



Programme GIP-Ecofor "Biodiversité et gestion forestière"

Variations de la biodiversité forestière résultant des pratiques agricoles passées : importance spatiale et mécanismes de maintien



Coordinateurs scientifiques:

Jean-Luc Dupouey & Etienne Dambrine INRA-Nancy

Rapport final – v. 2

Septembre 2004



SOMMAIRE

Participants du projet	3
1 - Rappel des objectifs du projet :	5
2 - Résultats	6
2.1 - Occupations agricoles modernes et antiques des forêts actuelles	6
2.2 - Variations actuelles de biodiversité associées à ces occupations anciennes	10
2.3 - Interaction entre type de sylviculture et maintien des différences de végétation à long terme : l'exemple de la conversion en futaie en forêt de Saint-Amond	
2.4- Les modifications des sols, conservateurs de la biodiversité	20
2.5 - Mécanismes de maintien des différences de diversité en fonction de l'utilisation ancienne 2.5.1 - Relation entre l'utilisation ancienne et la structure génétique des populations de Vinc	a minor.
2.5.2 - Mécanismes de maintien à long terme de la fertilité des sols anciennement cultivés $2.5.2.1$ - Analyse du $\delta^{15}N$ de la rhizosphère de plantes herbacées : effets de l'espèce et de l'hist l'utilisation ancienne des sols $2.5.2.2$ - Diversité fonctionnelle de la microflore bactérienne rhizosphérique associée à la flore et relation avec les usages antiques des sols $2.5.2.3$ - Relation entre la croissance de plantes herbacées différant par leurs exigences écolog microflore rhizosphérique et l'excrétion de carbone $2.5.2.4$ - Signification écologique du $\delta^{15}N$ des espèces forestières.	24 oire de 24 e herbacée 25 iques, la 28
3 – Perspectives scientifiques	
3.1 - Analyse spatiale et extension des occupations antiques	30
3.2 - Relation entre biodiversité et utilisation ancienne. Mécanismes d'apparition et de maintien	31
4 – Acquis et perspectives en termes de transfert	31
4.1 - Nécessité de la prise en compte de l'histoire dans la gestion des forêts	31
4.2 - Mise en œuvre concrète d'une meilleure prise en compte de l'histoire dans la gestion forestie - Epoque moderne - Epoques anciennes	32
5 – Articles cités dans le texte	33
6 - Valorisation des résultats	34
6.1 - Articles dans des revues à comité de lecture	34
6.2 - Communications à des colloques	35
6.3 - Publications de congrès et chapitres d'ouvrages	37
6.4 - Rapports d'études	38
6.5 - Mémoires d'étudiants	38
6.6 - Enseignement	39
6.7 - Vulgarisation	39
6.8 - Médias	39

Annexe I : Occupation ancienne du sol et milieux forestiers actuels, en France métropolitaine – Synthès bibliographique	
Annexe II : Legacies of Roman agriculture on present forest biodiversity	. 8 1
Annexe III: Microbial activity and abundance in the rhizosphere soil of seven herbaceous species cultivated under controlled conditions: relationships with plant growth and root C concentrations	. 89
Résumé	98

Participants du projet

Coordinateurs scientifiques:

Jean-Luc Dupouey

UMR INRA-UHP Ecologie et écophysiologie forestières Centre INRA de Nancy, 54280 Champenoux tél.: 03 83 39 40 49

courriel: dupouey@nancy.inra.fr

Etienne Dambrine

Unité Cycles Biogéochimiques Centre INRA de Nancy, 54280 Champenoux tél.: 03 83 39 40 71

courriel: dambrine@nancy.inra.fr

Participants:

Rémy J. Petit, Erwan Guichoux, Marie-Hélène Pemonge et Delphine Audigeos

UMR Biogeco, INRA, 33612 Cestas courriel: petit@pierroton.inra.fr

Pascale Klett, Jean Garbaye et Nora Boussouel

UMR INRA-UHP « Interactions Arbres/Micro-organismes », Centre INRA de Nancy, 54280 Champenoux

courriel: klett@nancy.inra.fr

Jean Bachacou et Régine Cosserat

UMR INRA-UHP Ecologie et écophysiologie forestières, Equipe SIG Centre INRA de Nancy, 54280 Champenoux

courriel: bachacou@nancy.inra.fr

Murielle Georges-Leroy, DRAC, Service Archéologie, 6 place de Chambre

57045 Metz cedex

courriel: murielle.leroy@culture.gouv.fr

Jean-Denis Laffite, Inrap, 12 rue Méric, 57063 Metz cedex 02

courriel: archeolaffite@tele2.fr

Laure Laüt, archéologue, 40 Avenue d'Italie, 75013 Paris

courriel: llaut@club-internet.fr

Anne Maussion, archéologue, 10 rue Lautiez, 75017 Paris

courriel: triangle@magic.fr

Bernard Prévosto et Thomas Curt, CEMAGREF

UR Agriculture et Forêt Méditerranéennes

Le Tholonet, BP 31, 13612 Aix-en-Provence cedex 01

courriel: bernard.prevosto@cemagref.fr

Christophe Nguyen, INRA-ENSAIA, UMR Agronomie-Environnement

54505 Vandoeuvre les Nancy

courriel: christophe.nguyen@ensaia.inpl-nancy.fr

Michel Thinon, Institut méditerranéen d'Écologie et de Paléoécologie

Case 461, FST Saint-Jérôme, Université d'Aix-Marseille III

13397 Marseille cedex 20

courriel: michel.thinon@univ.u-3mrs.fr

Appui technique et étudiants :

Nous remercions vivement les nombreuses personnes qui nous ont appuyées lors des relevés de terrain ou des analyses de laboratoire, et tout particulièrement Patrick Behr et Benoît Pollier. Les relevés des parcellaires gallo-romains en forêt de Haye ont été en très grande partie réalisés par Philippe Loué de l'ONF. Ont participé aux campagnes de fouilles sur les plateaux calcaires de Lorraine : Anne Poszwa, Séverine Bienaimé, Serge Didier, Vincent Badeau, Bernt Zeller, Gilles Nourisson, François Gérémia, Christian Kieffer, Jean-Pierre Renaud. Nous remercions aussi Yves Lejean de l'ONF de Moulins pour son accueil.

De nombreux étudiants ont apporté une contribution décisive à ces travaux. Ceux qui ont rédigé un mémoire dans ce cadre sont indiqués dans le chapitre 5, « Valorisation des résultats », de ce rapport. Nous tenons à remercier de plus Marie Tachon, Lucie Bourlon, Gilliane Vergnerie, Jean-François Blot, Julie Peinado, Virginie Leroy, Xavier Leguyader, Cyril Casanova et Manon Cabanis pour leur participation à la phase de terrain en forêt de Tronçais.

1 - Rappel des objectifs du projet :

Ce projet fait suite au précédent projet: "Incidence des pratiques agricoles passées sur la biodiversité spécifique en milieu forestier dans l'Est de la France", dans lequel nous avons montré que l'usage ancien des sols forestiers à des fins agricoles engendrait des variations des propriétés des sols et de la composition de la végétation herbacée, qui pouvaient perdurer pendant de très longues périodes, voire être irréversibles à l'échelle historique (Dambrine et Dupouey 2000). Outre l'intérêt scientifique évident de ces résultats, ce travail a des implications très directes pour le gestionnaire. D'une part, dans la mesure où la composition floristique de la végétation est l'outil utilisé pour bâtir les catalogues de station, les déterminismes écologiques de ces variations doivent être connus. D'autre part, cette connaissance permet de raisonner la valeur patrimoniale de la biodiversité forestière.

Le présent projet vise à :

- (1) **Produire des synthèses cartographiques** à différentes échelles d'espace sur l'**occupation ancienne** des territoires actuellement forestiers **et** sur les **variations de biodiversité** qui lui sont associées.
- Cartographie exhaustive des occupations anciennes et étude de leur relation avec la biodiversité forestière à l'échelle de grands massifs forestiers dans des conditions climatiques et surtout édaphiques contrastées (massif de Haye, massif de Saint-Amond, massif de Tronçais). Les études menées dans le projet précédent s'étaient focalisées sur un nombre très limité de sites, et les plans d'échantillonnages utilisés visaient avant tout à décrire la variabilité intra-site en relation avec les usages, menant ainsi à la comparaison de pseudo-réplicats. Nous nous sommes attachés cette fois à multiplier les sites dans chaque massif étudié. Dans le cas du massif de Saint-Amond, nous nous sommes de plus focalisés sur l'impact de la sylviculture sur la conservation des traces de l'agriculture ancienne, en comparant de ce point de vue deux systèmes sylvicoles très différents, le taillis sous futaie et la futaie.
- Synthèse à l'échelle française des travaux anciens et des prospections en cours sur les occupations humaines en forêt, en particulier gallo-romaines : quelle est l'importance réelle de ces occupations anciennes dans le paysage forestier français actuel ?
- (2) Progresser dans la compréhension des mécanismes de maintien des différences de biodiversité floristique issues d'un usage agricole d'époque gallo-romaine. Deux grands mécanismes ont été étudiés.
- L'influence à très long terme de l'agriculture antique *via* les modifications du sol et *via* les changements de flore et de microflore sur la disponibilité de l'azote dans les sols. La technique de dilution isotopique a été appliquée pour mesurer la minéralisation et l'immobilisation brute d'azote. Des expériences de traçage isotopique du prélèvement minéral ont été effectuées en utilisant des litières marquées en forêt. Enfin des mesures de minéralisation et de diversité métabolique et fonctionnelle de la microflore des sols rhizosphériques ont été parallèlement effectuées sous des espèces ligneuses et herbacées couvrant une large gamme d'exigences écologiques (acidiphiles à neutro-nitrophiles) pour évaluer comment la plante, une fois installée, oriente éventuellement les processus édaphiques à son profit.
- La vitesse de dispersion et la démographie des espèces herbacées indicatrices de forêts non perturbées et de forêts perturbées par l'agriculture ancienne. L'hypothèse a été souvent émise que le maintien ou l'absence de certaines espèces dans les sites anciennement cultivés serait dû non pas seulement à des modifications des sols, mais aussi au pouvoir de dissémination très limité, voire nul, de ces espèces. Ceci pourrait expliquer pourquoi, lorsqu'on introduit artificiellement une espèce dans le milieu où elle est absente, on observe très souvent qu'elle s'y développe parfaitement. Nous avons décidé d'aborder ce problème par l'étude de la structure génétique d'une espèce indicatrice des emplacements gallo-romains, la pervenche (*Vinca minor* L.). Cette espèce forme de larges taches, plus ou moins morcelées, autour des sites gallo-romains. Notre objectif initial était, par une double action de cartographie génétique des clones et par une estimation de la vitesse de croissance moyenne de l'espèce, d'estimer l'âge possible de chaque tache.

Ce projet a donné lieu à de multiples travaux, qui sont aujourd'hui à divers stades d'achèvement. On trouvera une liste exhaustive des publications déjà réalisées en fin de ce rapport.

Nous présentons ici une brève synthèse de ces résultats déjà publiés, ainsi qu'une partie des résultats encore en cours d'analyse ou de publication. Dans ce dernier cas, les auteurs sont indiqués.

2 - Résultats

2.1 - Occupations agricoles modernes et antiques des forêts actuelles.

