour optimiser les impôts. Arpenteurs et ingénieurs sillonnent donc le royaume et cartographient 3800 kilomètres carrés par an. En 1920, Huffel reprend les travaux de A.Young, agriculteur et agronome britannique, de 1790 (Cinotti, 2000) et estime alors le couvert forestier à 7 620 000 hectares. Elle constitue ainsi une source précieuse pour son étendue sur tout le royaume et ce pour la première fois dans l'Histoire d'autant que Cassini considère la forêt comme la première occupation du sol.



Figure 8 : Extrait de la carte de Cassini (Saint-Priest-la-Prugne)

2.2.2) La carte vectorisée

Afin d'exploiter au mieux la carte de Cassini, le WWF, l'INRA et les Réserves Naturelles Catalanes entreprennent en 2011 de tracer les polygones autour de chaque parcelles forestières (Figure 9) soit 51 726 entités sous un seul type de couvert forestier (« forêt »). Pour vectoriser des parcelles, les auteurs ont dû dessiner à la main les contours de chaque polygone (Annexe 4). Ce travail riche mais fastidieux nous permet de ne pas le reproduire pour la carte d'Etat-Major mais d'user d'une méthode automatique qui sera décrite plus loin. L'utilisation d'une telle source pour le projet est donc nécessaire et bénéfique.

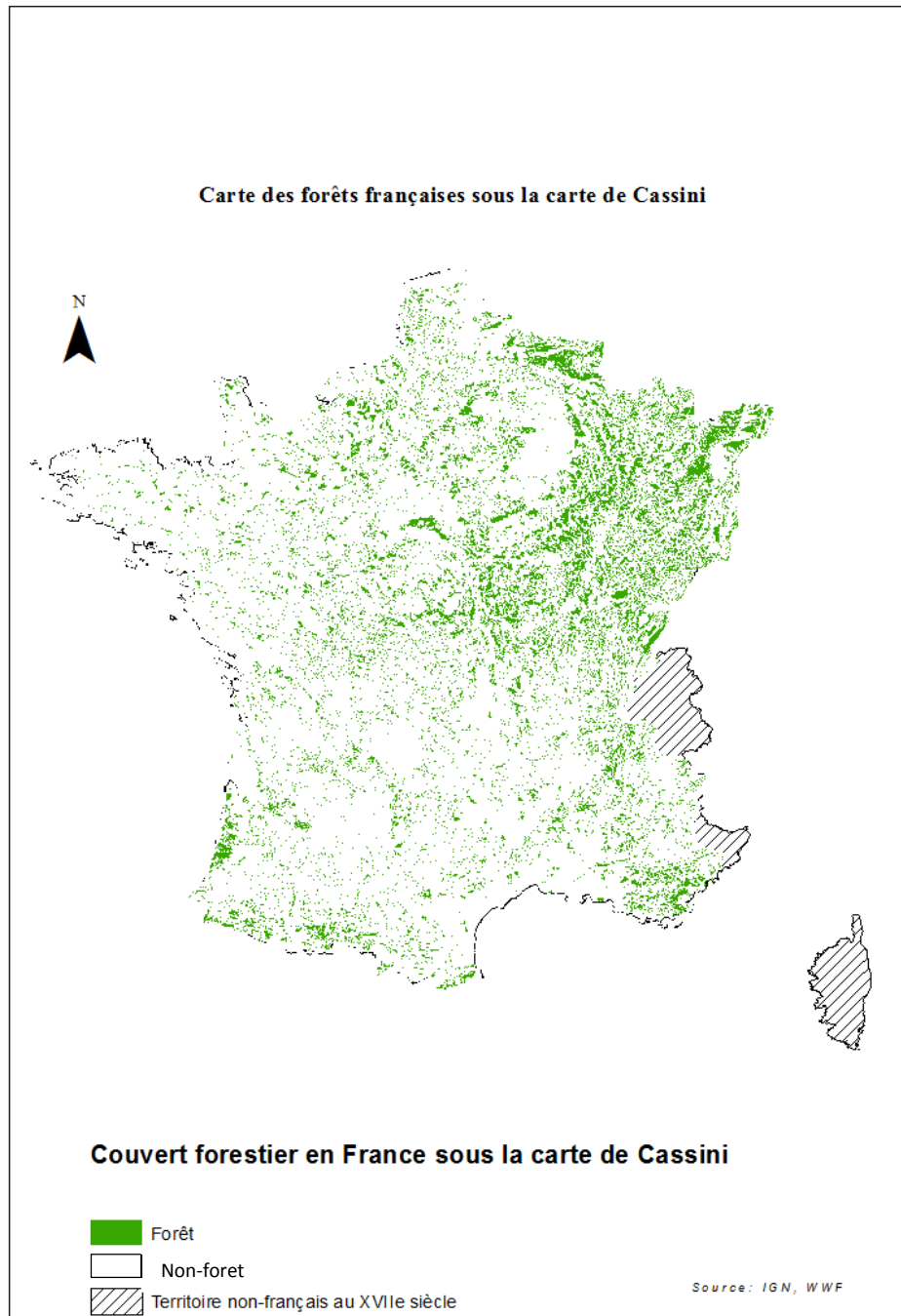


Figure 9 : Carte des forêts françaises sous la carte de Cassini.

2.2.3) Les marges d'erreur à prévoir

« Il faut remarquer qu'il y a que les bois d'une étendue considérable qui soient indiquées sur les cartes [de Cassini] » souligne Arthur Young qui s'était rendu en France pour la sillonner entre 1787 et 1790. Ce manque de surface forestière n'a pu qu'affecter la vectorisation de la carte de Cassini, rendant la source incomplète. Un autre type d'erreur dû aux limites technologiques est à signaler sur cette carte : l'erreur de positionnement. Celui-ci est d'ordre kilométrique. Cette erreur provient en premier lieu de la qualité de la localisation des clochers qui servaient à construire une triangulation, c'est-à-dire à situer correctement les objets dans l'espace. Sur 340 points répartis en 17 feuilles, 34% ont une erreur supérieure à 195 mètres dont un maximum à 1510 mètres. La triangulation est donc imparfaite. L'erreur de positionnement provient également de la qualité des contours forestiers qui étaient effectués par dessins, basés sur des plans anciens de notables locaux qui ne font pas gage d'exactitude. C'est enfin à la qualité du scannage effectué en 2001 que l'on doit une partie des erreurs de positionnement. Bien que la qualité du scannage soit significative, il faut prévoir certaines erreurs allant jusqu'à 770 mètres entre l'objet réel et l'objet cartographié. Le scannage opère à son insu un décalage en raison de sa qualité et de la qualité des documents exploités. Notons ici que le dessin des polygones effectué en 2011 a pu être perturbé par la lecture difficile de la légende qui est altérée par certaines ambiguïtés des cartes de Cassini. La carte de Cassini utilise en effet plusieurs figurés de forêt (Figure 10 en annexe 5).

2.3) La carte d'occupation du sol de Corine Land Cover 2006

2.3.1) Une image satellite et une carte vectorielle

Pour tenter de comprendre l'évolution du couvert forestier en France depuis 1870, des données sur l'occupation actuelle du sol sont nécessaires. La base de données Corine Land Cover de 2006 répond à cette exigence. Cette base de données découle d'un projet piloté par l'Agence Européenne de l'Environnement qui consiste en la photo-interprétation d'images satellites de Landsat, SPOT ou IRIS dont la précision est comprise entre 20 et 21 mètres. Ce procédé consiste à rehausser les couleurs d'une image en fonction du type d'occupation sur sol correspondant. Par exemple, les occupations urbaines du sol sont généralement caractérisées par des pixels de couleurs grises. Des formes par type d'occupation du sol apparaissent sur l'image. L'étape suivante consiste en la vectorisation de ces formes, par dessin des polygones. La base de données est téléchargeable sur le site web gouvernemental des statistiques et du développement durable. A partir de cette carte vectorisée, il est possible d'établir un inventaire biophysique de l'occupation des sols selon le même principe que la carte de Cassini vectorisée.

2.3.2) Types et tailles de l'occupation forestière

La version Corine Land Cover (CLC) de 2006 adopte une échelle au 1 : 100 000 qui est quasiment la même que celle de Cassini (1 : 86 400). Pour des raisons de lisibilité, la base de données CLC ne prend en compte que les massifs forestiers dont la surface est supérieure à 25 hectares. L'utilisation de cette carte à l'échelle de la commune n'est donc pas souhaitable. L'échelle départementale apparaît comme étant la plus viable.

Enfin la base de données CLC classe le couvert forestier sous la catégorie Forêts et milieux semi-naturels qui comprennent par exemple la forêt de feuillus et la végétation sclérophylle. Une sélection de ces types de couvert forestier sera nécessaire dans la méthode afin de simplifier la lecture de la carte et d'optimiser le temps de travail. La carte CLC est effectivement composée de 273 065 polygones de tous types d'occupation du sol ce qui en fait un fichier lourd à traiter (Figure 11).

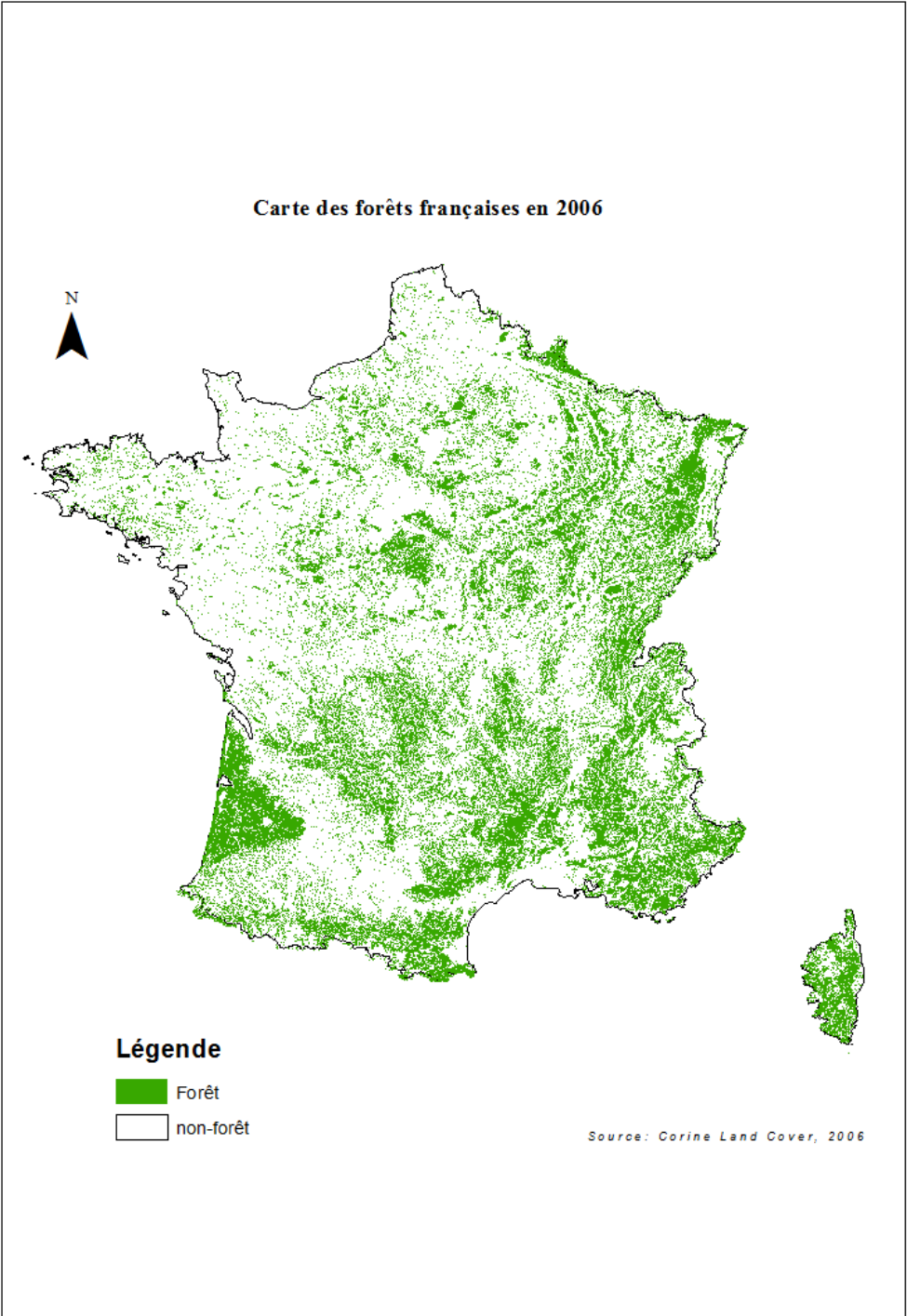


Figure 11 : Carte des forêts françaises selon le Corine Land Cover 2006.

2.4) Les dalles de l'Etat-Major

2.4.1) L'ortho-photo

Dans la mesure où le projet se fait à l'aide d'outils informatiques, un fichier de cartes d'Etat-Major est indispensable. Comme nous l'avons vu, il ne s'agit pas de dessiner les contours forestiers dans un SIG, mais plutôt d'utiliser une image géo-référencée des cartes d'Etat-Major. Le géo-référencement permet de localiser une image d'une carte dans un système de données cartographique vectorisé. En d'autres termes, une image géo-référencée est superposable à une couche vectorielle dans un logiciel de cartographie tout en conservant informations géographiques correspondantes (Figure 12). Pour cela, nous avons besoin de « dalles ». Une dalle est une ortho-photo, c'est-à-dire un assemblage géo-référencé de plusieurs feuilles d'Etat-Major. Il ne faut pourtant pas confondre une dalle avec une feuille qui est une carte rectangulaire d'un espace donné avec une échelle.

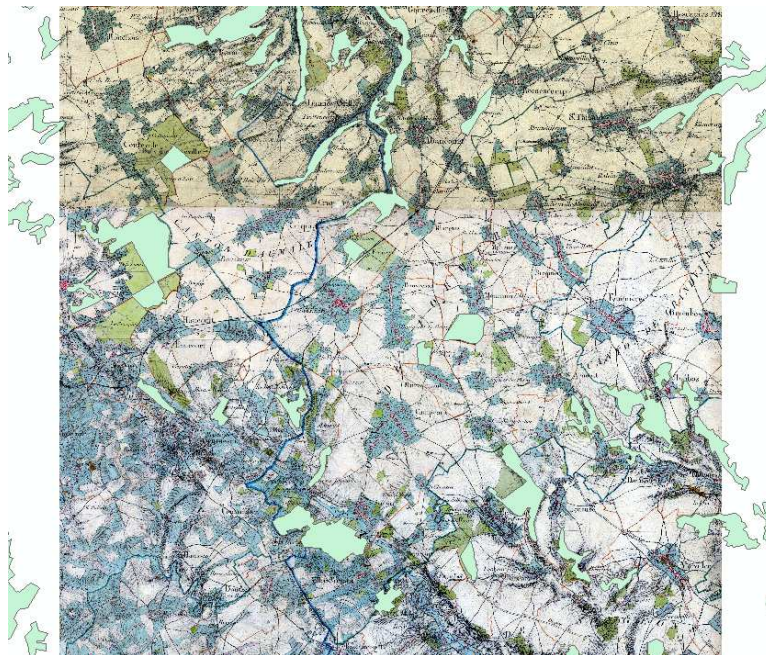


Figure 12 :Exemple de superposition d'une couche des polygones de forêt sur une dalle de l'Etat-Major

2.4.2) Provenance de la source

Un tel document n'est pas disponible dans le domaine public. Il a donc fallu s'adresser à l'IGN pour se procurer les cartes géo-référencées de l'Etat-major. Cette acquisition a fait l'objet d'une mission qui était de récupérer les dalles à l'IGN à Vincennes. Cette mission m'a permis d'entrevoir un des aspects de la recherche qu'est la collaboration ou les ententes entre les organismes. Ainsi, l'état d'avancement d'un projet peut dépendre en partie d'institutions extérieures dans la mesure où elles possèdent des sources importantes. Dans le cas présent, la rapidité avec laquelle le document a été fourni après la commande est à saluer et nous a permis de commencer le plus tôt possible le travail de création de données nouvelles.

2.5) *Statistiques forestières de Daubrée, 1912*

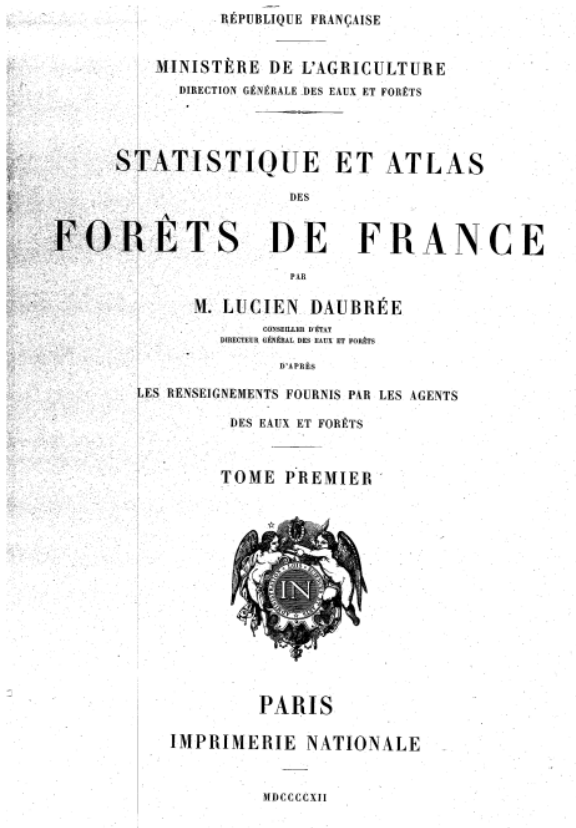
2.5.1) Un Atlas forestier

La Statistique et l'Atlas des forêts de France très souvent nommée « Inventaire Daubrée » est une autre source dont nous nous servons, notamment pour comparer nos résultats. Cet Atlas, réalisé en 1912 par le Directeur Générale des Eaux et Forêts Lucien Daubrée, est une source riche dans la mesure où elle donne les surfaces forestières pour chaque canton et département en France. Daubrée renseigne la répartition des surfaces boisées improductives, des futaies, taillis, sous-futaies, taillis simples ainsi que les surfaces de bois de production.

2.5.2) Une référence au Cadastre napoléonien

L'Atlas de Daubrée (Figure 13) fait référence au cadastre napoléonien dont il ne faut pas sous-estimer l'approximation et la marge d'erreur inhérente à tout inventaire forestier. Ainsi Leroy (1953) invite à une certaine prudence quant à l'utilisation de cet inventaire : « La statistique Daubrée possède le défaut essentiel d'être trop ancienne ». Les données mises à jours en 1908 aux lesquelles se réfère Daubrée comportent des erreurs de révision peut-être faites trop rapidement en se limitant seulement aux évolutions des agglomérations. Or, entre les coupes, les plantations spontanées ou anthropiques, et les abandons de terres agricoles au profit de bois, rien ne peut affirmer que la forêt est un milieu immuable. Ainsi, certaines surfaces forestières restent très mal connues bien qu'étendues⁴.

⁴ Dès l'introduction de *L'emploi des statistiques forestières dans les monographies*, R. Leroy souligne l'inexactitude potentielle de l'inventaire Daubrée en dépit de ses mises à jours : « Il est bien connu que les surfaces cadastrales sont souvent très inexactes en montagne pour les grandes propriétés d'un seul tenant et occupant des régions accidentées, ce qui est le cas courant des grands massifs boisés. Le cadastre est souvent vieilli ; s'il n'a pas été révisé récemment, la forêt a perdu du terrain en certains points, elle en a gagné en d'autres, si bien que le classement des propriétés d'après le mode d'utilisation est devenu inexact. Là où des révisions sont intervenues, encore faut-il qu'elles n'aient pas été faites trop hâtivement en se limitant au



STATISTIQUE DES FORÊTS DE FRANCE.
RENSEIGNEMENTS STATISTIQUES.

NOM DE LA COMMUNE	CANTON	ARRONDISSEMENT	PRODUCTION DE LA COMMUNE		RÉPARTITION DE LA SURFACE TOTALE										ÉVALUATION DE LA PRODUCTION ANNUELLE						
			BOIS	SAISON	BOIS	SAISON	BOIS	SAISON	BOIS	SAISON	BOIS	SAISON	BOIS	SAISON	BOIS	SAISON	BOIS	SAISON	BOIS	SAISON	
I. BOIS DOMANIAUX SOUMIS AU RÉGIME FORESTIER.																					
ARRONDISSEMENT DE CALVAI-TERRIER.																					
Charly																					
Château-Thierry																					
Guillemet-Sec																					
Flacey-Tudon																					
Neuilly-Saint-Front																					
Total																					
ARRONDISSEMENT DE LAIN.																					
Ancy-les-Eaux																					
Charly																					
Compy-les-Cluses																					
Crémery																					
Crépy-en-Santerre																					
La Fère																					
Lez																					
Milly																					
Neufchâteau																					
Reims																					
Reims-Sud																					
Soissons																					
Total																					
ARRONDISSEMENT DE SAINT-QUENTIN.																					
Belleu																					
Caumont (La)																					
May																					
Reims																					
Saint-Quentin																					
Silly-Saint-Germain																					
Tonnay																					
Total																					
ARRONDISSEMENT DE REIMS.																					
Reims																					
Château-Thierry																					
Reims																					
Tilly																					
Villers-Mac																					
Villers-Carbonnel																					
Total																					
ARRONDISSEMENT DE VERDUN.																					
Verdun																					
Le Cépelle																					
Orléans																					
Illon																					
Le Normant																					
Saint-Amand																					
Verdun																					
Wassigny																					
Total																					

Figure 13 : Extraits de l'Atlas de Daubrée

PARTIE III) Méthodologie

1) Traitement des données

1.1) Outils mis à disposition

1.1.1) Un travail collectif et individuel

Ce projet ne peut évidemment pas se faire sans une assistance informatique. Un ordinateur a été mis à ma disposition pour que je puisse travailler indépendamment. Cependant nous procédions à des réunions avec Vazken Andréassian et Olivier Delaigue, qui est le géomaticien, pour faire le point sur l'état d'avancement du projet et sur les modifications de la méthode. Aussi le projet a nécessité un travail collectif avec Olivier Delaigue dans la mesure où il me formait sur les logiciels comme R. Ainsi, le travail proposé par le sujet était la plupart du temps individuel, surtout lorsqu'il s'agissait de rentrer les nouvelles données, mais aussi collectif puisque ce projet concerne d'autres membres de HBAN.

1.1.2) R

N'ayant jamais utilisé R avant le début du projet, cet outil fut une véritable découverte de ce stage sur la plan informatique. R est un logiciel de programmation statistique avec lequel il est possible de créer ou de modifier des données. Il constitue l'unique outil qu'il m'a été demandé d'utiliser pour structurer les données cartographiques. Certes la complexité de R a occasionné certaines difficultés dans l'avancement du projet, mais la qualité et la rapidité avec laquelle il génère des données nous ont permis de systématiser des bases de données et ainsi d'obtenir des résultats précis. Par exemple, entrer des données géo-localisées dans R est plus souhaitable que dans Excel car ce-dernier peut opérer un léger décalage des objets entre la carte initiale et la carte créée. Cette programmation s'effectue par l'écriture d'un script qui génère les structures statistiques. L'écriture du script peut prendre un certain temps (un à deux jours pour les plus complexes), mais les résultats seront sûrs et de qualité. La systématisation des données permet de traiter des séries très grandes et ce en un minimum de temps. Dans notre cas, R nous a permis de traiter 121 000 polygones de forêt sur toute la France ce qui est non négligeable.

1.1.3) Arcmap

ArcMap 10.2 est le deuxième logiciel dont nous nous sommes servis pour le projet. Cartographie et télédétection sont les fonctions de ce logiciel et nous lui avons préféré la première. Il est souligné plus haut que le nombre d'entités forestières en France est très élevé. R permet de les traiter statistiquement, mais la complémentarité d'Arcmap est nécessaire. En effet, un logiciel de cartographie permet de rendre lisibles les données et leurs caractéristiques (classement par taille par exemple). Dès la visualisation de la carte, il est possible d'apporter les premières interprétations dans la mesure où les fonctions de mise en page cartographique aident à repérer les phénomènes les plus significatifs. Réaliser une carte sur Arcmap avec diverses bases de données offre aussi un gain de temps puisque nous sommes à-même de voir sur la carte si nous avons commis des erreurs statistiques. Par exemple, nous savons que les Landes ont fait l'objet d'importants changements du couvert forestier dans la période étudiée (Figure 14).