Le tableau I fournit une synthèse des travaux entrepris dans différentes régions, pour le présent projet et en comparaison avec nos autres travaux. Dans les Vosges, ce sont 16 fermes replantées en épicéa en 1900-1920 qui ont été étudiées ainsi qu'un systèmes de chaumes, décrivant l'utilisation ancienne de la montagne. Dans le Massif Central et dans le Jura, ce sont des parcellaires agricoles ou pastoraux à l'écart des villages, abandonnés en 1950 et 1900 respectivement, et librement colonisés par la végétation forestière. Dans les régions précédentes, ces plantations ou accrus représentent entre 50% et 100% du paysage forestier actuel. En Lorraine et dans le Limousin, dans les forêts de Haye, de Saint-Amond et de Tronçais, ce sont d'immenses parcellaires antiques ou des semis de bâtiments agricoles ou artisanaux isolés, utilisés à l'époque gallo-romaine et abandonnés entre le IIème et le IVème siècle après JC qui ont été étudiés. Toutes ces utilisations anciennes ont été identifiées par prospection à pied associée à des recherches historiques (Koerner et al. 2001) ou des fouilles archéologiques (Laüt 2000, 2001; Laffite 1998, 2002, Laffite et al. 2000, 2002; Georges Leroy et al. 2003). L'inventaire préliminaire des sites archéologiques en forêt, mené par une archéologue sous contrat (Maussion 2003, présenté en annexe I) en utilisant la base de données archéologique des DRAC a fourni une première esquisse de l'importance spatiale de ces sites. Mais cet inventaire est très partiel en raison de l'inadaptation des bases de données, de leur degré très variable de mise en forme, et du manque d'accès direct. Néanmoins les exemples de régions comme la Lorraine, le Limousin, la région Parisienne ou la Normandie, où des politiques actives de prospection ont été menées, suggèrent que les grands massifs forestiers anciens non occupés à l'époque gallo-romaine sont rares. En forêt de Tronçais, Laüt (2001) comptabilise maintenant 108 sites gallo-romains (cf. Annexe II) dans ce massif de 10.000 ha pourtant souvent qualifié de "forêt immémoriale"... L'analyse sous SIG de la répartition géographique des sites dans le paysage montre que les zones les plus acides et les plus hydromorphes sont sous-représentées et la situation topographique de bord de plateau est privilégiée (Bourdet 2000). L'occupation est maximale au II^{ème} siècle et se poursuit jusqu'au III^{ème} siècle le plus souvent, plus rarement jusqu'au IV^{ème} (17% de sites). En outre, 4 sites ont livré du matériel du Haut Moyen-Age (V^{ème}/IX^{ème} siècle ?). Les sondages archéologiques (Laüt 2001) et palynologiques (Richard 2003) et des inventaires anthracologiques de sols (Humbert 2003) suggèrent des occupations agricole et artisanale de clairière, dans une ambiance toujours forestière.

En forêt de Haye (figure 1), le parcellaire agricole ancien occupe près de 60% de l'ensemble de la forêt. Les murs et les terrasses représentent un linéaire de plus de 150 km. 32 km de voies sillonnent cet ensemble, dont deux voies gallo-romaines majeures. Les sondages palynologiques n'ont encore pu fournir de renseignements permettant de comprendre le mode de mise en valeur, et la chronologie exacte de la colonisation et de l'abandon. Cependant, les prospections de surface et les sondages réalisés par Murielle Georges-Leroy et Jean-Denis Laffite ont permis de trouver un abondant mobilier, permettant de dater l'occupation gallo-romaine du début du I^{ier} siècle jusqu'au IV^{ème} siècle. Ces prospections ont aussi permis d'identifier 44 bâtiments, après vérification de 85% des signalements antérieurs. On peut donc s'attendre à une densité totale d'une cinquantaine de bâtiments pour l'ensemble de la forêt. C'est donc vers un schéma un peu différent de celui de la forêt de Tronçais qu'on se dirige : importante déforestation en surface, mais autour d'un nombre plus faible de bâtiments. L'activité pourrait ainsi être plus agricole et moins artisanale en forêt de Haye qu'en forêt de Tronçais.

En conclusion, il faut maintenant intégrer dans nos concepts l'idée que les grandes zones forestières non perturbées constituent, même dans les grandes forêts domaniales, des exceptions, et que l'inverse est la règle.

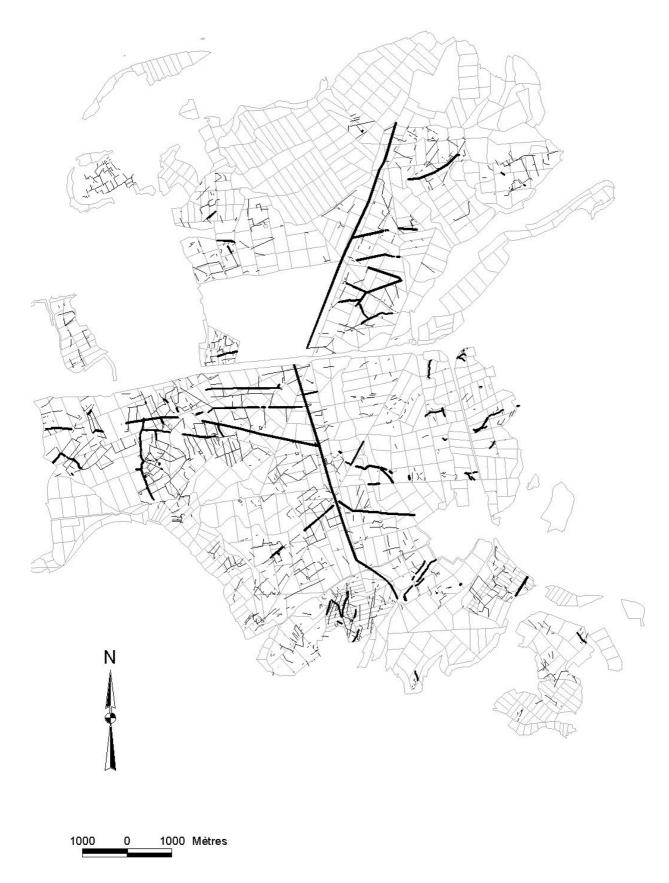


Figure 1 : Etat d'avancement en juillet 2004 de la cartographie du parcellaire, des terrasses et des voies en forêt de Haye (INRA/ONF/DRAC Lorraine).

Epoque	Moderne			Gallo-romain				
Nom de l'étude	Vosges	Aubure	Massif Central	Petite Montagne	Tronçais	Thuilley	Saint-Amond	Haye
Occupation ancienne	Fermes 17	700-1900	Chaumes et forêts	Landes, pâtures et terres→1900	Occupation gallo-romaine I-IVème siècle			
Cadre	Milieu	acide	Milieu volcanique	Milieu calcaire	Milieu acide	M	ilieu calcaire	
Massif	Vosges	Vosges	Chaîne des Puys	Jura	Nivernais	Plateaux	calcaires de Lorra	aine
Surface	16 fermes (environ 100 ha)	1 bassin versant (300 ha)	4 parcellaires (environ 100 ha)	petite région naturelle	massif (10 000 ha)	1 parcellaire (20ha)	1 parcellaire (200 ha)	massif (10 000 ha)
Usage actuel	Plantations (1900-1950) épicéa (sapins)	Plantations (1900-1950) épicéa et sapin	Accrus récents (1950) Pin et Bouleau	chênaies-hêtraies	Accrus antiques → futaies de chênes		cerus antiques taies de hêtre (cl	nênes)
Mesures	. Description et analyses sols . Minéralisation nette N . Relevés végétation . Mesures dendrométriques	. Description et analyses sols . Minéralisation nette N	Description et analyses sols Minéralisation nette N Relevés végétation Mesures dendrométriques	. Description et analyses sols . Minéralisation nette N . Relevés végétation	Description et analyses sols Minéralisation nette N Relevés végétation centrés sur 10 habitats	Description et analyses sols Minéralisation nette et brute N Relevés végétation centrés sur parcellaire Etude génétique Vinca minor	. Description sols . Relevés végétation centrés sur les parcellaires	. Relevés végétation sur quadrillage systématique
Nombre de relevés	104	61	58	126	165 + 151	43	89	824
Références	Koerner 1999 Koerner et al. 1999 Jussy et al. 2000	Jussy et al. 2000	Prévosto et al. 2003	Sciama 1999 Moares <i>et al.</i> 2001 Dupouey <i>et al.</i> 2002	Laüt 2001 Humbert 2002 Dambrine <i>et al.</i> soumis	Laffite 1998 Dupouey <i>et al.</i> 2002	Laffite <i>et al</i> . 2002	Bourdet 2000 Lemouland 2002 Laffite 2002

Tableau I : Tableau récapitulatif des études menées sur les relations histoire des forêts - fertilité - biodiversité par les équipes du présent projet.

Epoque	Epoque		Abandons mode	rnes		Abandons antiques		
Nom de l'étude		Vosges	Aubure	Massif Central	Petite Montagne	Tronçais	Thuilley	Saint- Amond
	C/N	bonne	faible	bonne	bonne sur limons faible sur marnes	bonne	faible	-
Valeur indicatrice	phosphore	très bonne	faible	faible	faible sur limons nulle sur marnes	bonne	très bonne (sol et végétation)	-
d'occupations anciennes	$\mathcal{S}^{l5}N$	très bonne	très bonne	bonne	bonne sur limons nulle sur marnes	bonne	très bonne	-
	composition en espèces des communautés végétales	très bonne	-	très bonne	bonne	bonne	très bonne	bonne
	indice N d'Ellenberg	très bonne	ı	bonne	faible	moyenne	très bonne	bonne
Nitrification nette		plus forte dans zones anciennement fumées	plus faible dans les chaumes	plus forte dans les terres	partout élevée	plus forte en zone perturbée	-	-
	Diversité α : nombre d'espèces par relevé en zone perturbée / non perturbée		-	pas de diff. (50)	pas de diff. (31)	25/17	pas de diff. (42)	37/32

Tableau II : Synthèse des principaux résultats obtenus dans les études des relations histoire — fertilité — biodiversité indiquées au tableau I.

2.2 - Variations actuelles de biodiversité associées à ces occupations anciennes.

Sur ces sites de nombreux relevés de végétation associés à des prélèvements de sols ont été effectués, en cherchant à équilibrer les échantillonnages en fonction des différents types d'occupation ancienne des sols et des variables principales du milieu (topographie, types de sols...). A partir des relevés ont été calculés les coefficients d'Ellenberg d'affinité de la végétation pour l'acidité, l'azote, l'eau et la lumière. Sur les prélèvements de sols ont été mesurés en routine la densité, le pH, le taux d'éléments échangeables, le taux de phosphore assimilable, la texture, le taux de calcaire, le taux de minéralisation et de nitrification de l'azote, et l'abondance isotopique en ^{15}N ($\delta^{15}N$). Le Tableau II présente une synthèse de ces résultats.

Pour des usages agricoles datant d'un siècle ou de 1800 ans environ, l'analyse factorielle de la végétation forestière actuelle montre des différences nettes de composition floristique entre parcelles agricoles ayant subi différents usages, et entre parcelles anciennement agricoles quelque soit l'usage, et zones non déforestées (figures 2 et 3). La végétation des jardins, anciennes terres et anciens prés vosgiens, celle des parcelles adjacentes aux habitations gallo-romaines du Plateau Lorrain et de Tronçais apparaît systématiquement plus neutrophile (Tronçais) et nitrophile (plateau calcaire) que celle des anciennes forêts. Ce caractère plus nitrophile et neutrophile est confirmé par le calcul des indices d'Ellenberg correspondants. En revanche, la végétation des anciennes forêts ou des pâtures apparaît plus acidiphile. Cette tendance est systématiquement observée sauf sur marnes dans le Jura (Sciama 1999).