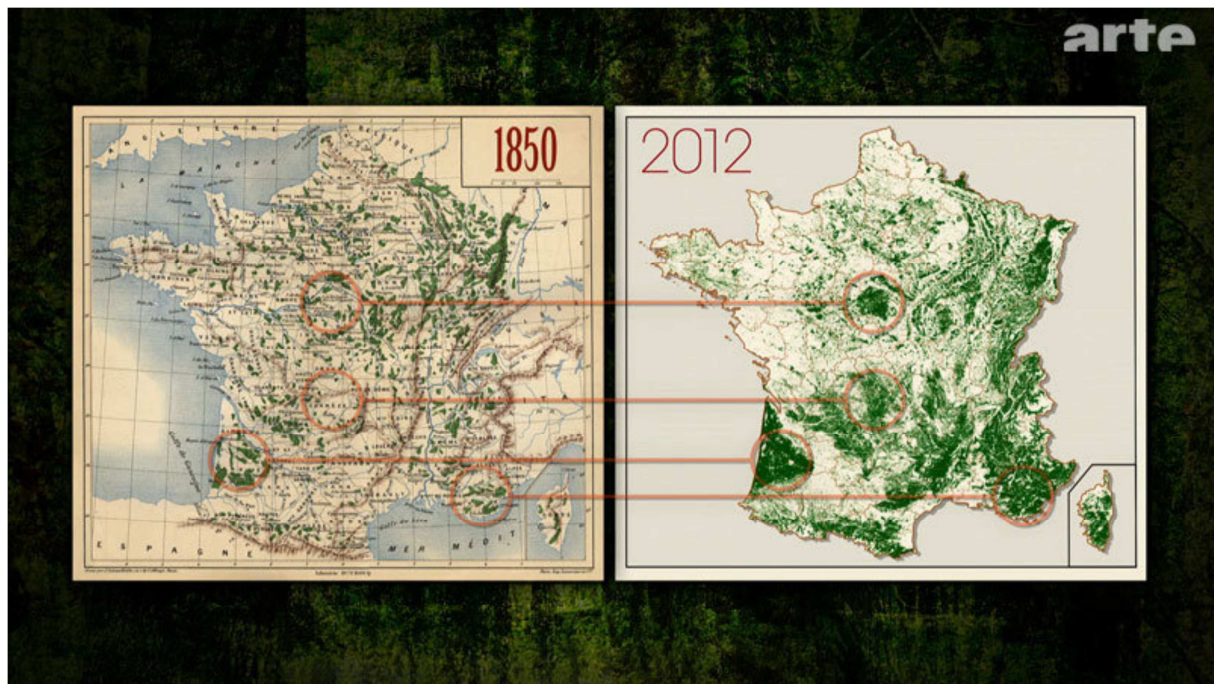


Figure 14 : Carte des principales différences d'occupation du sol par les forêts entre 1850 et 2012 (Le Dessous des Cartes)

Si nous constatons que le figuré qui correspond aux changements n'apparaît pas ou que très peu dans les Landes, il est immédiatement admis qu'il y a une erreur dans le traitement des bases de données ou dans la cartographie alors que nous savons qu'il y a eu de grandes évolutions à cet endroit. Il est donc important de visualiser une carte le plus rapidement possible au cours du projet pour observer des premières tendances spatiales ou même des erreurs. Au moment du stage, mes compétences dans le domaine du SIG étaient plus nombreuses que pour R en raison de la formation en licence de géographie sur des logiciels comme MapInfo, Arcgis, Arcmap ou Quantum Gis. La réalisation des cartes a donc présenté moins de difficultés.

2) Méthode

2.1) Explications

2.1.1) Ce qu'on ne peut pas faire

Afin de cerner les choix qui ont été fait pour cartographier le couvert forestier de France en 1870, il est bon de préciser ce qu'il n'est pas possible de faire pour des raisons matérielles ou de temps. Ayant été déjà utilisée par le WWF pour la carte de Cassini, la vectorisation par dessin des polygones d'occupation des sols semble être la meilleure méthode. Mais n'oublions pas qu'il s'agit de 121 000 polygones et que leur vectorisation serait trop longue et

fastidieuse. Même si une telle méthode est envisageable sur le long terme, elle ne correspond pas aux attentes du sujet proposé. Le sujet s'intéresse au territoire national dans son ensemble et non à un département ou deux. La carte du couvert forestier de 1870 est effectivement en cours de réalisation par certains organismes mais seulement département par département. Ainsi, la Lorraine et le Vercors ont été vectorisés par l'INRA, le Luberon et la région méditerranéenne par le WWF, les parcs nationaux des Cévennes par PNF et les Pyrénées par l'INRA, puis la région parisienne par l'ONF. La réalisation de ces cartes réparties entre plusieurs organismes et leur publication progressive ne peuvent qu'insister sur la longueur d'un tel travail.

2.1.2) Télédétection

Au nom de ces difficultés et de la nécessité d'une évaluation du couvert forestier de 1870, d'autres méthodes ont été explorées par d'autres organismes dont l'université de Paris 6. L'alternative au dessin des polygones un à un sur toute la France proposée par Paris 6 relève d'une méthode de télédétection. Celle-ci consiste à rehausser les couleurs des polygones de forêts de la carte d'Etat-major en ne sélectionnant que la bande bleue de l'image de la carte. Les zones recouvertes de forêts apparaissent alors en vert très clair et les zones non forestières en bleu (Figure 15). Néanmoins, cette méthode fait preuve de ses limites car la télédétection est plus efficace sur une image satellite que sur une carte dont les couleurs sont ternies par le temps. Dès lors, les forêts n'apparaissent pas de façon significative sur l'image traitée et sont difficilement localisables. De plus, d'autres types d'occupation du sol apparaissent en vert clair voire encore plus clair que les zones de forêt ce qui fausserait toutes tentatives de quantification des zones forestières.

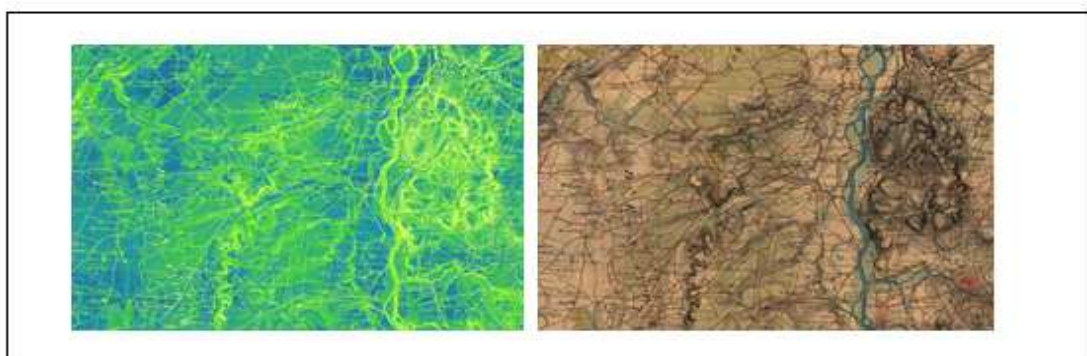


Figure 15 : Télédétection de la forêt à partir des cartes de l'Etat-Major

2.1.3) Une autre façon de procéder à l'échelle au moins départementale

A notre connaissance, la meilleure méthode est la création de polygones sans avoir à les dessiner. Cela est-il possible ? *A priori* et en possédant les cartes de Cassini et la carte de Corine Land Cover sur les occupations du sol au format vectoriel, nous pourrions donner une réponse positive. Le croisement des polygones de forêts de la carte de Cassini et de la carte CLC, c'est-à-dire le recoupement de deux couches en une seule, donnerait une carte intermédiaire qui correspondrait à la carte d'Etat-Major, et ce au format vectoriel. Certains de ces polygones cartographiés sur la couche Cassini ont pu disparaître durant la période en raison de déboisements. A l'inverse, des polygones de forêts apparaissent entre Cassini et CLC par reboisement artificiel ou spontané. Le croisement des deux cartes donne à voir ces variabilités du couvert forestier. Ensuite, si l'un ou l'autre type des polygones entrecoupés et nouvellement boisés apparaît ou non sur la carte d'Etat-Major, on obtient une partie de la forêt de 1870 sous forme vectorielle. En ce qui concerne les forêts qui n'ont pas bougé depuis la carte de Cassini du XVII^{ème} siècle, le même croisement entre les deux cartes vectorisées fait apparaître les polygones qui se sont maintenus. Ces forêts maintenues ou communes se trouveront nécessairement sur la carte de l'Etat-Major. Nous pourrions alors additionner ces polygones de forêts maintenues aux polygones de forêts coupées ou reboisées en 1870 et nous obtiendrions la totalité des forêts de cette époque sous forme de polygones dont nous connaissons la surface qui est donnée lors du croisement des deux cartes. Pour savoir si tel ou tel polygone se trouvait sur la carte de 1870, un travail manuel doit être mené, consistant à voir si un point d'un polygone issu du croisement est présent ou non sur la carte d'Etat-Major placée en arrière fond de la couche. Il s'agit de la partie la plus longue et la plus fastidieuse de la méthode qui tend cependant à gagner du temps tout en obtenant un résultat de qualité. Une fois cette carte vectorielle obtenue, il reste à calculer les surfaces des polygones des différences en forêt en 1870 additionnés aux polygones de forêts maintenues et nous obtenons une estimation du couvert forestier de la carte d'Etat-Major.

2.2) Les étapes de la comparaison entre CLC et Cassini

2.2.1) Sélection des forêts de Cassini et Corine Land Cover

Le couvert forestier étant le seul type d'occupation du sol qui intéresse le sujet, nous devons le sélectionner parmi tous les autres polygones des couches de Cassini et de Corine Land Cover. Cette sélection s'opère par la fonction « sélection par attributs » puisque l'information qui indique si tel ou tel polygone est forestier ou non se trouve dans la table attributaire c'est-à-dire dans la base de données de la carte. Les bases de données codifient les polygones de forêt selon un numéro qui nous permet de faire une sélection. Cette sélection se veut relativement large puisque les définitions de la forêt sont variables dès le XIX^{ème} siècle. Par exemple, la loi circulaire n°18 du 25 avril 1821 sous Louis XVIII demande aux préfets d'estimer la quantité de forêt sur leurs territoires⁵. Mais pour certains Préfets, en particulier

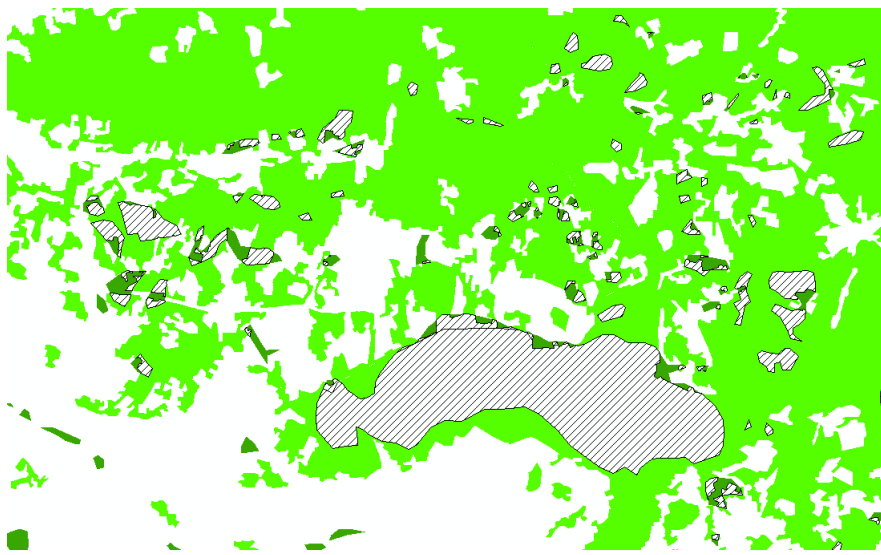
⁵ « 1/ Quelles forêts existaient dans votre département il y a trente ans ? Dans quelle zone et à quelle élévation

dans le sud de la France, la végétation arbustive est considérée non forêt alors que les forestiers la jugeaient comme tel. Une fois les sélections terminées, il suffit de créer une nouvelle couche à partir des deux sélections réalisées pour préparer leur croisement.

2.2.2) Intersection des forêts Cassini et Corine Land Cover

Le croisement correspond à l'intersection que l'on réalise à l'aide de la fonction « union » dans Arcmap. Elle consiste à unir deux couches en une seule tout en gardant la même forme des polygones de chaque couche. L'étape consiste donc à croiser la couche des polygones de forêt actuelle (CLC) avec la couche des polygones anciens (Cassini), toutes deux sélectionnées lors de l'étape ci-dessus. Ce croisement offre une première typologie des différences entre les polygones qui ont été coupés depuis le XVII^{ème} siècle et les polygones qui ont été reboisés depuis la même période. En effet, les polygones qui se superposent constituent la forêt maintenue qui est maintenue depuis le XVII^{ème} siècle. Les polygones de Cassini qui dépassent des polygones de la forêt actuelle sont les polygones de forêt qui ont disparu depuis le XVII^{ème} siècle. Les polygones qui dépassent les polygones de Cassini sont les polygones boisés ou reboisés depuis le XVII^{ème} siècle. Ces différences entre les polygones sont à remarquer dans les codes des polygones qui informent s'il s'agit de polygones de Cassini ou de CLC ou des deux à la fois (Figure 16).

étaient-elles placées ? Quelles étaient leur étendue et l'espèce d'arbres dont elles étaient formées ? 2/ Quelle influence a-t-on remarqué que la différence exerçât sur le système météorologique du département? Les rivières sont-elles eu des eaux plus ou moins abondantes ? Les inondations, les pluies ont-elles été plus ou moins fréquentes ? Y a-t-il eu plus souvent de la neige ou de la grêle, et, dans les pays de montagnes s'est-on aperçu que les glaces descendissent à plus basses régions, repoussant et refoulant la végétation vers les plaines ou les vallées ?». in *La loi circulaire n°18 du 25 avril 1821* de Siméon, Ministre de l'intérieur, sous Louis XVIII.



Typologie des massifs

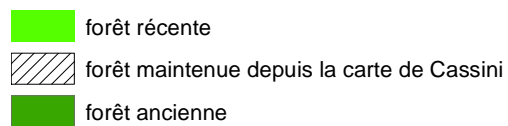


Figure 16 : Croisement des couches de Cassini et de Corine Land Cover 2006

2.2.3) Identification des polygones de forêts en évolution avec R

Les polygones de forêt maintenue ne nous intéressent pas pour le moment car nous savons qu'ils sont présents sur la carte de l'Etat-Major. En revanche, nous ne savons pas quels polygones coupés ou (re)boisés depuis le XVII^{ème} siècle sont présents sur la carte de 1870. La sélection de ces polygones est donc impérative. Un travail à la main détaillé plus loin permet ensuite de voir quel polygone coupé ou (re)boisé est présent sur la carte d'Etat-Major. Pour sélectionner ces polygones qui sont parmi les polygones de forêt maintenue dans la base de données, nous avons entré la base de données de l'union entre la carte de Cassini et de CLC dans R avec un script qui sélectionne toutes les valeurs correspondantes aux polygones coupés ou (re)boisés dans les colonnes correspondantes. Il en résulte une couche de polygones avec uniquement ces polygones de différence que nous pourrions désormais analyser (Figure 17).