Dans le contexte acide des forêts vosgiennes, comme en forêt de Tronçais, l'utilisation agricole ancienne est presque uniquement marquée par l'apparition, dans les zones enrichies, d'un cortège d'espèces à tendance rudérale, sans appauvrissement du cortège initial des forêts non perturbées. La richesse de ce cortège varie en fonction de la richesse du milieu édaphique initial et du degré d'enrichissement. Dans la Chaîne des Puys, où la comparaison avec des forêts anciennes n'a pu être menée, faute de forêts anciennes, le nombre d'espèces ne diffère pas entre anciennes landes et anciennes parcelles cultivées, mais la dynamique de la végétation vers les stades forestiers est accélérée dans les parcelles anciennement cultivées. Sur plateau calcaire, on observe à la fois un apport de nouvelles espèces dans les zones cultivées (figure 4) et la raréfaction de certaines espèces, dites de forêt ancienne, caractéristiques des zones peu perturbées, le plus souvent à faible capacité de dispersion (Tableau III). En conséquence, en sol très acide, les occupations anciennessont marquées par une forte augmentation du nombre d'espèces présentes, alors que dans le contexte calcaire, cette augmentation n'est pas toujours bien marquée.

Les différences observées de composition botanique entre les forêts utilisées anciennement ou non par l'homme dépassent en ampleur comme en qualité, celles que l'on observe à l'intérieur d'une surface destinée à un usage. Elles ne reflètent que secondairement les choix stationnels effectués par le cultivateur ou le batisseur pour destiner un espace à un usage. Cette aspect est spectaculairement illustré à Tronçais par la comparaison entre les 168 relevés effectués autour des bâtiments galloromains et les 151 relevés effectués quelques années plus tôt par Beaufils (1987), dans le cadre d'une typologie des stations forestières. La végétation des sites gallo-romains est en moyenne nettement plus diverse (à la fois en diversité α et γ), et les relevés de la typologie, qui représentent bien l'ensemble de la variabilité de cette forêt, hors zones d'occupation gallo-romaine, n'atteignent jamais la diversité des relevés les plus riches effectués sur les sites (figure 5).

L'utilisation des informations apportées par l'étude de la végétation d'un site anciennement occupé par l'homme peut se faire de façon cartographique (figure 6). Il faut noter que diverses informations, plus ou moins indépendantes, peuvent être extraites des relevés de végétation (richesse en espèces, valeur indicatrice pour divers paramètres de l'environnement comme le degré de disponibilité en azote ou le pH du sol...). La végétation peut ainsi être utilisée comme un outil de la prospection archéologique, au même titre que la microtopographie, la sédimentologie...

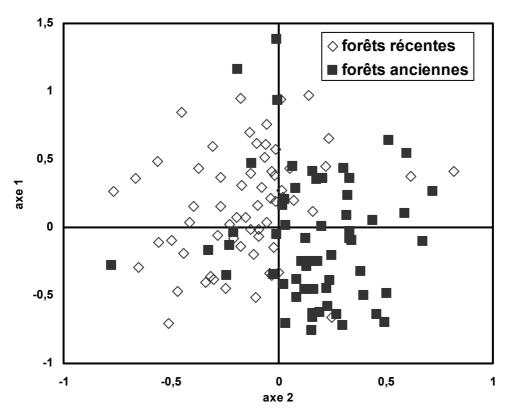


Figure 2 : Analyse factorielle des correspondances de la végétation dans la région de la Petite Montagne jurassienne : relation avec l'occupation du sol à l'époque moderne (Dupouey *et al.* 2002).

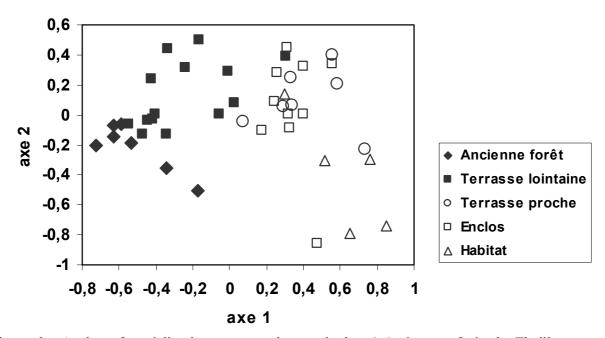


Figure 3 : Analyse factorielle des correspondances de la végétation en forêt de Thuilley-aux-Groseilles : relation avec l'occupation du sol à l'époque gallo-romaine.

Nombre d'espèces rencontrées

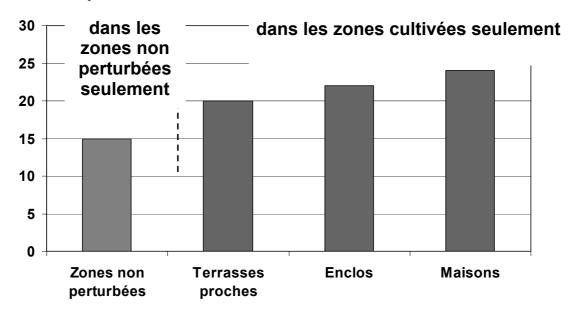


Figure 4 : Impact de l'agriculture gallo-romaine sur la richesse totale en espèces des différentes zones d'occupation (diversité γ).

	Fréque		
	bâtiments, enclos, terrasses proches (dans 22 relevés)	terrasses lointaines, zones non perturbées (dans 21 relevés)	Prob. test différence
Espèces à optimum en zone non perturbée			
Thuidium tamariscinum	27	100	< 0.001
Potentilla sterilis	23	95	< 0.001
Carex digitata	27	90	< 0.001
Convallaria maialis	18	81	< 0.001
Carex montana	5	67	< 0.001
Hordelymus europaeus	5	48	0.001
Epipactis helleborine	0	33	0.004
Neotia nidus-avis	9	48	0.007
Ornithogalum pyrenaicum	5	38	0.009
Espèces à optimum en zone anciennement cultivée			
Cardamine pratensis	41	14	0.09
Arum maculatum	32	5	0.05
Euphorbia cyparissias	27	0	0.02
Taraxacum officinale	45	10	0.02
Ranunculus auricomus	100	52	< 0.001
Plagiomnium undulatum	77	24	< 0.001
Galium odoratum	91	29	< 0.001
Milium effusum	100	29	< 0.001
Vinca minor	100	24	< 0.001

Tableau III : Liste des espèces caractéristiques des zones anciennement cultivées ou non perturbées à l'époque romaine dans la forêt de Thuilley-aux-Groseilles. Le test est un test bilatéral exact de comparaison de fréquence de Fisher.

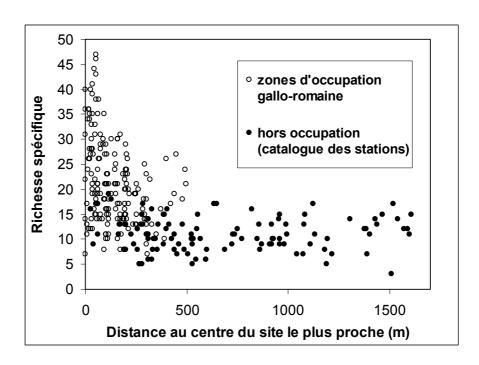


Figure 5 : Relation entre la distance au bâtiment gallo-romain le plus proche (en abscisse) et la richesse en espèces par relevé dans 10 zones d'habitat gallo-romain et dans 151 relevés du catalogue des stations forestières de la forêt de Tronçais.

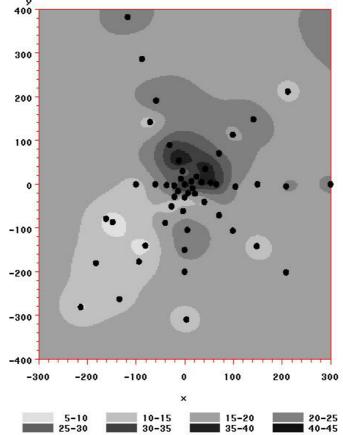


Figure 6 : Cartographie de la diversité α (nombre d'espèces par unité de surface) autour du site gallo-romain de la Pelloterie en forêt de Tronçais. Les ronds noirs représentent les points d'échantillonnage. Les distances sont en mètres.

Il est intéressant de noter que, malgré exploitation intense de l'ensemble de la forêt de Tronçais à partir du XVI^{ème} siècle, à laquelle nos sites n'ont probablement pas échappé, la trace des occupations précédentes a perduré. Les activités forestières ne semblent donc pas à même d'effacer les traces d'activités autour des bâtiments. Le chapitre suivant aborde plus précisément ce point.

2.3 - Interaction entre type de sylviculture et maintien des différences de végétation à long terme : l'exemple de la conversion en futaie en forêt de Saint-Amond.

Sciama D., Dupouey J.L., Dambrine D., Laffite J.D.

Introduction

La sylviculture, en modifiant la structure des peuplements, et donc le microclimat et le cycle des éléments minéraux, peut jouer de façon significative sur la composition des communautés végétales herbacées (Le Tacon *et al.* 2001). Dans le Nord-Est de la France, comme dans de nombreuses autres régions, la sylviculture traditionnelle a été celle du taillis sous futaie pendant de nombreux siècles. Depuis le XVIIIème siècle, on assiste à la conversion progressive de ces forets au régime de la futaie régulière. Becker (1979) a montré que cette conversion entraînait une évolution importante de la végétation. Comment perdurent les traces des occupations anciennes au travers de ces changements de sylviculture? Les modifications induites par la sylviculture sont-elles suffisantes pour les faire disparaître? Ces questions peuvent avoir une portée appliquée, puisqu'elles permettent de juger quel système sylvicole conserve le mieux les traces biologiques des occupations très anciennes. De plus, la prise en compte du type de sylviculture dans notre échantillonnage permet de comparer l'amplitude des variations de végétation induites par les usages anciens avec celle dues à la sylviculture.

Nos objectifs étaient donc :

- de confirmer, sur un échantillon de plusieurs sites d'habitat gallo-romain, les premières observations d'un impact à très long terme de l'agriculture sur les communautés végétales des forets actuelles,
- d'étudier le rôle d'un changement de sylviculture sur la composition de ces communautés végétales et, surtout, sur le maintien des différences liées à l'agriculture ancienne,

dans un grand massif des plateaux calcaires de Lorraine (Nord-Est de la France).

Site et méthodes

Le massif de Saint-Amond est situé entre Nancy et Langres. D'une surface de 10 000 ha environ, il repose sur les calcaires oolithiques durs du Bajocien supérieur, Bathonien et du Callovien. C'est un vaste plateau de basse altitude (350 à 475 m), entaillé de petites vallées aux flancs abrupts. Les sols vont des rendzines superficielles, développées sur une fine couche d'argile de décarbonatation (0,2 m en moyenne) à des sols bruns plus ou moins épais sur dépôts limoneux. Le climat est semicontinental, humide et froid.

En 1998 ont été repérées, cartographiées puis fouillées des structures archéologiques de surface : terrasses, enclos, habitats et chemins creux marqués par la présence d'un réseau dense de pierriers. Ces pierriers, larges de 2 à 4 m pour une hauteur de 0,5 à 1 m, délimitent un parcellaire constitué de grandes planches relativement parallèles entre-elles, avec un écartement approchant les 3 actus (100 m environ). L'emprise totale de ce système agraire est de plus de 700 ha, morcelé en 3 ensembles disjoints. Trois sondages ont permis de dater l'occupation du site : les tuiles, poteries et monnaies trouvées indiquent toutes une occupation de la fin du I^{ier} siècle avant JC au II^{ème} siècle après JC (Laffite *et al.* 2002). Aucun indice d'une quelconque occupation ultérieure, médiévale ou moderne n'a été trouvé, à l'exception de quelques charbonnières d'époque récente et d'un ermitage reporté sur la carte des Naudin (1736), sans défrichement signalé. La forêt a ainsi permis une excellente conservation de ce parcellaire antique, figé dans son état d'abandon.

Cette forêt était anciennement traitée en taillis-sous-futaie à la révolution de 30 ans. Depuis 1838, les peuplements sont progressivement convertis en futaie régulière. Le hêtre (*Fagus sylvatica*) est l'essence dominante de la strate supérieure, accompagné des chênes pédonculé (*Quercus robur*) et sessile (*Quercus petraea*) et du frêne (*Fraxinus excelsior*). Le charme (*Carpinus betulus*) domine dans le sous-bois.

A partir de la carte des murs et des sondages archéologiques, nous avons installé 89 placettes dans l'ensemble de la zone en essayant d'équilibrer le nombre de placettes dans chacune des quatre strates d'échantillonnage obtenues par croisement du critère d'occupation ancienne (placette située à proximité des bâtiments ou des murets ou en dehors de la présence de toute trace d'occupation ancienne) et du traitement sylvicole, taillis sous futaie ou futaie régulière.

En chaque point a été établi un relevé phytosociologique classique sur une surface fixe de 400 m². On a distingué trois strates : arbres, sous-étage et herbacées. Dans chacune des strates a été relevé l'abondance-dominance de toutes les espèces observées, selon une échelle ordinale classique à 6 niveaux (+, 1 à 5).

Pour les analyses suivantes, les strates herbacée et arbustive ont été fusionnées, et la strate arborescente n'a pas été prise en compte, sauf mention contraire. En effet, celle-ci dépend fortement de la sylviculture. Dans un premier temps, on a analysé les relevés en termes de diversité spécifique, en décomposant celle-ci en ses trois composantes classiques : diversité α (dans chaque relevé), β (entre sites) et γ (totale). Si les diversités α et γ ne sont que des nombres d'espèces, la diversité γ peut être estimée de diverses façons. Nous l'avons mesurée ici comme étant la valeur moyenne de similarité entre toutes les paires de relevés possibles, en utilisant le coefficient de similarité de Jaccard :

Diversité
$$\beta = \frac{2\sum\limits_{i=1,N}J_{i}J_{i}J_{i}J_{i}}{N(N-1)}$$
 et
$$J_{ij} = \frac{a}{a+b+c}$$

où N est le nombre de relevés, a le nombre d'espèces en commun dans les relevés i et j, b le nombre d'espèces propres à i et c le nombre d'espèces propres à j. Les résultats obtenus avec d'autres coefficients de similarité classiques (Sorensen par exemple) sont identiques.

Nous avons ensuite analysé les variations entre communautés d'espèces par analyse multivariable de l'ensemble du tableau relevés x espèces. Seule la présence-absence des espèces a été prise en compte. Nous avons utilisé une méthode d'ordination non métrique (positionnement multidimensionnel), basée sur l'analyse du tableau des similarités de Jaccard entre relevés, calculées précédemment. Bien que reconnues de façon répétée comme plus adéquates que les méthodes d'ordination plus classiques, les méthodes de positionnement non métrique ne sont finalement que peu utilisées en écologie végétale, principalement en raison des temps de calculs qui étaient, encore récemment, prohibitifs. Les différences éventuelles entre types d'utilisation ancienne des sols ou régimes sylvicoles ont été testées par analyse de variance de chacun des 5 premiers axes factoriels :

$$Axe_{iik} = Cste + Uti_i + Sylvi_i + Uti_i*Sylvi_i + \varepsilon_{iik}$$
 (modèle 1)

avec:

- . Axe_{ijk} : position du relevé k du type d'utilisation ancienne i et du type de sylviculture j sur l'axe factoriel
 - . Cste: terme constant
- . Uti_i : type d'utilisation ancienne du sol, en deux classes (hors parcellaire ou intra-parcellaire gallo-romain)
 - . Sylvi_i : type de sylviculture en deux classes (futaie ou taillis sous futaie)

. $Uti_i*Sylvi_j$: terme d'interaction entre les deux facteurs précédents . ϵ_{ijk} : erreur

Finalement, un modèle logistique de la présence/absence en fonction du traitement sylvicole, de l'utilisation du sol et de leur interaction a été établi pour chaque espèce prise individuellement. On présente ici la fréquence de présence des espèces pour lesquelles un des deux effets principaux au moins est significatif au seuil de 10%. En effet, à ce stade d'étude encore très préliminaire des effets à long terme des usages anciens, et en raison du nombre de relevés disponibles encore modeste, il nous semble intéressant de s'intéresser à des espèces dès l'instant où elles montrent des différences de fréquence significatives à ce seuil de 10%. Des comparaisons de fréquence de chaque espèce dans les deux classes d'utilisation du sol, ou dans les deux classes de traitement sylvicole, par un test exact de Fisher donnent des résultats quasiment identiques à ceux obtenus par le modèle logistique.

Résultats et discussion

La richesse en espèce par site est la même dans les deux traitements sylvicoles (33,6 en moyenne). Par contre, elle diffère fortement et significativement entre usages anciens : 36,9 espèces en moyenne dans les sites anciennement occupés, et 31,7 dans les sites non perturbés, soit 5 espèces de différence. La diversité β est légèrement supérieure dans les sites anciennement perturbés, pour un nombre de relevés pourtant inférieur (32 contre 57). Le coefficient de Jaccard moyen entre toutes les paires de relevés possibles est de 0,421 en zone non perturbée, et de 0,415 en zone perturbée (0,402 entre relevés de ces deux sous-ensembles). La diversité β est supérieure en futaie par rapport au TSF (0,429 contre 0,414), mais le nombre de relevés est lui aussi supérieur en futaie (48 contre 41). La diversité γ , ou nombre d'espèces total rencontrées dans chaque type de relevé, est nettement supérieure dans les zones anciennement perturbées : 113 espèces contre 106, pour un nombre de relevés inférieur. Ainsi, alors que la conversion n'a pas induit de différences nettes de diversité, l'agriculture ancienne est liée à un nombre plus élevé d'espèces par relevé, à une variabilité entre sites plus forte et, en conséquence, à un cortège global d'espèces plus riche.

L'analyse multidimensionnelle de l'ensemble du tableau de relevés permet d'identifier les deux premiers axes factoriels comme étant liés aux deux facteurs échantillonnés, qui ont donc bien un effet significatif sur la composition des communautés végétales (figure 7 et tableau IV). L'axe de variance maximale (axe 1) est lié à l'utilisation ancienne. L'analyse de variance confirme ces effets, avec une coupure plus fortement marquée entre traitements sylvicoles qu'entre utilisations anciennes. Il n'apparaît pas d'effets significatifs sur les 3 axes suivants. Une interaction faible entre les effets du traitement sylvicole et l'utilisation ancienne est visible sur l'axe 2 (tableau IV). Les tests multivariables prenant en compte conjointement les axes 1 et 2 donnent des résultats identiques. On constate que les différences entre sites anciennement cultivés ou non sont plus nettes en futaie qu'en taillis sous futaie.

Quelles sont les espèces caractéristiques de chaque type de forêt échantillonné ? 28 espèces apparaissent liées au type d'utilisation ancienne du sol (tableau V). Conformément à ce qui a été observé pour la richesse spécifique, ces espèces sont toutes (sauf 2) plus fréquentes sur les anciens parcellaires qu'à l'extérieur. 51 espèces sont liées au traitement sylvicole, confirmant que cette coupure est plus nette pour la végétation que celle liée aux usages anciens. Il y a quasiment autant de caractéristiques du taillis sous futaie que de la futaie.

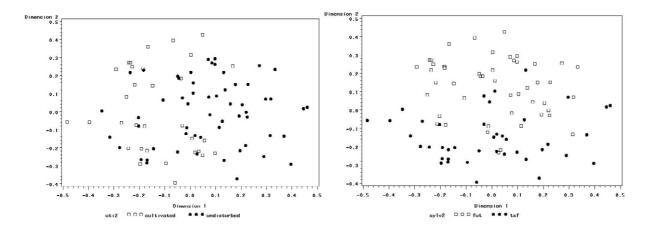


Figure 7 : Position des relevés sur les deux premiers axes d'une analyse multidimensionnelle. A gauche : type d'utilisation ancienne (carrés blancs : relevés dans le parcellaire gallo-romain, ronds noirs : relevés en dehors du parcellaire). A droite : traitement sylvicole (carrés blancs :futaie, ronds noirs : taillis sous futaie).

Axe	R ² global	F Utilisation	F Sylviculture	F Interaction
		ancienne		
1	0,23	24,6***	$0,1^{\text{ns}}$	$0,2^{ns}$
2	0,50	$0,2^{ns}$	84,2***	6,6*
1 (futaie)	0,35	25,1***	-	-
1 (taillis sous futaie)	0,14	6,6*	-	-

Tableau IV : Analyse de variance des effets traitement sylvicole et utilisation ancienne sur les deux premiers axes du positionnement multidimensionnel selon le modèle 1 (deux premières lignes) et analyse de l'effet utilisation ancienne sur l'axe 1 du positionnement multidimensionnel pour chaque traitement sylvicole pris séparément (deux dernières lignes).

Espèce	Fréquence intra- parcellaire	Fréquence hors parcellaire	Effet Utilisation ancienne du sol	Fréquence TSF	Fréquence futaie	Effet traitement sylvicole	Interaction
Paris quadrifolia	31,3	1,8	***	2,4	20,8	***	***
Geranium robertianum	31,3	1,8	***	4,9	18,8	**	*
Milium effusum	68,8	33,3	***	36,6	54,2	*	Ns
Glechoma hederacea	34,4	10,5	**	4,9	31,3	***	Ns
Ribes uva-crispa	31,3	10,5	**	2,4	31,3	***	(*)
Rhytidiadelphus triquetrus	53,1	28,1	**	61,0	16,7	***	ns
Euonymus europaeus	28,1	8,8	**	26,8	6,3	**	ns
Asarum europaeum	62,5	31,6	**	36,6	47,9	ns	ns
Mercurialis perennis	71,9	42,1	**	48,8	56,3	ns	ns
Vinca minor	59,4	26,3	**	34,1	41,7	ns	ns
Poa nemoralis	34,4	10,5	**	19,5	18,8	ns	*
Ornithogalum pyrenaicum	28,1	12,3	*	24,4	12,5	*	***
Galium aparine	9,4	0,0	*	0,0	6,3	*	*
Carex sylvatica	62,5	84,2	*	65,9	85,4	*	ns
Scrophularia nodosa	0,0	12,3	*	0,0	14,6	*	*
Torilis japonica	18,8	5,3	*	4,9	14,6	*	ns
Hypericum hirsutum	40,6	17,5	*	19,5	31,3	ns	ns
Acer platanoides	93,8	78,9	*	78,0	89,6	ns	ns
Crataegus monogyna	59,4	36,8	*	46,3	43,8	ns	**
Abies alba	9,4	0,0	*	4,9	2,1	ns	ns