Figure 17 : Couches des polygones des différences forestières entre le XVII^{ème} et le XXI^{ème} siècle

2.2.4) Légende et typologie

L'objectif de cette étape est de faire apparaître les grands phénomènes, c'est-à-dire là où les changements ont été les plus importants entre les dates des deux cartes (Cassini et CLC). La typologie se fait donc sur la couche des cartes croisées. Pour clarifier la lecture de la carte, une typologie par taille est proposée en fixant la taille minimale des polygones des deux cartes à 4 kilomètres carrés. Ce seuil minimal est fixé à 4 kilomètres carrés en raison de l'existence d'une multitude de polygones inférieurs mais qui n'altèrent pas de façon significative les évaluations quantitatives. Les petits polygones ne font que perturber la lecture de la carte et n'ont pas d'utilité à l'échelle départementale et encore moins nationale.

Outre la légende et la symbologie, les espaces concernés par de grands changements dans l'histoire de l'occupation des sols sont visibles grâce à la variation de densité des polygones. Plus ils sont denses, plus la carte est sombre et plus il y a de changements. Aussi les polygones qui apparaissent en bleu sur la carte (Figure 18) ont les surfaces les plus importantes. Ainsi les Landes apparaissent en bleu puisqu'elles ont été plantées entre le XIX^{ème} et le XX^{ème} siècle.

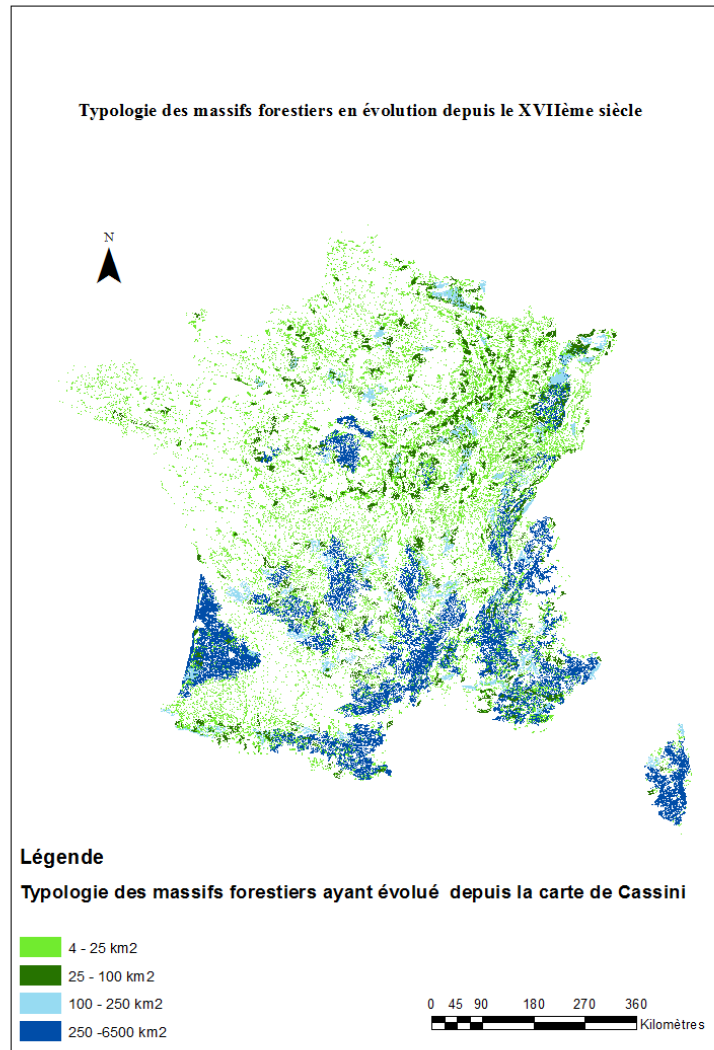


Figure 18 : Typologie des massifs forestiers en évolution depuis le XVIIème siècle

2.3) Interprétation de la carte d'Etat-Major

2.3.1) Projection de points d'échantillonnage

Une fois que ces polygones des différences ont été identifiés, il s'agit de renseigner si oui ou non ils étaient en forêt sur la carte de l'Etat-Major. Or, un polygone de forêt évolue de façon hétérogène, c'est-à-dire qu'il n'apparaît ni ne disparaît d'un seul coup. C'est pourquoi nous devons observer différents points au sein d'un même polygone. Pour ce faire un lancement de points d'échantillonnage est opéré dans tous les polygones de différences générant une carte de points que nous superposerons à la carte d'Etat-Major géo-référencée pour déterminer l'occupation du sol (Figure 19).

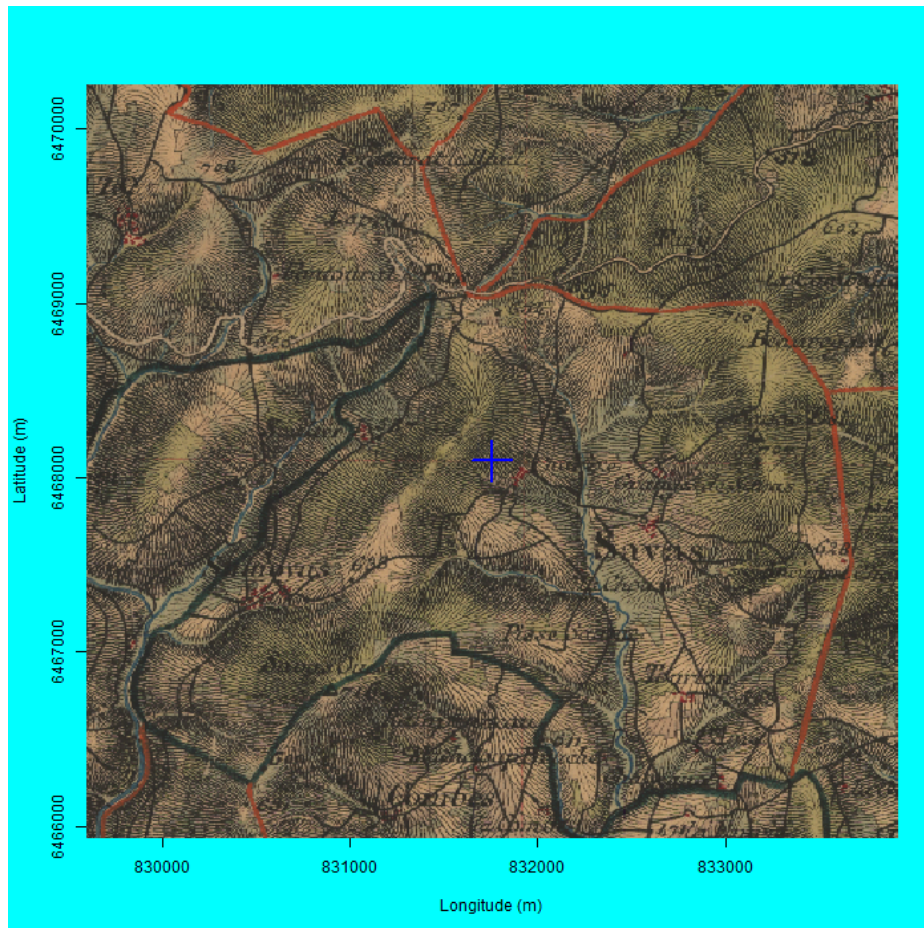


Figure 19 : Exemple de point de forêt sur la carte de l'Etat-Major

2.3.2) Programmation dans R

Le lancement de ces points s'est effectué à l'aide d'un script R. Dans la mesure où il y a plusieurs points par polygone, le nombre de points est plus élevé que celui des polygones. La carte fait état de 153 000 points pour 121 000 polygones. En effet le script propose une densité de points qui est de 1 point par kilomètre carré à l'intérieur du polygone de façon à évaluer toute l'occupation du sol qui peut différer en 1870 au sein d'un seul polygone. Par exemple, un polygone de différence peut, en 1870, être caractérisé par une partie en forêt et un autre non forêt.

2.3.3) Les points en images ; un travail manuel

Chaque point qui correspond à une partie du polygone est isolé dans une image de la carte de l'Etat-Major de manière à indiquer si derrière ce point se trouvait ou non de la forêt en 1870.

Ces 153 000 images sont découpées dans R comme l'exemple ci-dessus. Tout système de reconnaissance automatique ou de télédétection de la forêt sur la carte ancienne étant inefficace, l'occupation du sol a dû être renseignée manuellement, image par image. Les objectifs de ma mission qui se cantonnent aux bassins versants du Nord (Loire, Rhin, Seine, Saône, Meuse, Escaut, Artois et bassin de Bretagne) de la France font que j'ai été amené à traiter 70 000 points en indiquant, dans un fichier Excel, 1 lorsque le point se trouvait sur de la forêt ou 0 lorsque l'occupation du sol était autre. Ces données sur le couvert forestier sont ensuite jointes à la couche des polygones de forêt dont on sélectionnera ceux qui étaient présents en 1870 (Figure 20). Mon stage a donc combiné systématisation informatique et travail manuel.

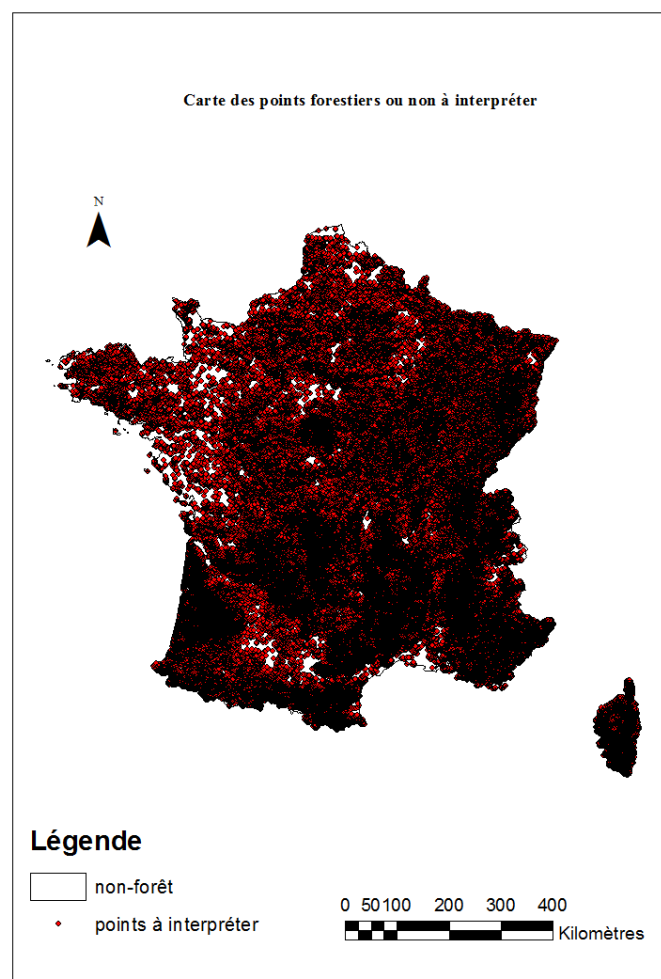


Figure 20 : Carte des points forestiers à interpréter

2.3.4) Sélection des points et calcul des surfaces

C'est en additionnant les surfaces des polygones de forêt en 1870 avec celles des polygones communs établis au début de la mission qu'il est possible d'obtenir une estimation de la quantité de forêt sur le sol français à la fin du XIX^{ème} siècle. Afin de sélectionner les

polygones concernés, il est convenu de mener une requête spatiale : "PTS_des_foret_etat_major_output.Foret" = 1 pour les polygones de différences et "ClcCas" = 1 pour les polygones communs. Cependant, un polygone dont un des points indique la présence de forêt en 1870 doit être observé de plus près. En effet, sur un même polygone de tant de mètres carrés peuvent se trouver plusieurs points qui ne sont pas tous en forêt en 1870. Un même polygone peut ainsi accueillir des points forêts (1) et non forêts (0). Il faut donc découper ces polygones autour des points forestiers selon la méthode des polygones de Thiessen. Cette méthode découpe un polygone en sous polygones autour des points qui s'y trouvent. De là nous pouvons sélectionner plus rigoureusement les points forestiers parmi d'autres points d'un même polygone auquel nous additionnons les surfaces de forêts communes (Figure 21).

Quantité de forêt en 1870 = forêt commun + polygones forestiers des différences

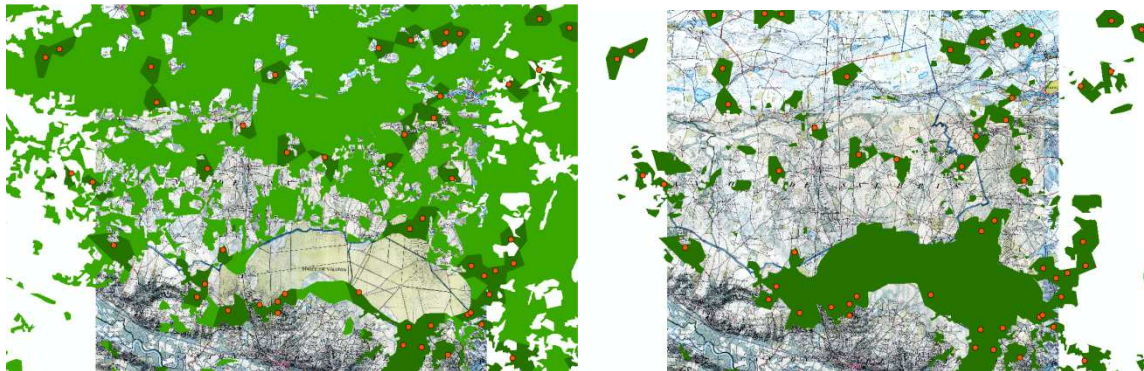


Figure 21 : Polygones de Thiessen en forêt (gauche) et cumul des forêts communes et des polygones de Thiessen (droite)

2.3.5) Département, Région, bassin versant et canton ?

L'évaluation du couvert forestier de la fin du XIX^{ème} siècle est avant tout réalisée à l'échelle départementale pour des questions de visibilité. Mais une cartographie de ces forêts par région et par canton permettrait d'établir des comparaisons avec d'autres sources qui utilisent ces échelles. Ces découpages du massif forestier français s'effectuent par des intersections de la carte forestière de 1870 avec la carte des limites régionales puis cantonales. Une quatrième échelle semble intéressante à valoriser : le bassin versant. Le projet de reconstitution hydrologique invite au découpage de la forêt par grands bassins dans la mesure où les données hydrologiques (débit, précipitation, évaporation) nous sont données à ces échelles. La carte forestière peut à ce moment-là perdre en lisibilité, mais les données quantitatives qui en

résultent sont nécessaires pour spécifier ou non une évolution hydrologique voire climatique à partir des forêts de la fin du XIX^{ème} siècle.

Les différentes échelles choisies pour le découpage des massifs forestiers de la carte d'Etat-major

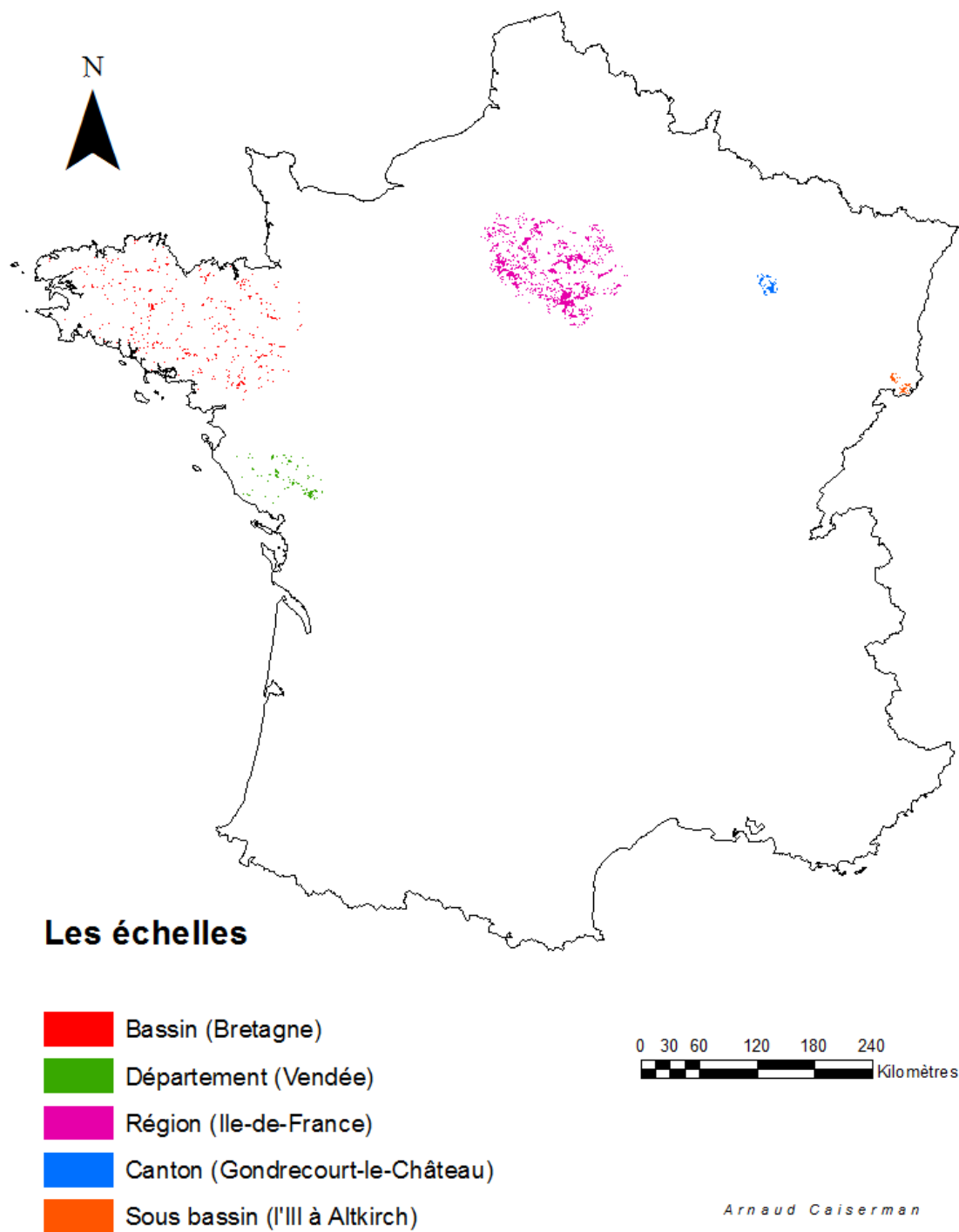


Figure 21 : représentation des différentes échelles choisies pour le découpage des massifs forestiers de la carte d'Etat-Major

PARTIE IV) Résultats et discussions

1) Examen de la méthode

1.1) Résultats

1.1.1) Les cartes et les quantités obtenues

L'interprétation des 70 000 points des bassins du nord de la France et le découpage des polygones de Thiessen ajouté aux massifs de forêts maintenues permettent d'obtenir cette carte du couvert forestier de l'Etat-Major. Les trois cartes présentées les unes à côté des autres à la manière d'une frise chronologique (Figure 22) mettent en évidence les zones où la forêt se densifie d'une période à une autre. Déjà entre la carte de Cassini et de l'Etat-Major, la Sologne, le Massif Central, le Charolais, le Morvan, le plateau de Langres ou encore les Vosges voient leur taux de forêt croître de façon significative. Puis, en observant la carte de l'Etat-Major et celle de Corine Land Cover, nous sommes à-même de comprendre que les plus fortes croissances de la surface forestière en France se sont bien effectuées entre le XIX^{ème} et le XX^{ème} siècle. Des ensembles forestiers vont même jusqu'à symboliser des pays et des reliefs comme les Vosges ou la Sologne qui sont les exemples les plus révélateurs de l'évolution.

Au total, le couvert forestier des bassins du nord de la France représenterait 54 730 kilomètres carrés soit 9% du territoire à la fin du XIX^{ème} siècle et le cadastre napoléonien l'estime à 16% en 1862 sur la totalité du territoire.

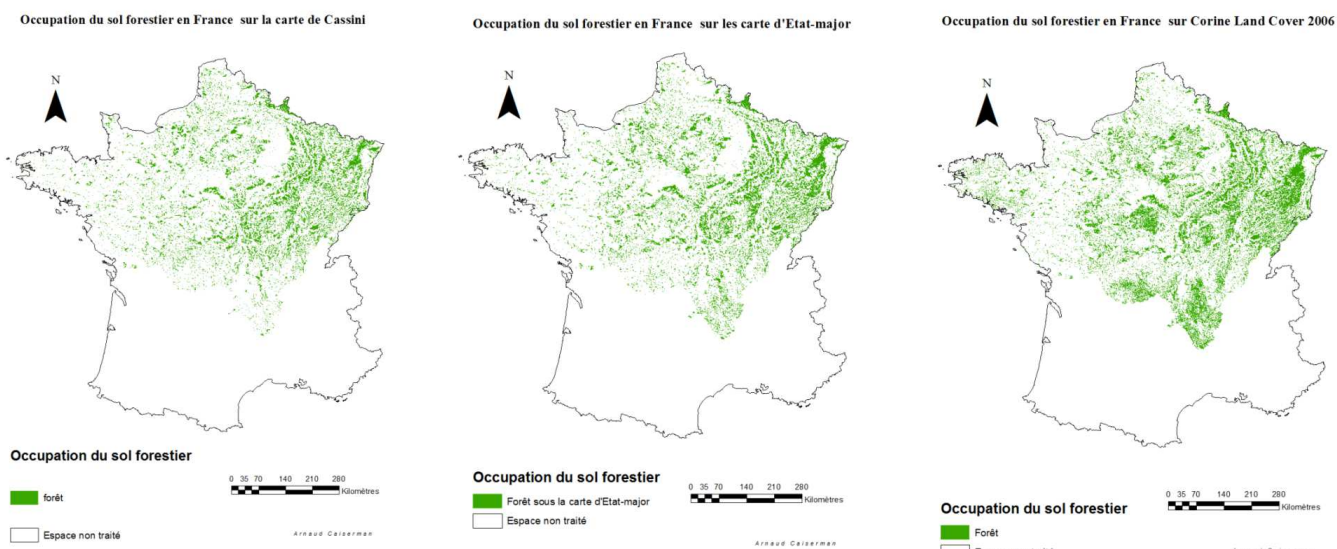


Figure 22 : Evolution de l'occupation du sol forestier (le Sud de la France n'a pas été traité dans ce travail)

1.1.2) Comparaisons avec d'autres sources

Après l'obtention des résultats, nous devons procéder à des comparaisons bien qu'il soit difficile de savoir quelles sources donnent des chiffres très proches de la réalité. Pour commencer, nous comparons nos résultats à ceux de la Grande Enquête décennale de 1862 que Rousseau (1990) mentionne dans son article. La marge d'erreur est de 10,6% à l'échelle des régions qui sont entièrement présentes dans la partie de la France que nous avons traitée. Il n'apparaît pas de très grandes différences à part en Lorraine ou en Franche Comté (Annexe 7), ce qui pourrait être expliqué par les changements de frontières durant la période notamment sur la carte de Cassini qui fait état de frontières différentes de celles d'aujourd'hui, écartant ainsi certains massifs forestiers. Au total, les résultats à l'échelle régionale sont plutôt satisfaisants au regard de la Figure 23, d'autant plus que c'est à des échelles globales que nous souhaitons obtenir des résultats. Les chiffres auxquels Rousseau se réfère évaluent une occupation forestière à 9,08% dans les régions complètes des bassins versants cartographiés et nous l'estimons à 8,91%. Mais lorsque nous nous intéressons à des échelles plus fines, les erreurs sont plus fortes, ce que nous verrons plus loin.

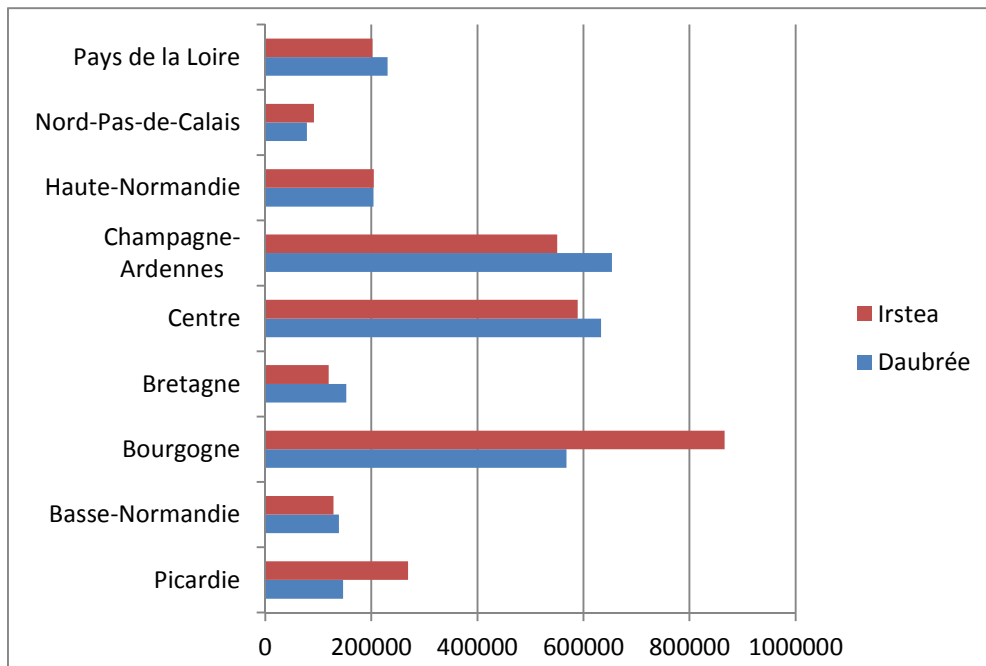


Figure 23 : Comparaison entre les résultats d'Irstea et ceux de Daubrée (1912) à l'échelle régionale

La comparaison s'étend avec les statistiques de Lucien Daubrée à l'échelle départementale, résumée par un graphique en Annexe 5. L'erreur moyenne est de 14% avec des extrêmes de 1% pour l'Orne et 38% pour la Marne. Il s'agirait ici aussi de tenter de savoir en quoi le département de la Marne à la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle est difficile à évaluer. Les combats de la guerre de 1870 peuvent constituer une explication d'autant plus que l'artillerie lourde était déjà développée comme en témoignent les bombardements de Paris par les Prussiens à plus de 50 kilomètres de la ville. Mais ce sont surtout les combats de la première guerre mondiale qui peuvent expliquer ces erreurs d'évaluation. Notre interprétation des points du croisement des cartes de Cassini et de Corine Land Cover surestime le couvert forestier dans la Marne. Des champs de batailles ont pu raser des forêts que l'on a replantées par la suite en augmentant la superficie originelle. Il faudrait donc examiner les histoires forestières de chacun de ces départements qui présentent des résultats très contrastés.