Espèce	Fréquence intra- parcellaire	Fréquence hors parcellaire	Effet Utilisation ancienne du sol	Fréquence TSF	Fréquence futaie	Effet traitement sylvicole	Interaction
Bromus ramosus							
subsp. benekenii	40,6	24,6	(*)	48,8	14,6	***	ns
Cardamine pratensis	68,8	52,6	(*)	68,3	50,0	*	*
Aquilegia vulgaris	6,3	0,0	(*)	0,0	4,2	(*)	(*)
Pulmonaria obscura	40,6	24,6	(*)	22,0	37,5	ns	ns
Geum urbanum	37,5	19,3	(*)	22,0	29,2	ns	ns
Helleborus foetidus	18,8	7,0	(*)	14,6	8,3	ns	ns
Primula elatior	40,6	22,8	(*)	24,4	33,3	ns	ns
Fragaria vesca	28,1	14,0	(*)	19,5	18,8	ns	ns
Quercus robur	37,5	29,8	ns	51,2	16,7	***	ns
Oxalis acetosella	15,6	12,3	ns	0,0	25,0	***	ns
Arum maculatum	53,1	68,4	ns	43,9	79,2	***	ns
Circaea lutetiana	12,5	21,1	ns	2,4	31,3	***	ns
Rubus idaeus	15,6	7,0	ns	0,0	18,8	***	ns
Corylus avellana	71,9	84,2	ns	92,7	68,8	***	ns
Stachys officinalis	18,8	31,6	ns	7,3	43,8	***	ns
Ulmus glabra	40,6	54,4	ns	19,5	75,0	***	ns
Dryopteris filix-mas	28,1	19,3	ns	2,4	39,6	***	ns
Carex muricata	40,6	38,6	ns	61,0	20,8	***	(*)
Sorbus aria	31,3	19,3	ns	39,0	10,4	**	ns
Plagiomnium undulatum	25,0	31,6	ns	43,9	16,7	**	ns
Eurynchium striatum	56,3	61,4	ns	73,2	47,9	**	*
Rosa arvensis	59,4	57,9	ns	73,2	45,8	**	(*)
Thuidium tamariscinum	21,9	26,3	ns	39,0	12,5	**	ns
Anemone nemorosa	12,5	5,3	ns	0,0	14,6	**	ns
Fagus sylvatica	90,6	96,5	ns	87,8	100,0	**	ns
Viburnum lantana	31,3	22,8	ns	39,0	14,6	**	ns
Ligustrum vulgare	15,6	12,3	ns	22,0	6,3	**	(*)
Acer campestre	75,0	68,4	ns	82,9	60,4	*	ns
Rubus fruticosus	46,9	64,9	ns	65,9	52,1	*	***
Lonicera xylosteum	25,0	15,8	ns	29,3	10,4	*	ns
Cornus sanguinea	28,1	28,1	ns	39,0	18,8	*	ns
Carpinus betulus	93,8	91,2	ns	100,0	85,4	*	ns
Epipactis helleborine	3,1	7,0	ns	12,2	0,0	*	ns
Viola mirabilis	6,3	1,8	ns	7,3	0,0	*	ns
Euphorbia cyparissias	6,3	3,5	ns	0,0	8,3	*	ns
Neottia nidus-avis	9,4	8,8	ns	14,6	4,2	*	ns
Euphorbia amygdaloides	46,9	50,9	ns	36,6	60,4	*	ns
Lathyrus vernus	6,3	7,0	ns	12,2	2,1	*	ns
Galeopsis tetrahit	6,3	1,8	ns	0,0	6,3	(*)	ns
Sorbus torminalis	15,6	17,5	ns	24,4	10,4	(*)	ns
Convallaria maialis	25,0	17,5	ns	29,3	12,5	(*)	ns
Stellaria holostea	25,0	12,3	ns	12,2	20,8	(*)	*
Carex flacca	3,1	3,5	ns	7,3	0,0	(*)	ns
Carex digitata	9,4	5,3	ns	12,2	2,1	(*)	ns

Tableau V : Espèces présentant des différences significatives de fréquence selon le type d'utilisation ancienne ou le type de traitement sylvicole.

Les espèces caractéristiques des parcellaires anciens ont tendance à être des espèces nitrophiles. On retrouve des espèces classiques déjà mises en évidence dans les études antérieures (*Vinca minor*, *Ribes uva-crispa*...). Nous retrouvons, entre TSF et futaie, les mêmes différences que celles observées par Becker (1979). Les espèces de futaie sont un peu plus nitrophiles, hygrophiles, acidiphiles et sciaphiles que celles du taillis sous futaie. Les mousses sont plus abondantes en TSF,

ainsi que les espèces du taillis (noisetier, charme, érable champêtre...). Ces espèces, qui rejettent de souche, sont favorisées par les coupes successives de taillis, tout comme les chênes sont favorisés en TSF et le hêtre en futaie. Les mousses sont probablement favorisées par les niveaux de lumière plus bas et une humidité atmosphérique plus élevée entretenue dans le sous-bois par le taillis, et l'alternance de ces milieux très fermés avec une ambiance très sèche lors des coupes de taillis.

Ce travail permet, comme d'ailleurs celui mené en parallèle en forêt de Tronçais, d'étendre à plusieurs sites les observations précédentes faites sur le seul site de Thuilley-aux-Groseilles. Nous retrouvons, en échantillonnant des sites archéologiques indépendants, les mêmes résultats que ceux obtenus initialement : augmentation de la diversité phanérogamique liée à l'agriculture ancienne, avec une augmentation de la fréquence des espèces nitrophiles. Nous confirmons donc, pour une surface beaucoup plus vaste, les résultats précédents obtenus sur un petit système agraire.

L'autre constatation importante de ce travail est que la sylviculture n'interagit que peu avec l'utilisation ancienne du sol. D'une part, il a été relativement aisé de trouver, lors de la phase d'échantillonnage, des taillis sous futaie ou des futaies sur les deux types d'utilisation ancienne définis a priori (intra-parcellaire ou non perturbé par l'agriculture ancienne). Il ne semble donc pas y avoir de lien important, dans ces forêts, entre les sites choisis pour l'agriculture et ceux choisis pour la conversion, 17 siècles après. D'autre part, le signal lié à l'agriculture ancienne se retrouve avec la même intensité après la conversion du taillis sous futaie à la futaie. Il apparaît même, dans notre échantillon, amplifié. Cette amplification pourrait être un biais lié à des déséquilibres dans notre échantillon. Mais elle pourrait aussi être due à des différences d'environnement, de sol en particulier, entre taillis sous futaie et futaie.

En perspective, il serait intéressant de compléter ces analyses purement floristiques par des analyses de sol, qui permettraient de mieux contrôler l'existence éventuelle de biais d'échantillonnage (liaisons type de sylviculture / utilisation ancienne / type de sol). En particulier, en l'absence de contrôle sur le type de substrat, nous ne pouvons pas complètement écarter, dans cette étude, l'hypothèse selon laquelle les implantations gallo-romaines se seraient faites préférentiellement sur les sols les plus riches, expliquant à la fois pourquoi ces différences floristiques perdurent sur d'aussi longues périodes et pourquoi elles sont indépendantes des changements de sylviculture.

2.4- Les modifications des sols, conservateurs de la biodiversité.

Les analyses de sols effectuées sur les parcellaires modernes et gallo-romains indiquent des différences nettes entre zones d'occupation. Les sols ont un pH plus élevé, les teneurs en carbone et en phosphore sont plus élevée dans les zones anciennement cultivées, que dans les pâtures et les forêts immémoriales (Tableau II), ou les zones sans murs. L'abondance isotopique en ¹⁵N (δ¹⁵N) des sols est aussi plus élevée. Les concentrations en P des parcelles enrichies dépassent nettement les valeurs observées dans le cadre du réseau Renecofor ou du réseau des hêtraies du Nord-Est (Brêthes et Ulrich. 1994; Duquesnay 1999) de sorte qu'elles ne semblent pas pouvoir provenir de différences préexistantes à l'occupation. Sauf pour les sols calcaires, la nitrification paraît plus élevée dans les zones anciennement enrichies. Dans le Massif Central, les Vosges, et les limons du Jura, les valeurs d'affinité pour l'azote de la végétation tirées de l'indice d'Ellenberg ont été vérifiées expérimentalement par minéralisation au laboratoire, et des relations ont été établies entre taux de nitrification et δ^{15} N dans les Vosges et le Massif Central acide. On doit noter que seul le taux de nitrification en sol acide semble influencé par ces anciennes pratiques. Ces relations ne fonctionnent plus en sol neutre ou calcaire car le taux de nitrification est toujours très élevé. Cependant cet effet n'a jamais été rigoureusement testé pour les occupations antiques. Des essais de mesure de la nitrification brute à Thuilley se sont traduits par un échec pour des raisons méthodologiques.

Les modifications de la composition des sols sont liées aux pratiques agricoles anciennes, telles qu'elles sont décrites dans les textes d'agronomie récents ou antiques. Le labour, déjà pratique à l'époque gallo-romaine entraîne un approfondissement des sols, et la fragmentation des éléments grossiers. Le chaulage est pratiqué depuis l'époque gauloise. Les élévations de pH (ou d'indice de pH) mesurées dans les zones anciennement cultivées du Massif Central et des Vosges suggèrent l'influence d'un chaulage dans les zones anciennement cultivées, mais elles pourraient aussi provenir d'un plus faible taux de matière organique. Les pH plus élevés mesurés autour des habitats gallo-romains de

Tronçais sont attribuables aux reliquats de mortier calcaire, utilisé dans certains habitats, mais aussi peut être au chaulage ancien. Les teneurs élevées en phosphore trahissent l'incidence de l'élevage. Teneurs en P et pH se maintiennent du fait du caractère très fermé du cycle biologique des cations en forêt. Ceci n'est cependant pas nécessairement le cas pour l'azote, dont nous discutons plus loin.

2.5 - Mécanismes de maintien des différences de diversité en fonction de l'utilisation ancienne.

2.5.1 - Relation entre l'utilisation ancienne et la structure génétique des populations de *Vinca minor*.

Petit R., Dupouey J.L., Guichoux E., Pemonge M.H., Audigeos D., Dambrine E.

Objectif

La pervenche, *Vinca minor* L. (*Apocynaceae*), est une espèce à répartition médioeuropéenne typique, particulièrement bien représentée en France dans le Nord et le Nord-Est (figure 8).

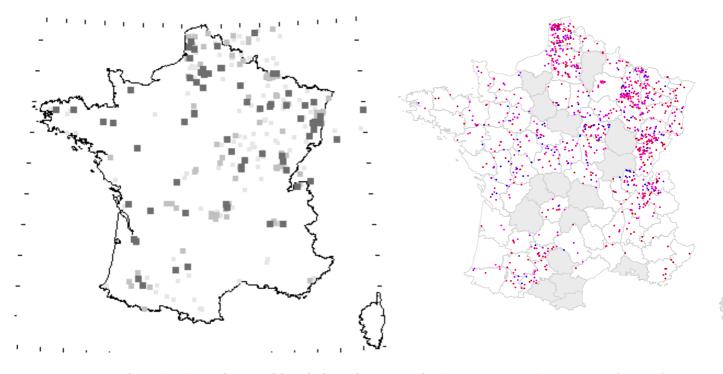


Figure 8 : Carte de répartition de la petite pervenche (*Vinca minor* L.) en France, d'après les données de la base SOPHY (http://sophy.u-3mrs.fr/, relevés phytosociologiques de tous milieux, couverture de la France non homogène) à gauche et de l'IFN (relevés forestiers selon un échantillonnage stratifié de la France entière, départements non encore disponibles en gris) à droite.

Elle est myrmécochore (graines disséminées par les fourmis) et se reproduit fréquemment de manière végétative. Cette espèce très utilisée en horticulture a été introduite (ainsi que *Vinca major*) en Amérique du Nord où elle est devenue invasive, causant des dégâts à la végétation naturelle (voir par exemple Schulz & Thelen 2000). Dans le Nord-Est de la France, elle est trouvée en association avec des sites gallo-romains (Dupouey *et al.* 2003). De façon un peu paradoxale, elle est considérée en Belgique comme une espèce typiquement associée aux forêts anciennes par Honnay *et al.* (1998), ce qui signifie qu'elle se trouve significativement plus fréquemment dans les forêts non perturbées par l'homme depuis au moins 300 ans que dans les forêts récentes. Donc il se pourrait que cette espèce ait vu son aire s'accroître très tôt à la faveur d'implantations gallo-romaines par exemple, et représente ainsi un cas d'invasion biologique précoce, devenant ensuite une espèce caractéristique des forêts

anciennes. La façon dont cette espèce, à très faible pouvoir de dispersion apparent, a pu s'installer dans son aire de distribution actuelle reste inexpliquée. Elle pourrait avoir été transportée soit volontairement, pour ses propriétés ornementales et, plus probablement, médicinales, soit de façon passive. Ce travail visait donc à améliorer notre connaissance sur les mécanismes liés à la dispersion qui pourraient expliquer la présence de certaines espèces sur les sites gallo-romains.