1.2) Discussions

1.2.1) Limites et atouts de la méthode

Après l'exposition des résultats et de leurs comparaisons avec d'autres sources, l'examen de la méthode doit être mené de façon à analyser ses points forts et ses points faibles. Une des méthodes employées par Paris 6 – Metis qui consiste à dessiner à la main chaque massif forestier donne des résultats sûrement les plus proches de la réalité des cartes de l'Etat-Major.

Cette méthode implique un travail très long qui pourrait être raccourci par la méthode d'échantillonnage d'Irstea mais cette dernière méthode peut être contestée en ce qu'elle ne dessine pas fidèlement les massifs forestiers de la fin du XIX^{ème} siècle. Il en résulte des surestimations des quantités de bois. En cause, la précision du dessin des massifs par échantillonnage dépend du nombre de points projetés dans les polygones intéressés dans la mesure où c'est à partir de ces points que les polygones de Thiessen sont tracés. Or, le découpage de Thiessen reste très schématique en traçant des droites entre ces points qui ignorent la sinuosité des lisières de forêts. Ainsi, les polygones de Thiessen laissent en reste beaucoup de surfaces plus ou moins grandes entre la droite du polygone et la lisière telle qu'elle apparaît sur la carte d'Etat-Major (Figure 24).

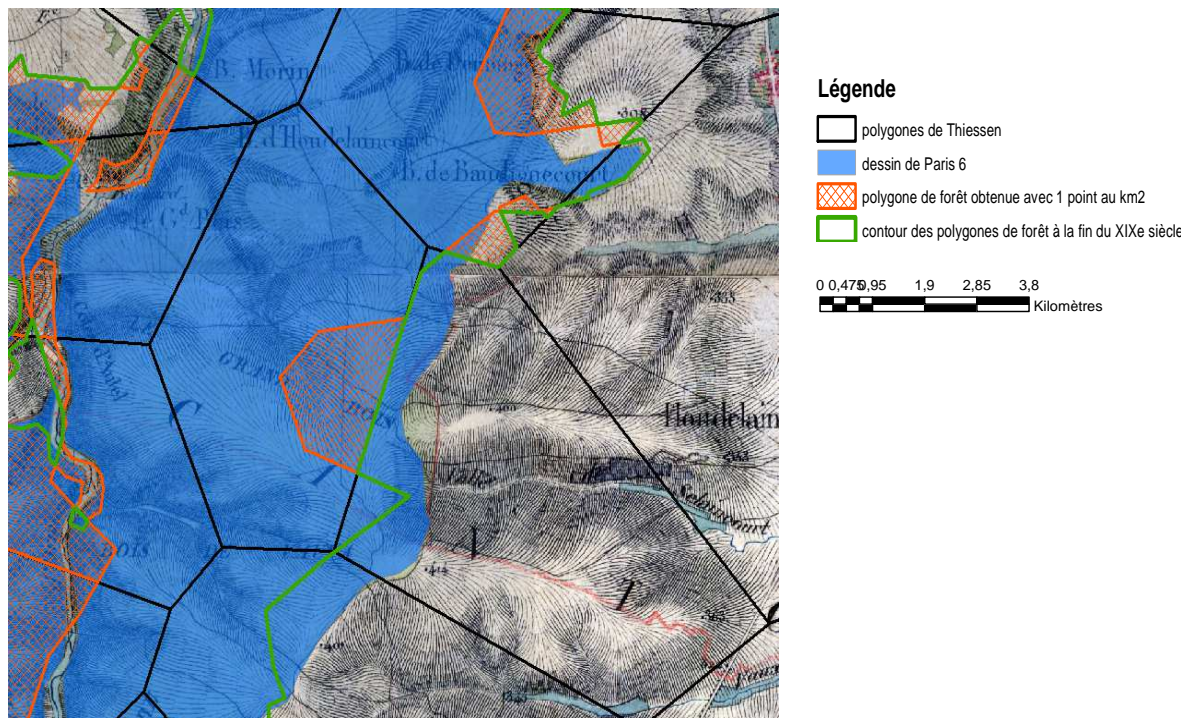


Figure 24 : Exemple du tracé schématique des polygones de Thiessen par rapport au dessin des massifs forestiers

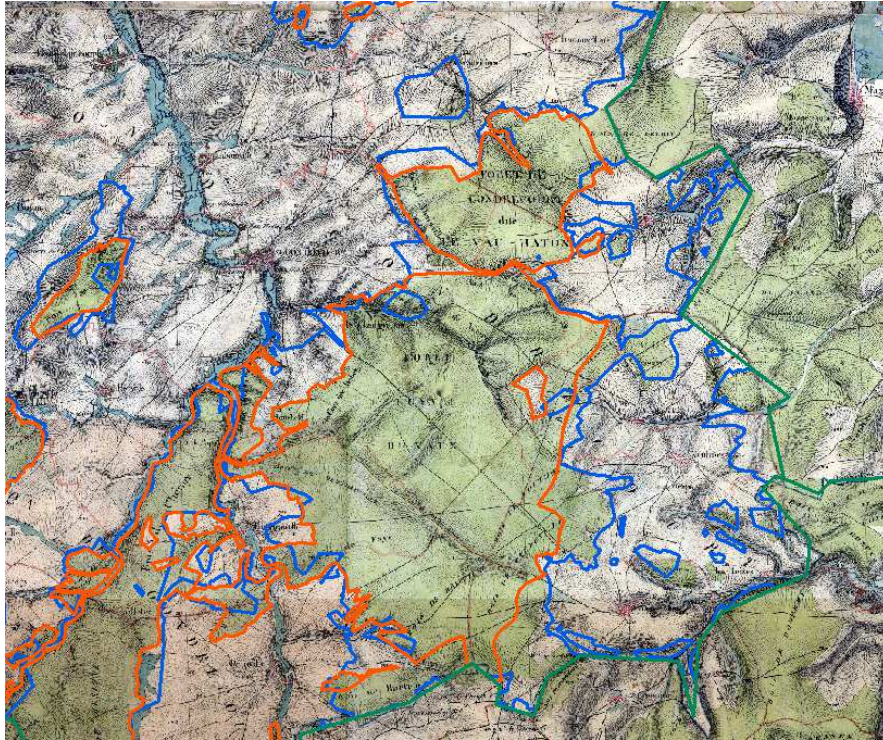
De plus, notre méthode postule que les massifs forestiers qui sont communs entre la carte de Cassini et la carte de Corine Land Cover de 2006 se trouvaient également sur la carte de l'Etat-Major. Ce constat ne fait pas gage de vérité puisqu'un massif présent au XVII^{ème} et au XXI^{ème} siècle sur la même parcelle peut avoir été coupé au XIX^{ème} siècle. Rien ne peut affirmer le contraire et il serait fastidieux de comparer tous les massifs dits « communs » avec la carte d'Etat-Major. Il faudrait projeter de nouveaux points d'échantillonnage sur les massifs communs et les interpréter manuellement avec toutes les erreurs que cela peut comporter.

La typologie surfacique choisie est la dernière limite qui serait à mentionner bien qu'elle dépende de l'échelle à laquelle on s'intéresse. En fixant une taille minimale de 4 kilomètres carrés, nous ignorons un certain nombre de polygones. Mais dans la mesure où nous

cartographions la forêt à des échelles moyennes voire petites, l'oubli de ces petits massifs n'a pas de grandes conséquences sur les résultats. En revanche, si l'échelle est celle du canton, fixer une surface minimale à faire apparaître semble peu pertinent. Il ne faut pourtant pas oublier que la méthode que nous avons employée présente des avantages. Nous l'avons vu, celle-ci permet de gagner du temps par rapport au dessin manuel. Il est donc possible de traiter de larges espaces comme la région en un temps restreint tout en obtenant des résultats satisfaisants (comme l'Ile-de-France, l'Alsace ou le Centre) dont les marges d'erreur après comparaison sont inférieures à 10 %. Les résultats variés que nous avons obtenus avec la méthode d'échantillonnage ne nous permettent pas de la valider ou de l'invalider. Elle peut pourtant être perfectionnée en augmentant le nombre de points d'échantillonnage par polygone.

1.2.2) Nouveaux essais

Il était donc tout indiqué de mener d'autres tests avec plus de points sur de petits territoires afin de renouveler plusieurs essais. Il est d'ores-et-déjà pressenti que plus le nombre de points au kilomètre carré est élevé, plus le travail d'interprétation devient long, de sorte qu'au bout d'un certain nombre de points, il est tout aussi efficace de dessiner les polygones forestiers un à un. Nous avons pris pour exemple le canton de Gondrecourt-le-Château qui a été traité par Paris 6-Metis qui trouve 98 kilomètres carrés de forêt. Nous trouvons 134 kilomètres carrés avec 1 point par kilomètre carré (Figure 25). Nous en trouvons 104 avec 3 points par kilomètre carrés ce qui représente 239 points à traiter contre 100 initialement sur ce canton de 341 kilomètres carrés au total, ce qui réduit l'erreur commise (Annexe 9). Avec 4 puis 6 points par kilomètre carré, nous avons 349 et 496 points à traiter pour un espace relativement restreint. Projeter plus de 3 points serait peu efficace et il reviendrait au même d'opter pour la méthode de Paris 6 — Metis qui consiste en le tracé des contours des blocs de forêts.



Légende :

- Contours selon Paris 6
- Contour selon Irstea (avec 1 point au kilomètre carré)

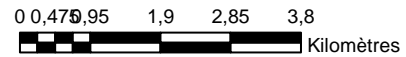


Figure 25 : Contours de la forêt de Gondrecourt-le-Château selon Paris – Metis et Irstea

2) Perspectives

2.1) Ce qu'il reste à faire

2.1.1) Finir la carte

Il resterait à finir la carte des forêts en interprétant les 83 000 points des bassin-versants sud (la Charente, les fleuves côtiers, l'Adour, la Garonne, les fleuves côtiers méditerranéens, les parties françaises des bassins du Rhône et de l'Isère au XVII^{ème} siècle) selon le même nombre de points par kilomètre carré afin d'obtenir des résultats à l'échelle nationale. Nous pourrions poursuivre la comparaison de nos résultats avec d'autres sources et voir s'ils sont trop souvent éloignés ou non des autres sources. C'est à ce moment-là que la méthode peut être validée ou

non en fonction du nombre d'erreur sur toute la France par région par exemple. Il s'agirait ensuite d'adapter le nombre de points dans les espaces où les marges d'erreur sont les plus élevées pour ne pas avoir à réinterpréter tous les points de France.

2.1.2) Projeter des points dans les polygones de forêt maintenue

Afin de gagner en exactitude, il serait indiqué d'évaluer les massifs forestiers que nous avons tenus pour communs, c'est-à-dire présents sur toute la période étudiée du XVII^{ème} siècle à 2006. Mais nous avons vu que rien ne peut affirmer que ces massifs se trouvaient à la fin du XIX^{ème} siècle lors des mises à jours de la carte de l'Etat-Major. Nous pourrions alors projeter de nouveaux points dans ces polygones et procéder à la même méthode d'interprétation en fonction de la carte d'Etat-Major. L'évaluation du couvert forestier en serait plus précise bien que cette étape devrait alors à nouveau être examinée pour savoir si cumuler l'interprétation des points dans les massifs de différences et dans les massifs communs ne serait pas moins efficace que le dessin des polygones forestiers.

2.2) Pour aller plus loin

2.2.1) Reconstitution hydrologique

Enfin, il serait intéressant de connaître les données hydrologiques du XIX^{ème} siècle des sous-bassins versants pour lesquels nous avons calculé la corrélation entre le taux de boisement actuel et les résidus de la différence entre le débit observé et le débit simulé. La corrélation entre les données hydrologiques du XIX^{ème} siècle et le taux de boisement de l'époque pourrait être recalculée. Il faudrait ensuite comparer la corrélation actuelle avec l'ancienne pour voir s'il existe deux relations tout à fait différentes entre l'eau et la forêt en fonction du siècle. De là, nous commencerions à approcher le tenant hydrométéorologique du projet en soulignant au moins des évolutions dans les comportements des corrélations entre eau et forêts au XIX^{ème} ainsi qu'au XXI^{ème} siècle.