S'agissant d'une espèce clonale dont la vitesse de croissance moyenne pourrait être estimée par des études de démographie, il avait été décidé dans le cadre de ce projet de caractériser la diversité génétique au sein de deux populations de pervenche situées sur des sites gallo-romains. L'hypothèse était la suivante : en repérant les clones sur le terrain et en mesurant leur dimension, puis en mesurant la vitesse de croissance clonale de la pervenche, il devrait être possible d'estimer un âge minimum des taches et donc de vérifier si le résultat est compatible avec une installation de l'espèce à l'époque gallo-romaine. Ce genre d'approche est utilisé avec des lichens pour dater les éboulis en montagne (lichénométrie). Il a aussi été appliqué pour dater des individus de rhododendron en montagne, grâce à des marqueurs moléculaires (AFLP; Escaravage et al. 1998) : « A single genotype can occupy a large surface and sometimes form a dense patch. Based on an annual shoot mean growth of 2.6 cm/year and the size of the widest clone, we estimated the age of the oldest individual to be at least 300 years. » La mesure de la diversité clonale dans une population donnée permet d'estimer par ailleurs la fréquence relative des régénérations par graine et par multiplication végétative, ce qui constituait une autre perspective de ces travaux (voir par exemple Watkinson & Powell 1993; Harada & Iwasa 1996).

Matériel et Méthodes

Des échantillons ont été prélevés sur deux sites en forêts communales : Thuilley-aux-Groseilles (54) et Gondreville (54), distants de 13,250 km à vol d'oiseau. Ces deux sites correspondent à des sites gallo-romains assez importants, de date d'occupation connue (I^{ier}-III^{ème} siècle), et n'ayant pas subis de réoccupation tardive. Sur chaque site, un plan précis des taches de *Vinca minor* a été dressé au GPS (correction différentielle sur la station INRA de Nancy). Des échantillons de feuille ont été prélevés aux intersections d'une grille à maille carrée (total : 285 à Thuilley-aux-Groseilles et 98 à Gondreville; figure 9). Un échantillon prélevé à Canéjan (33) a été utilisé pour comparaison des variants de Lorraine avec ceux d'une région éloignée. La technique AFLP (*Amplified Fragment Length Polymorphism*) a été utilisée. Cette technique fournit un grand nombre de marqueurs dominants (30-100 par réaction) répartis sur l'ensemble du génome étudié. Cette méthode est réputée être particulièrement répétable, comparée à des méthodes alternatives de *fingerprinting* (par exemple RAPD), ce qui la rend appropriée pour identifier des clones issus de reproduction végétative.

Résultats

Une première phase des travaux a consisté à mettre au point la technique AFLP sur la pervenche. Des extraits ont été réalisés en double pour vérifier que la technique est répétable. Trois couples d'enzymes de restriction et différentes combinaisons de nucléotides sélectifs ont été testés.

Deux méthodes d'extraction d'ADN ont été utilisées (Doyle & Doyle 1990 et kit Qiagen DNeasy). La première méthode, plus longue mais fournissant plus d'ADN, a été retenue. Un total de 21 combinaisons a ensuite été testé. Plusieurs de ces combinaisons donnaient des profils satisfaisants, avec suffisamment de bandes (50-100) pour être hautement informatives. Par contre un manque de répétabilité a été mis en évidence, entre deux extraits du même individu. Pendant plus d'un mois, des tests ont été réalisés pour améliorer ce point. Deux facteurs ont permis finalement de résoudre ce problème : (1) le protocole standard du laboratoire a été modifié; deux étapes (la digestion de l'ADN et la ligation des adaptateurs spécifique) avaient été fusionnées par souci d'efficacité ; elles ont été de nouveau séparées; (2) la méthode d'extraction par le kit Qiagen a finalement été utilisée. Bien que le rendement soit moindre, l'ADN obtenu est de meilleure qualité, critère essentiel à une bonne répétabilité de la technique.

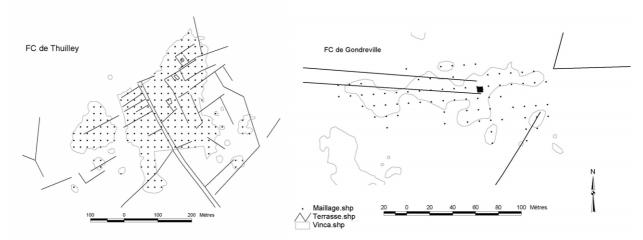


Figure 9 : Carte des taches de *Vinca minor* et emplacement des points de prélèvement pour analyse AFLP sur les sites de Thuilley-aux-Groseilles (20 m x 20 m, à gauche) et de Gondreville (10 m x 10 m, à droite). Lignes noires : murets de pierre sèche anciens.

24 plantes ont été caractérisées à l'aide de la combinaison ECO+AC et MSE+GCA: 12 du site 1 (Thuilley-aux-Groseilles), 11 du site 2 (Gondreville), et une de Gironde. Chacune était représentée par deux extraits pour vérifier la répétabilité du profil AFLP obtenu. L'individu de Gironde se distingue nettement des 23 autres (pour la moitié des bandes environ). Par contre, les 46 pistes (23 individus) correspondant aux échantillons des deux forêts communales de Meurthe et Moselle sont identiques entre elles, si l'on tient compte uniquement de la présence ou absence de bande, et non pas de leur intensité variable. Les différences d'intensité notées ne semblent pas répétables entre deux extraits différents d'un même échantillon.

Discussion

Au vu de ces résultats, on peut donc considérer que tous les échantillons étudiés en Meurthe et Moselle sont génétiquement identiques et doivent constituer un seul clone, vu le contraste entre leur uniformité et le nombre de différences avec l'individu de Gironde. Nous avons donc jugé inutile de caractériser plus d'échantillons dans ces sites, ni de multiplier les combinaisons AFLP car le nombre de bandes élevé permet d'avoir des résultats représentatifs de la diversité nucléaire.

Ces résultats contrastent avec ceux disponibles sur la plupart des espèces clonales, qui ont montré pour la plupart beaucoup plus de diversité que ce qui était attendu par les chercheurs. Un exemple typique est l'étude de Gabrielsen & Brochmann (1998): « Sex after all: high levels of diversity detected in the arctic clonal plant Saxifraga cernua using RAPD markers ». Il existe toutefois des cas où la diversité est très réduite dans une partie de l'aire plus récemment colonisée (Eckert & Barrett 1993; Dorken & Eckert 2001), pouvant aller jusqu'à une perte totale de diversité dans les populations les plus nordiques. Enfin, des cas d'absence totale de diversité sont observés dans des régions entières dans le cas d'espèces clonales introduites, mais surtout pour des espèces aquatiques (ex. Alternanthera philoxeroides en Chine, Xu et al. 2003).

Chez la pervenche, espèce qui n'était pas considérée jusqu'à récemment comme invasive en France, la grande uniformité trouvée dans deux populations était donc inattendue. L'objectif initial, d'estimer des âges de clone par leur taille, est donc pour l'instant irréalisable. Mais cette uniformité ouvre des perspectives intéressantes. Il serait intéressant de caractériser un plus grand nombre de populations, à une échelle régionale et en relation avec nos connaissances sur l'histoire antique de l'utilisation des sols, pour évaluer la variabilité de l'espèce. Cela permettrait d'identifier s'il existe des endroits à forte diversité clonale (populations sources ?) et peut être de repérer la pénétration de clones à l'échelle régionale, éventuellement associés à différents épisodes d'introduction par l'homme.

2.5.2 - Mécanismes de maintien à long terme de la fertilité des sols anciennement cultivés.

Les mécanismes de maintien à long terme de la fertilité des sols demeurent, en ce qui concerne l'azote, insuffisamment compris.

Plusieurs études parallèles ont été menées pour essayer de comprendre les mécanismes de maintien d'une flore plus nitrophile sur un site très anciennement enrichi. Nous avons exploré l'hypothèse suivant laquelle la flore entretiendrait elle-même les modification du cycle de l'azote qui ont permis son installation. Nous avons donc testé ce en quoi des espèces différant par leurs exigences écologiques modifiaient leur milieu.

C'est le thème des deux premières de ces études.

2.5.2.1 - Analyse du $\delta^{15}N$ de la rhizosphère de plantes herbacées : effets de l'espèce et de l'histoire de l'utilisation ancienne des sols.

Nguyen C., Dupouey J.L., Dambrine E.

4 espèces (*Melica uniflora* -Mu-, *Lamiastrum galeobdolon* -Lg-, *Mercurialis perennis* -Mp-, *Polygonatum multiflorum* -Pm-) ont été étudiées sur le site de Thuilley-aux-Groseilles, parce qu'elles peuvent se trouver à la fois près du site gallo-romain et en forêt non perturbée par l'agriculture ancienne. On a étudié de plus *Convallaria maialis* -Cm-, sur les sites non perturbés uniquement, et *Vinca minor* -Vm- sur les sites anciennement cultivés uniquement. On a mesuré au spectromètre de masse le δ^{15} N et les concentrations en C et N du sol rhizosphérique de chacune de ces espèces.

Ensemble des données (forêts non perturbées et perturbées par l'agriculture ancienne, n=46)

	$\delta^{15}N$ (‰)	C (%)	N (%)	C/N
R ² global	63***	49***	50***	42**
F ancienneté	20,5***	0,9ns	6,8*	13,3***
F espèce	5,8**	3,8*	3,2*	2,0ns
F interaction	7,8***	7,8***	6,7**	3,1*
LSM forêts non perturbées	-3,4	9,8	0,74	13,1
LSM forêts perturbées	-1,5	10,3	0,84	12,3
LSM Lg	-3,7	8,8	0,71	12,2
LSM Mp	-1,9	10,9	0,85	12,9
LSM Mu	-2 ,9	9,6	0,75	12,8
LSM Pm	-1,4	10,9	0,84	12,8
Moyenne globale	-2,7	9,9	0,77	12,7

Forêts non perturbées par l'agriculture uniquement (n=29)

1 of ets from perturbees par 1 agriculture uniquement (ii 27)						
	$\delta^{15}N$ (‰)	C (%)	N (%)	C/N		
R^2	71***	54***	54***	28(*)		
F espèce	14,6***	7,0***	7,0***	2,3(*)		
LSM Cm	-4,7	8,9	0,68	13,1		
LSM Lg	-6,1	6,5	0,53	12,0		
LSM Mp	-2,4	10,7	0,79	13,5		
LSM Mu	-4,0	9,7	0,72	13,4		
LSM Pm	-1,2	12,2	0,90	13,5		
Moyenne globale	-3,7	9,6	0,72	13,1		

Tableau VI: Analyse de variance des effets de l'utilisation ancienne du sol et de l'espèce sur les caractéristiques isotopiques de l'azote du sol rhizosphérique. LSM: estimation des moindres carrés de la moyenne de chaque niveau de facteur. ***: P<0,001, **: P<0,01, *: P<0,05, (*): P<0,1, ns: P>=0,1.

On a analysé le plan complet par une ANOVA classique :

variable (C, N ou δ^{15} N) = cste + effet ancienneté de la forêt (2 niveaux) + effet espèce + effet interaction ancienneté x espèce

Les résultats sont présentés au tableau VI. Les variations de C ne sont pas liées aux utilisations anciennes, un peu à l'espèce. Mais surtout, l'interaction domine. En effet, on constate qu'il y a de fortes différences de C, significatives, entre espèces en forêt non perturbée, et pas en forêt anciennement cultivée. Les valeurs observées en forêt non perturbée sont L.g. (6,5%), C.m. (8,9%), M.u. (9,7%), M.p. (10,7%), P.m. (12,2%). En forêt perturbée par l'agriculture ancienne, les valeurs sont plus élevées, entre 9,4% et 11,2%. C'est L.g. qui montre la plus forte différence entre forêts perturbées et non perturbées (4,5%).

Il y a une très forte corrélation entre les valeurs de C et de N (r=0,95, n=52), qui indiquent donc à peu près la même chose (ce qu'ils indiquent de différent est contenu dans l'information C/N), la teneur en MO de l'échantillon probablement.

Les variations de $\delta^{15}N$ sont fortement liées au mode d'utilisation ancienne, plus bas en moyenne en forêt non perturbée qu'en forêt anciennement cultivée, conformément à ce qu'on avait déjà observé sur du sol prélevé de façon classique. Elles sont liées, beaucoup plus faiblement, à l'espèce, avec une interaction significative entre espèce et ancienne utilisation. Au total, ces deux facteurs expliquent 63% de la variance des 46 mesures de $\delta^{15}N$, ce qui est élevé. La différence de $\delta^{15}N$ entre les sols anciennement perturbés ou non apparaît mieux chez L.g. (4,8% de différence), un peu moins bien chez M.u. (2,2%) et M.p. (0,9%) et pas chez P.m. (0,5%, plus élevé en forêt non perturbée, différence non significative). Les écarts entre espèces (mais pas en intra-espèce) sont bien plus nets dans les forêts non perturbées, et non significatifs en forêt anciennement cultivée.

Même si on ne connaît pas exactement la profondeur de prélèvement, on observe que les valeurs de $\delta^{15}N$ dans la rhizosphère sont beaucoup plus négatives (-3,4% en forêt non perturbée, -1,5% en forêt anciennement cultivée) que les mesures faites antérieurement dans des prélèvements de sols non rhizosphériques sur le même site (en forêt non perturbée par exemple, 2,8% de moins que dans la couche 0-10 cm, et 5,5% de moins que dans la couche 10-20 cm).

Ce résultat intéressant suggère que les plantes influencent fortement l'azote de leur sol rhizosphérique. La biodiversité fonctionnelle serait plus forte en forêt non perturbée, ou chaque espèce trouve ou se fabrique son propre milieu, qu'en forêt perturbée par l'agriculture ancienne, où toutes les espèces supportent le même micro-environnement.

2.5.2.2 - Diversité fonctionnelle de la microflore bactérienne rhizosphérique associée à la flore arborée et herbacée et relation avec les usages antiques des sols.

Frey-Klett P., Boussouel N., Garbaye J., Dupouey J.L., Dambrine E.

L'objectif de cette étude était de rechercher, sur le site gallo-romain de Thuilley-aux-Groseilles (Meurthe-et-Moselle, voir Dupouey *et al.* 2002 pour une description précise du site et des études déjà réalisées), un impact éventuel de l'agriculture gallo-romaine sur les communautés bactériennes du sol. D'une part, nous voulions confirmer l'observation précédente d'un effet de l'espèce sur son fonctionnement rhizosphérique. D'autre part, l'hypothèse a été émise qu'une partie des communautés microbiennes du sol pourrait évoluer très lentement à la suite de la perturbation initiale créée par la mise en culture.

Dans chacune des deux grandes catégories anciennes d'utilisation du sol (non perturbée ou perturbée par l'agriculture gallo-romaine), on a prélevé le sol rhizosphérique de deux espèces poussant sur les deux types de sols (le charme, *Carpinus betulus*, et le lamier jaune, *Lamiastrum galeobdolon*), et le sol non rhizosphérique adjacent. Chacun des échantillons de sol récoltés est composé par mélange de 3 prélèvements effectués à des endroits différents. Ce processus est répété deux fois, afin d'obtenir deux échantillons par type de rhizosphère et par zone. Les prélèvements sont répétés 4 fois, entre le 24/9/02 et le 22/10/02. Pour chacun des 48 échantillons ainsi collectés, les communautés bactériennes ont été caractérisées par leur cinétique de consommation de 96 substrats carbonés différenciés (plaques BIOLOG GN2, figure 10). On a de plus mesuré la densité bactérienne après culture sur milieu nutritif gélosé peu sélectif (TSA 10%) à 3 des 4 dates.

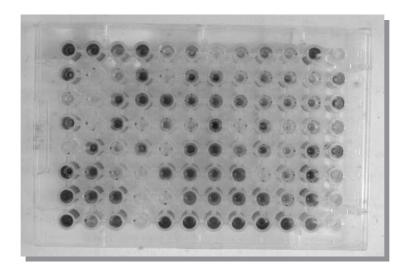


Figure 10 : Plaque BIOLOG : la densité optique de 96 puits contenant chacun un substrat carboné différent et dans lesquels a été mis à incuber un même extrait de sol, permet de caractériser le type de communauté bactérienne présente.

	Sol rhizo	Sol non rhizosphérique	
	Charme	Lamier jaune	
Zone non perturbée	6,2	6,2	6,4
Zone anciennement cultivée	6,5	6,6	6,4

Tableau VII: Densité bactérienne (moyenne de 3 dates), exprimée en log (nombre de colonies formées / g de sol sec). Les différences entre zone anciennement cultivée et zone non perturbée sont significatives, dans le sol rhizosphérique uniquement et pour les deux espèces, à deux dates sur les 3 étudiées selon un modèle d'analyse de variance à deux facteurs (zone et espèce). Selon le même modèle, les différences de densité bactérienne entre espèces ne sont pas significatives.

On observe des effets de l'utilisation ancienne sur la densité bactérienne dans la rhizosphère, qui est significativement plus élevée dans les zones anciennement cultivées (tableau VII).

Les profils de croissance bactérienne sur les 96 substrats ont été analysés par analyse en composantes principales, les individus étant les 48 échantillons récoltés, et les variables les densités optiques des 96 puits moyennées sur l'ensemble de la cinétique de croissance.

Les corrélations entre l'utilisation des substrats contenus dans les 96 puits sont en général faibles : il n'y a pas de types fonctionnels bactériens « naturels » qui apparaissent de façon nette, mais plutôt un continuum pouvant prendre des valeurs indépendantes d'utilisation des 96 substrats. En conséquence, il faut examiner de nombreux axes factoriels pour conserver une part significative de l'information initiale (8 axes pour atteindre 50% de la variance totale). De forts effets de l'espèce sont visibles sur les axes 1 à 3. Des différences significatives entre types d'utilisation ancienne apparaissent sur les axes 4 et 5 (figure 11).

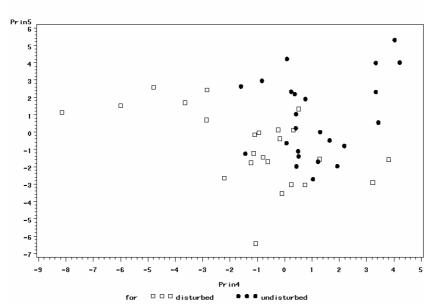


Figure 11 : Analyse en composantes principales (axes 4 et 5) du niveau de consommation de 96 substrats par les communautés bactériennes de 48 échantillons de sols prélevés en forêt non perturbée (cercles noirs) ou anciennement cultivée (carrés blancs).

De façon plus spécifique, on peut identifier une douzaine de substrats pour lesquels de fortes différences apparaissent en fonction du type d'utilisation ancienne. La figure 12 montre la répartition des échantillons pour les puits 47 (acide 3-hydroxybutyrique) et 90 (putrescine). Les cortèges bactériens issus de sols prélevés sur d'anciennes zones cultivées utilisent de façon beaucoup plus importante la putrescine que ceux issus de sols non perturbés. Cette différence s'observe quelle que soit la date et le type de rhizosphère. Dans un autre contexte, la capacité de souches bactériennes à métaboliser la putrescine avait également permis de distinguer des communautés bactériennes en fonction de leur niche écologique : des souches bactériennes isolées d'un sol non rhizosphérique en pépinière forestière métabolisent la putrescine alors que celle isolées de la rhizosphère de semis de Douglas en croissance dans le même sol en sont incapables (Frey *et al.* 1997)

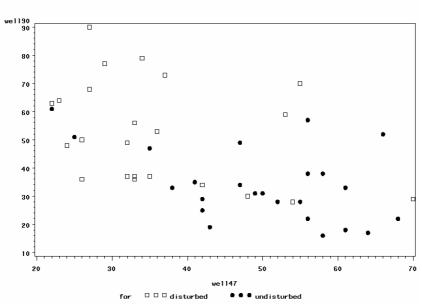


Figure 12 : Niveau de consommation de l'acide 3-hydroxybutyrique (axe horizontal) et de la putrescine (axe vertical) par les communautés bactériennes de 48 échantillons de sols prélevés en forêt non perturbée (cercles noirs) ou anciennement cultivée (carrés blancs).

Finalement, cette méthode confirme l'hypothèse selon laquelle il existerait des différences de fonctionnement, au niveau microbiologique, entre sols anciennement cultivés et sols non perturbés. L'interprétation des différences observées reste cependant difficile, puisque les substrats utilisés dans les plaques BIOLOG pour différencier les communautés bactériennes n'ont pas de rapport évident avec ceux trouvés classiquement dans les sols forestiers. Il reste donc encore à caractériser d'un point de vue fonctionnel ces différentes communautés, en particulier leurs rôles respectifs dans les cycles de l'azote et éventuellement du phosphore.

Finalement, cette méthode confirme l'hypothèse selon laquelle il existerait des différences de fonctionnement, au niveau microbiologique, entre sols anciennement cultivés et sols non perturbés. L'interprétation des différences observées reste cependant difficile, puisqu'une partie seulement des substrats carbonés utilisés dans les plaques BIOLOG pour différencier les communautés bactériennes sont réellement présents dans le sol forestier et les rhizosphères analysées. Par ailleurs, il reste encore à caractériser d'un point de vue fonctionnel les différentes communautés bactériennes isolées, en particulier leurs rôles respectifs dans les cycles de l'azote et éventuellement du phosphore. Enfin, la question du moteur de la variabilité de la végétation ou du fonctionnement biogéochimique des sols entre zones anciennement cultivées et zones non perturbées reste ouverte. En effet à l'issue de ce travail, il ne nous est pas possible de savoir si les différences observées actuellement entre les deux zones résultent de l'établissement dans le passé de communautés microbiennes telluriques différentes, ou bien si à l'inverse, ce sont les différences de végétation et de sol qui ont entraîné une dérive des communautés bactériennes résidentes.

2.5.2.3 - Relation entre la croissance de plantes herbacées différant par leurs exigences écologiques, la microflore rhizosphérique et l'excrétion de carbone (voir aussi article en annexe III).

Nguyen C., Valé T., Dupouey J.L., Dambrine E.

La croissance de 7 espèces différant par leurs affinités écologiques, tout particulièrement en ce qui concerne l'azote (indice N de disponibilité en azote d'Ellenberg variant de 2 à 9) et les concentrations racinaires en carbone soluble ont été corrélées à l'abondance et l'activité des bactéries dans la rhizosphère. Les espèces testées sont *Teucrium chamaedrys* L. (N = 1), *Briza media* L. (N = 2), 71, *Rumex acetosella* L. (N = 2), *Epilobium hirsutum* L. (N = 8), *Eupatorium cannabinum* L. (N = 8), *Rumex obtusifolius* L. (N = 9) et *Urtica dioica* L. (N = 9). Ces plantes ont été cultivées pendant 5 semaines en serre, sur un sol moyennement acide. De larges différences entre les espèces ont été mesurées quand à la concentration en bactéries de la rhizosphère et à leur activité. L'abondance bactérienne est corrélée négativement à la concentration racinaire en carbone soluble, et l'activité microbienne rhizosphérique est corrélée positivement à la biomasse aérienne.