2.2.2) Observer les effets des sols autrefois agricoles sur la forêt d'aujourd'hui

Pour aller au-delà de de la reconstitution hydrologique, nous pourrions nous demander si la forêt exerce une influence plus importante ou non sur le cycle de l'eau lorsqu'elle se trouve actuellement sur d'anciens sols cultivés dont nous avons fait la description au début de l'étude. L'apport d'engrais, l'intensification des activités microbiologiques, ainsi que la profondeur des couches superficielles pourraient influencer les comportements hydrologiques, au moins du point de vue des transferts de nutriments des sols vers les eaux. En renouvelant

alors le calcul avec le modèle de Turc, peut-être pourrions-nous constater un rôle plus ou moins significatif de la forêt en fonction de son ancienne occupation du sol. Il faudrait pour cela déterminer si tel ou tel massif forestier dit récent était autrefois occupé par des terres agricoles en comparant la carte de Corine Land Cover et celle de l'Etat-Major.

Conclusion

La méthode proposée lors ce stage est intéressante puisqu'elle fournit des résultats parfois bigarrés, mais souvent bons tout en s'économisant le long travail de dessin des massifs forestiers. Les sources et les autres documents dont nous nous sommes servis sont riches et nous ont permis d'évaluer la qualité de nos résultats, bien qu'ils soient très souvent entâchés d'inexactitudes et d'une ancienneté parfois handicapante. Nous ne sommes donc pas à-même de revendiquer notre carte des forêts de l'Etat-Major comme détentrice de la vérité. Le terme « d'estimation » serait ici plus exact.

Il demeure également que ce travail a été une occasion pour soulever une question essentielle à l'hydrologie mais pas tout à fait élucidée qu'est la relation entre l'eau et la forêt. La relation existe mais il serait passionnant de rechercher des données hydrologiques sur la période que nous avons traitée. Nous pourrions corrélérer le taux de forêt et les résidus du modèle de Turc, mais aussi les précipitations par rapport au couvert forestier d'un bassin. Une comparaison très intéressante à mener serait celle entre un même bassin avec un taux de forêt quasiment sans évolution entre le couvert forestier du XIX^{ème} et celui du XXI^{ème} siècle. Si une différence apparaît dans la corrélation des résidus sur le taux de boisement entre ces deux périodes, une explication climatologique est à mobiliser. Le projet prendrait alors son sens le plus complet en tirant des conclusions autres que géographiques de la carte forestières de l'Etat-Major.

Du reste, mon expérience au sein de l'unité de recherche HBAN a été riche et très instructive pour m'avoir donné un aperçu de ce qu'est la recherche en hydrologie. En tant qu'étudiant en géographie, il était très intéressant de m'immiscer dans l'hydrologie qui est une science très appliquée et concrète de laquelle je souhaite me rapprocher. En outre, j'ai pu acquérir des connaissances sur la forêt, quelques-uns de ses fonctionnements et sur ses quantités passées, la forêt étant un domaine auquel j'ai rarement été confronté au cours de mon cursus de géographie.

Ce sont aussi les rencontres que j'ai pu faire avec les scientifiques de HBAN qui ont plus qu'enrichi mon stage. Echanger avec eux sur leurs parcours, leurs orientations futures, les possibilités qui s'offrent à eux aujourd'hui et surtout leurs sujets d'études a fait de ce projet une expérience unique. Je ressors donc de ce stage mieux informé que je ne l'étais sur ce

qu'est l'hydrologie et son univers professionnel. Surtout, les problématiques que j'ai abordées, plus ou moins directement liées avec le couvert forestier de 1870, n'ont fait que stimuler mon enthousiasme pour l'hydrologie et la géographie.

Bibliographie

- Andréassian, V. (2001), *La controverse sur le rôle hydrologique des forêts en France au XIXe siècle*, Cemagref, 13 p.
- Bailly A., Gould P., (1995), *Le Pouvoir des cartes, Bryan Harley et la cartographie*, in « Cartes, savoir, pouvoir », Paris : Economica, pp 285-286.
- Bernard-Alain J-M., Robic M-C., (1996) *La géographie et cinq siècles du rapport homme/nature*, in « Revue de géographie alpine », , vol. 84, n° 1, pp 71-74.
- Cinotti, B., (1996), *Evolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle*, in « Revue forestière française », n° 48, pp 547-562.
- Corvol, A., (2011), *Forêts et Paysages du Xème au XXIème siècle* (CNRS Paris), Harmattan, 448p.
- Cosandey, C., (1995), *La Forêt réduit-elle l'écoulement annuel ?*, in « Annales de Géographie », n° 581-582, pp 7-25.
- Daubrée, L., (1908-1912), *Statistique et Atlas des Forêts de France*, in « Tome I et II », Paris : Imprimerie Nationale, 387 p.
- Decocq, G., (2012), *Biodiversité et fertilité selon l'ancienneté de l'état boisé*, Université de Picardie Jules Verne. Consulté le 16 juin 2014 à http://www.ign.fr/institut/sites/all/modules/pubdlcnt/pubdlcnt.php?file=/institut/sites/all/files/presentation_decocq.pdf&nid=727
- Dupouey, JL, (2007), *Vers la réalisation d'une carte géo-référencée des forêts anciennes de France*, CFC n°191 ; pp 85-98.
- Favre, C., Granier, E., Cosserat-Mangeot, R., Bachacou, J, Dupouey, J-L., (2011), *Digitalisation des cartes anciennes, Manuel pour la vectorisation de l'usage des sols et le géoréférencement de la carte d'État-major*. INRA, Nancy, 40 p.
- Gaumet, F., Francisque, E., (1880), *Traité de topographie*, Bibliothèque nationale de France ; 428 p.
- HUFFEL, G., (1920), *Économie forestière*, in « Deuxième édition. tome 1 et , 2 », Paris : Éd. Librairie agricole de la Maison rustique, pp 242 et suiv.

IGN, Le mémento Édition 2013, Inventaire Forestier, consulté le 3 Juillet 2014 à <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?article583>

Koerner, W., Cinotti, B., Jussy, J.H., Benoît, M., (2000), *Evolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIXe siècle : identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés*, in « Revue Forestière Française », 52 (3), pp 249-269.

Koerner, W., Benoît, M., Dambrine, E., Dupouey, J.L., (1997), *Influence des anciennes pratiques agricoles sur la végétation et les sols des forêts reboisées dans le Massif Vosgien*, INRA , 8 p.

La loi circulaire n°18 du 25 avril 1821 de Siméon, Ministre de l'intérieur, sous Louis XVIII.

Leroy, R., (1953), *L'emploi des statistiques forestières dans les monographies*, in « Revue de géographie alpine » , Vol 41, n°41-4, pp 629-666.

Olsson, G., (2007). *Abysmal : A Critique of Cartographic Reason*. Chicago: University of Chicago Press, 553 p.

Poncet, A., (1981), *Interactions forêts et climats*, in « Mélanges offerts à Ch. P. Peguy », Gap, 1981 – pp 445-462.

Rousseau, P., (1990), *L'Evolution des forêts françaises métropolitaines d'après les statistiques forestières*, in « Revue forestière française », Vol. 42 n° 1, pp 56-65.

Surell, A., (1841), *Etude sur les torrents des Hautes-Alpes ; Carilian-Goeury et Victor Dalmont*, Paris, 283p.

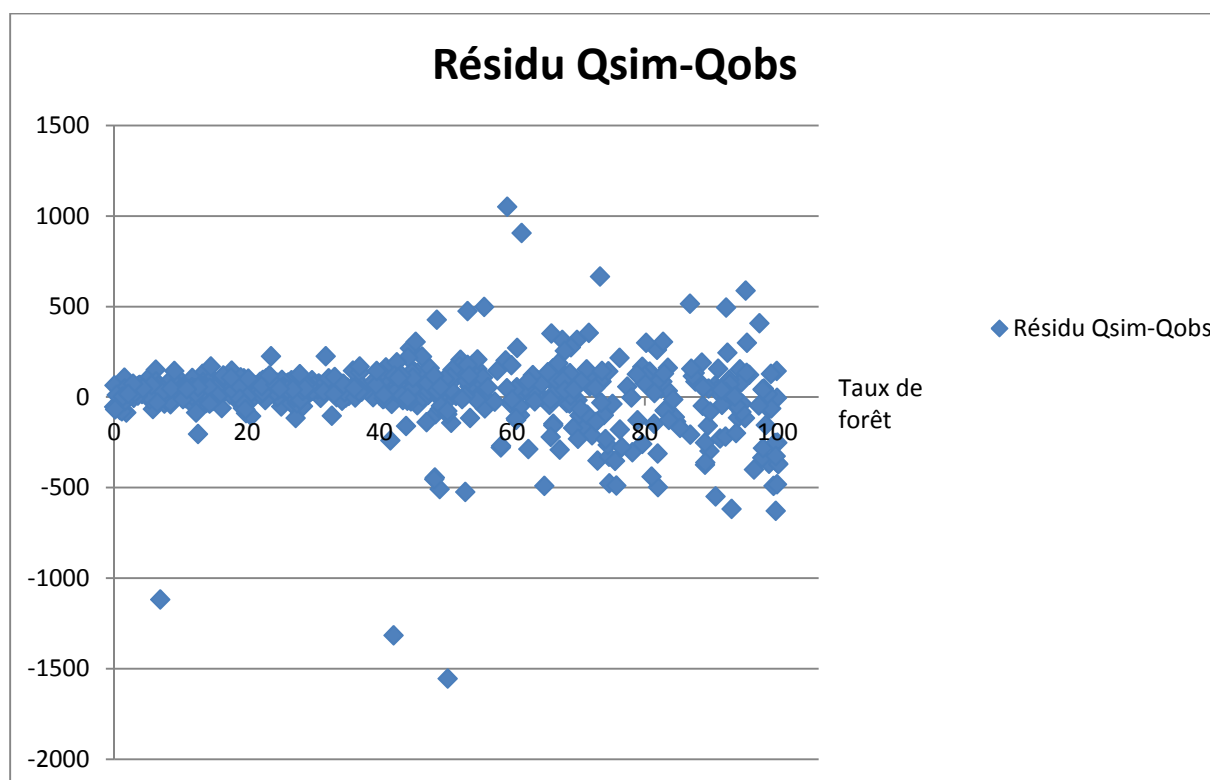
Vallauri, D., Grel, A., Granier, E., Dupouey, J.L., (2012), *Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles*, Rapport WWF/INRA, Marseille, 64 p.

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.-M., (2010), *A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system*, in « International Journal of Climatology », 30 (11), pp 1627-1644.

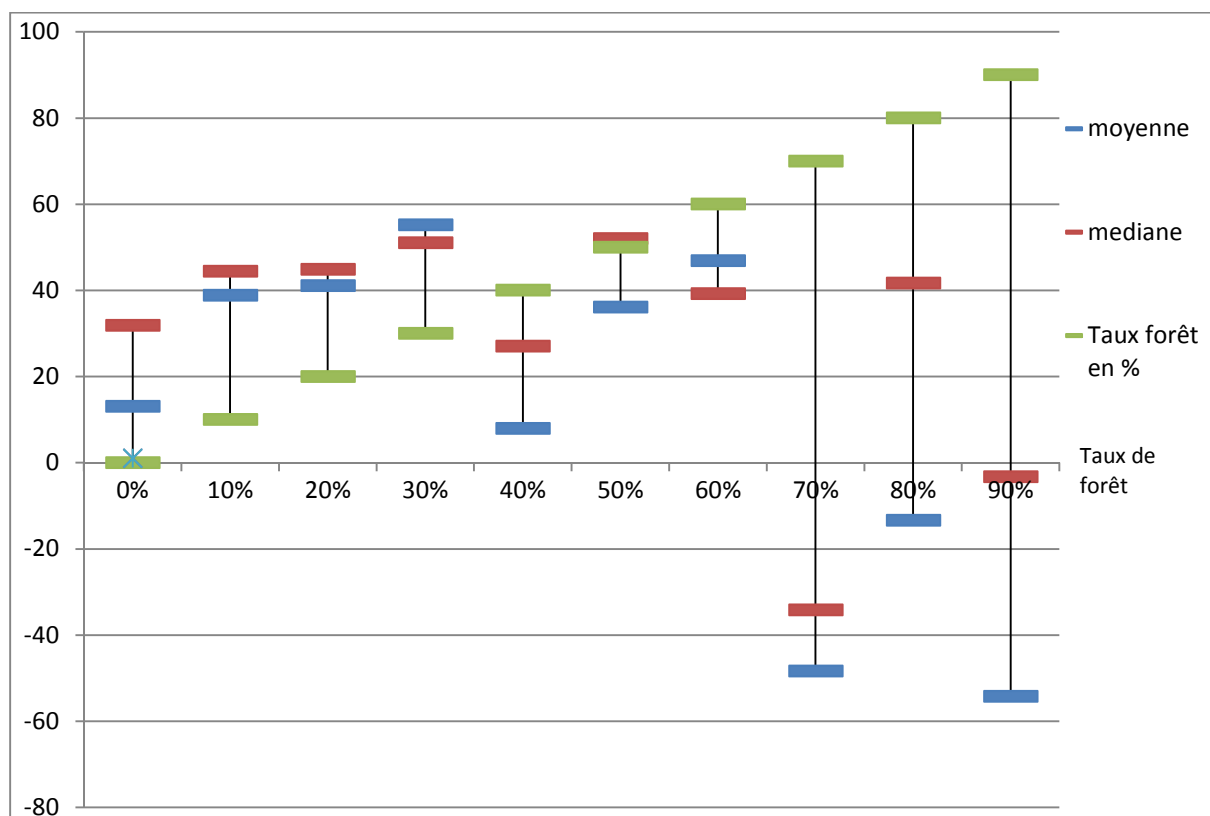
Young, A., 1788. — *Voyage en France*. Trad. Henri Sée. — Tome II, 1, pp. 843-853.

Annexes

Annexe 1 Figure 4 : Erreurs de simulation du modèle de Turc en fonction du taux de couvert forestier pour 600 bassins français

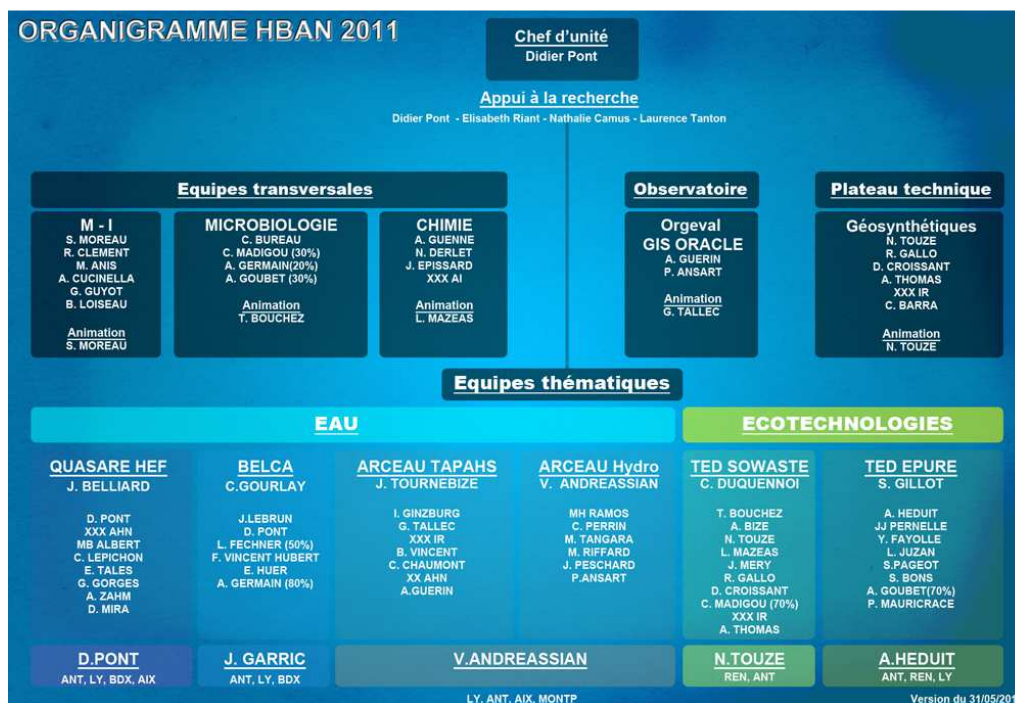


Annexe 2 : Figure 5 : Boîtes à moustaches sur la corrélation des résidus du modèle de Turc par rapport au taux de forêt

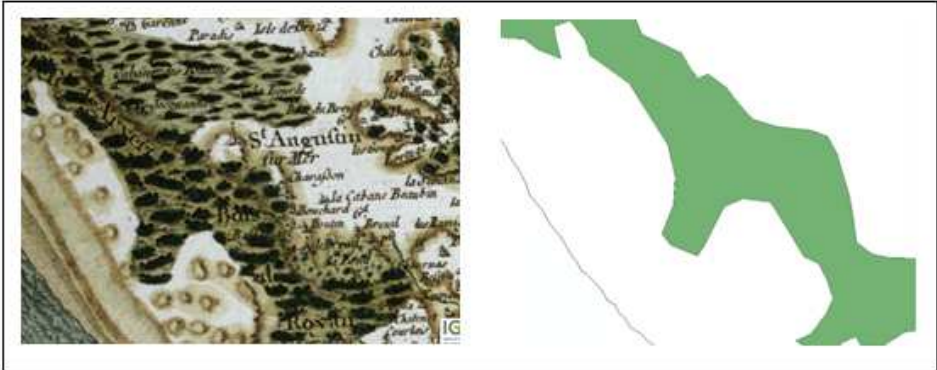


Annexe 3 : Organigramme de l'unité de recherche HBAN à Irstea Antony.

Animateur	Scientifiques	Doctorants	Ingénieurs contractuels
Charles Perrin	Vazken Andréassian Olivier Delaigue Carina Furusho Maria-Helena Ramos Guillaume Thirel	Louise Crochemore Andrea Ficchi Laure Lebecherel Carine Poncelet	François Bourgin Pierre Brigode David Brochart Laurent Coron Florent Lobligeois Pierre Nicolle



Annexe 4 : Vectorisation des massifs forestiers de la carte de Cassini.

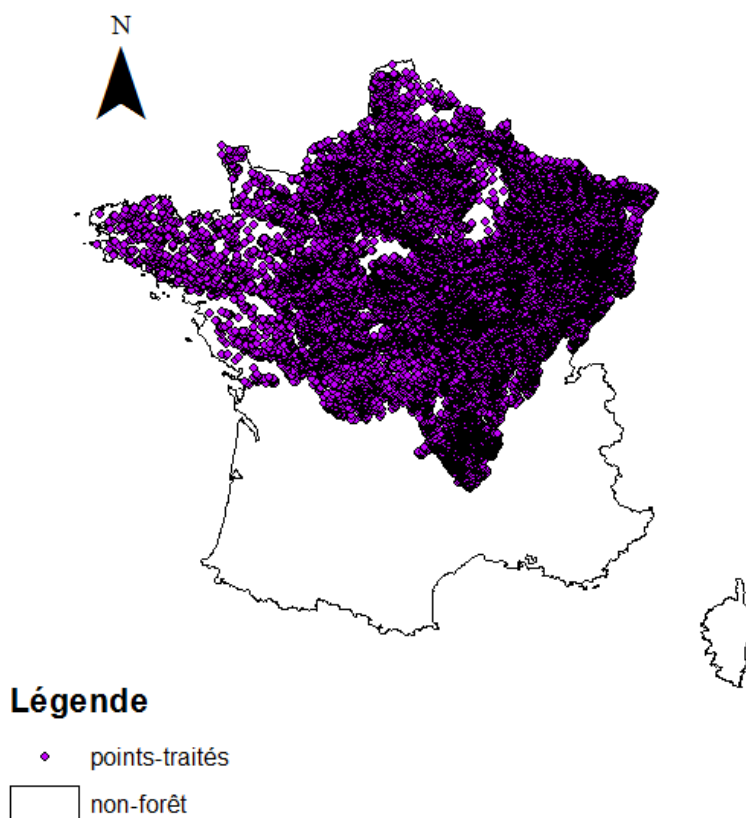


Annexe 5 : Figure 10 : Figurés de forêt dans la carte de Cassini

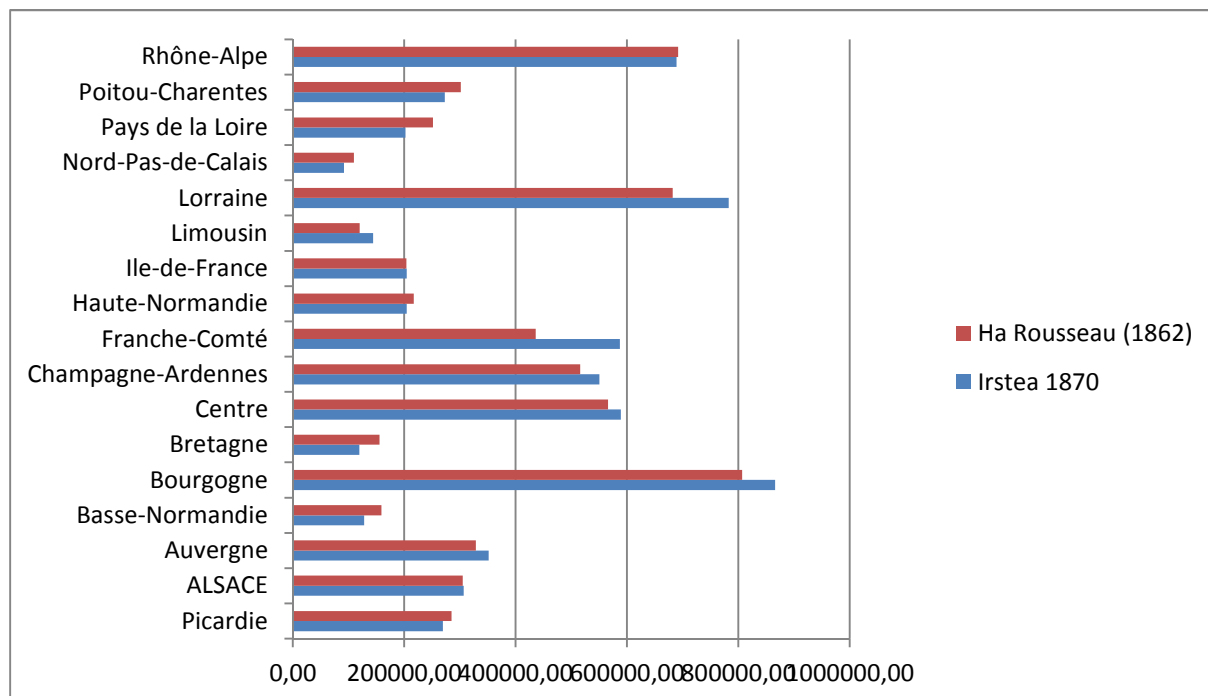


Annexe 6 : Carte des points traités

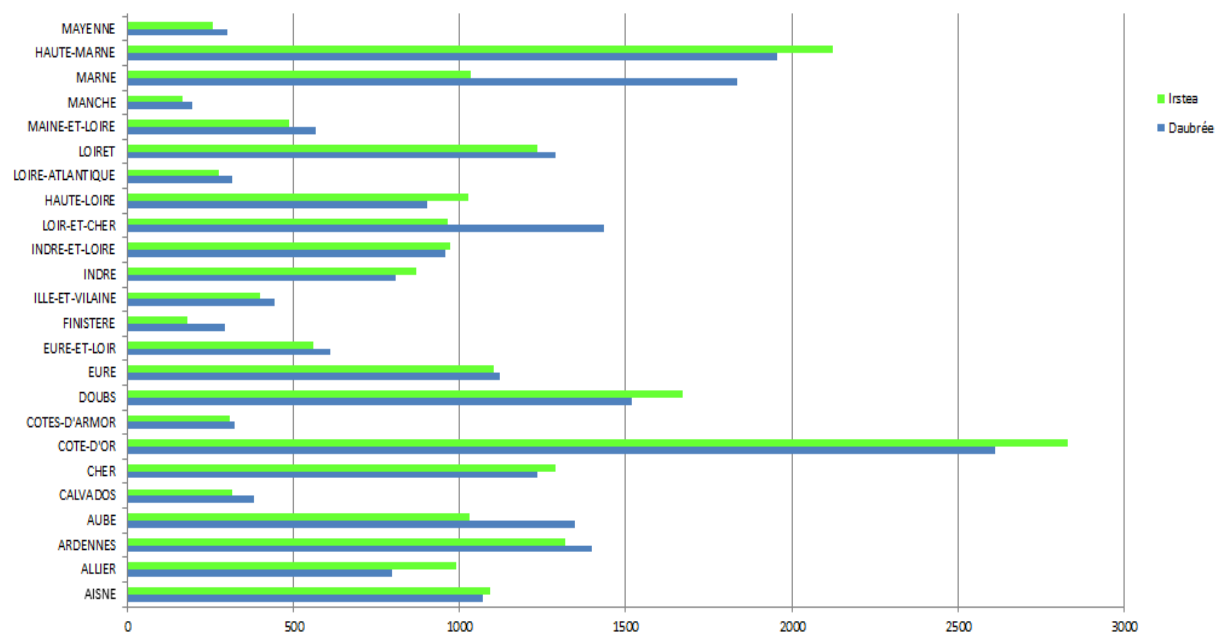
Points traités (bassin de la Seine, de la Saône, de la Bretagne, de la Meuse, du Rhin et de ses affluents, de la Picardie et de la Loire)



Annexe 7 : Comparaison des résultats d'Irstea avec l'Enquête décennale de 1862



Annexe 8 – Comparaison entre les résultats de Irstea et ceux de Daubrée à l'échelle départementale



Annexe 9 – Comparaison des marges d'erreur entre 3 et 1 un point par kilomètre carré.