Il apparaît donc que plus la croissance d'une espèce est forte, moins les concentrations en carbone soluble de la racine sont élevées et plus les bactéries sont nombreuses et actives, probablement parce que le carbone soluble des racines les alimente. Du fait que le sol utilisé n'est pas le sol optimal pour toutes les espèces, du point de vue de leurs exigences écologiques, nous ne pouvons en déduire une relation nette avec ces exigences écologiques. Mais ces résultats suggèrent que les espèces à croissance rapide des milieux riches sont capables de modifier assez profondément l'activité bactérienne dans la rhizosphère. Ces résultats vont dans le même sens que ceux observés à partir de l'analyse des plaques BIOLOG.

Nous avons aussi taché de mieux définir les exigences trophiques de certaines espèces en utilisant comme indicateur l'abondance isotopique en ¹⁵N.

2.5.2.4 - Signification écologique du δ^{15} N des espèces forestières.

Dambrine E., Zeller B., Baronnier Y., Ulrich E., Dupouey J.L.

En pulvérisant un placeau de jeunes hêtres avec de l'azote 15, nous avons enrichi artificiellement les arbres, de sorte que les litières soient enrichies en ¹⁵N. La composition de ces litières, en dehors de leur proportion élevée de ¹⁵N, ne se distingue pas de litières normales (Zeller *et*

al., 1998). Récoltées à l'automne, séchées et homogénéisées, ces litières sont déposées à la place des litières naturelles dans différentes hêtraies pour suivre, grâce aux variations de leur composition isotopique, le devenir de l'azote qu'elles contiennent dans les sols et la végétation forestière. Les litières sont disposées à la surface du sol sur deux cercles dont le centre est occupé par le tronc de l'arbre et dont la surface couvre l'essentiel de la zone prospectée par les racines de l'arbre. Les mesures effectuées concernent l'évolution de la masse des litières et les teneurs et rapports isotopiques de l'azote des litières, des humus, des horizons de sol, et des différents organes des arbres et des espèces herbacées de sous-bois. Les mesures sont effectuées parallèlement sur des cercles témoins, non marqués, pour tenir compte des fractionnements naturels.

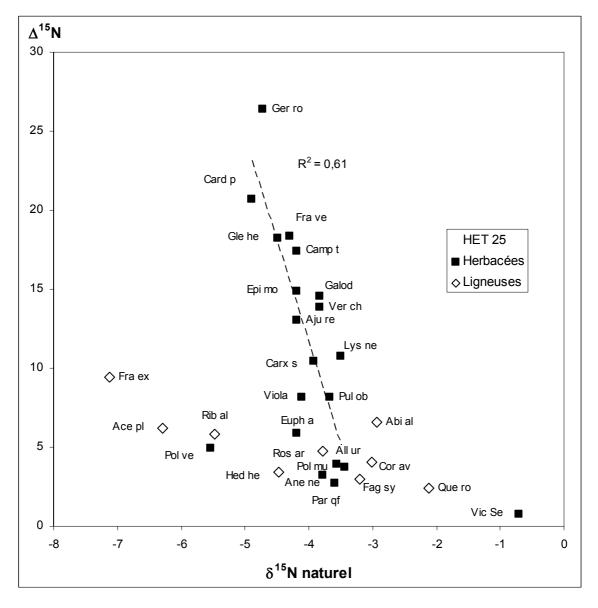


Figure 13 : Relation entre le δ^{15} N naturel (horizontalement) et l'enrichissement observé après marquage de la litière (verticalement) dans la placette RENECOFOR HET 25.

Les mesures montrent que certaines espèces herbacées s'alimentent à partir de la litière en décomposition, d'autres non. Parmi les espèces de sous-bois qui absorbent en plus faible proportion l'azote issu des litières, on trouve le lamier jaune (*Lamiastrum galeobdolon*) et l'aspérule odorante (*Galium odoratum*). Ces espèces à croissance rapide sont caractéristiques de milieux relativement riches en azote minéral et leur fréquence est généralement plus élevée dans les zones anciennement

(ou récemment) perturbées par l'agriculture. Inversement, les jeunes semis d'arbre s'alimentent très peu à partir des litières. Leurs systèmes radiculaires croissent d'abord en direction de la profondeur, pour assurer leurs besoins en eau, et leurs besoins nutritifs sont faibles. La figure 13 montre dans une hêtraie sur calcaire du Jura (placette RENECOFOR HET 25), la relation entre le δ^{15} N naturel des espèces herbacées et ligneuses et l'enrichissement en ^{15}N ($\delta^{15}N$). L'enrichissement en ^{15}N ($\delta^{15}N$) représente la proportion d'azote absorbé à partir de la litière marquée. Il est négativement corrélé à l'abondance isotopique naturelle des plantes, ce qui signifie que le rapport isotopique naturel de l'azote des plantes de sous-bois est un bon indicateur de leur aptitude à utiliser l'azote des litières. On voit que le δ^{15} N des espèces de forêt non perturbée comme *Polygonatum multiflorum*, *Anemone* nemorosa, ou Paris quadrifolia est très faible et correspond à un δ^{15} N élevé, ce qui signifie que ces espèces s'alimentent plutôt à partir des horizons minéraux des sols et qu'elles sont peu consommatrices d'azote nouveau. Inversement des espèces comme Geranium robertianum ou Cardamine pratensis, typiquement rudérales et nitrophiles, prospectent très fortement les litières. Les espèces de forêt non perturbée apparaissent donc bien comme des espèces peu concurrentielles vis à vis de l'azote, par rapport aux rudérales. Cette raison participe sans doute à leur difficulté à recoloniser les milieux anciennement enrichis.

3 – Perspectives scientifiques

3.1 - Analyse spatiale et extension des occupations antiques.

Ce travail n'est plus une urgence scientifique, et nous comptons sur les collaborations engagées, et l'effet d'entraînement de nos résultats et du colloque à venir pour le faire avancer. Néanmoins nous sommes engagés à divers degrés sur plusieurs programmes:

- Le système des plateaux calcaires dépasse pour sa part largement la Lorraine. Nous avons maintenant identifié une quasi continuité d'occupation sur les plateaux calcaires depuis Metz au Nord jusqu'à Dijon au sud. Certaines forêts de Haute-Marne en particulier semblent receler d'importants agrosystèmes gallo-romains, qui restent à cartographier précisément. Des contacts ont été pris avec les associations archéologiques locales. Nous avons aussi entrepris de cartographier et d'identifier, en collaboration avec les archéologues de Dijon, des parcellaires gallo-romains et médiévaux du Châtillonais (thèse A. Jannet, projet d'ACI Histoire et Société soumis). Cartographier des parcellaires intra-forestiers reste un travail long et fastidieux qui ne peut être réalisé que par prospection de surface, à pied. Le développement d'outils de type LIDAR (basé sur l'exploitation de signaux radars aéroportés) permet d'entrevoir la possibilité de cartographies aériennes. Nos bases cartographiques déjà existantes rendraient particulièrement intéressant un test de cette nouvelle méthode dans les forêts de Lorraine.
- Nous manquons dans la plupart de nos sites d'une archive indiscutable permettant de caractériser avec exactitude la dynamique des occupations et d'analyser les conséquences à long terme de ces occupations sur la végétation forestière. L'étude anthracologique originale effectuée en forêt de Tronçais nous a fourni des informations importantes mais trop parcellaires par rapport au temps et au travail investi pour que nous la poursuivions directement. Par contre, nous avons entrepris une collaboration avec les palynologues pour sonder des mardelles intraforestières. Ces cavités, très fréquentes sur le plateau Lorrain, renferment des épaisseurs importantes de tourbe, et des séquences palynologiques en remarquable état de conservation. Des résultats préliminaires indiquent une origine très probablement anthropique de certaines de ces mardelles (projet IFB, en cours). Nous attendons beaucoup de leur étude scientifique dans le contexte de l'occupation intense de ces zones à l'époque antique. De plus, au-delà de leur intérêt potentiel pour la reconstruction stratigraphique des successions d'utilisation du sol, ces mardelles représentent le plus souvent un patrimoine exceptionnel du point de vue de leur biodiversité actuelle, objet d'inventaires et de cartographies soigneuses. Si ces mardelles ont en effet une origine anthropique, il s'agirait là d'un nouvel exemple d'enrichissement massif et ancien de la diversité forestière par une activité humaine dont il reste à préciser les motivations exactes.

Par contre, nous pensons que les résultats que nous avons accumulés depuis plusieurs années devraient connaître des développements dans les domaines professionnels forestiers et environnementaux, par une meilleure prise en compte de l'histoire de l'utilisation du sol lors des

décisions de gestion, que ce soit à but de production ou patrimonial. Il nous semble donc aujourd'hui pertinent de lancer un projet de réalisation d'une carte des forêts anciennes de France, en arrêtant dans un premier temps l'ancienneté des forêts à la date du cadastre napoléonien. Nous essayons de lancer cette vaste entreprise.

3.2 - Relation entre biodiversité et utilisation ancienne. Mécanismes d'apparition et de maintien.

Le thème de la biodiversité floristique et de son maintien a, comme on l'a vu plus haut, déjà livré quelques clefs. Il faut souligner que pour d'importantes régions biogéographiques, telles que le monde méditerranéen ou montagnard, très peu d'études équivalentes aux nôtres ont été menées. On ne connaît donc que mal, dans ces régions, les espèces qui marquent les différents types d'utilisation ancienne. De plus, même dans les régions continentales d'Europe, les mieux étudiées, nous ne savons encore que mal pourquoi certaines espèces marquent des préférences pour l'une ou l'autre des utilisations anciennes. Les principales questions qui demeurent sont liées à la colonisation ou au maintien de certaines espèces sur les zones fertilisées ou non, et les outils de génétique moléculaire sont bienvenus. Nous n'avons abordé pour l'instant l'impact des usages anciens sur les communautés biotiques que pour les phanérogames et les bactéries du sol. Il serait intéressant de tester cet impact sur d'autres composantes importantes de la biodiversité. Trois projets sont envisagés à court terme :

- mieux caractériser la variabilité génétique de *Vinca minor* et peut-être de quelques autres espèces associées, telle *Ribes uva-crispa*. Quelle est l'extension géographique du clone de pervenche repéré pour l'instant dans deux sites gallo-romains, à plus de 10 km de distance ? Y a-t-il homogénéité régionale ou existe-t-il un lien avec les occupations gallo-romaines ?
- étudier l'impact des utilisations anciennes sur les communautés fongiques, et en particulier les champignons ectomycorhyziens dont on sait qu'ils jouent un rôle clef dans le cycle du phosphore. Un projet a été déposé en ce sens. De façon plus générale, la dynamique du phosphore dans les sols forestiers est peu étudiée en France. Ne serait-ce que pour mieux caractériser les formes de phosphore du sol les plus adaptées à la recherche de traces d'utilisation agraire ancienne, des travaux nouveaux devraient être lancés.
- Les communautés d'insectes. Un projet vient de démarrer (IFB).

A plus long terme, il serait intéressant d'étudier plus précisément les mécanismes qui régissent la dynamique des communautés microbiennes des sols lors des recolonisations d'anciennes terres abandonnées.

4 – Acquis et perspectives en termes de transfert

Notre projet visait en priorité à répondre à des questions plutôt fondamentales. Mais il débouche sur plusieurs perspectives appliquées, plus ou moins avancées.

4.1 - Nécessité de la prise en compte de l'histoire dans la gestion des forêts.

La pérennité, voire l'irréversibilité des effets de l'agriculture ancienne placent ce facteur quasiment au même rang d'importance que les facteurs stationnels classiques (topographie, substrat...) pour ce qui est de la caractérisation de la diversité des milieux forestiers et de leurs potentialités. Notre étude était la première à aborder la relation station-production en prenant en compte ce facteur. Nos résultats indiquent des différences très fortes de productivité (plus forte sur anciennes cultures), de qualité du bois (épicéa plus atteint par la pourriture du cœur à *Fomes annosus* sur anciennes cultures) selon les usages, du moins d'époque moderne. L'histoire marque aussi fortement la distribution actuelle des essences dans le paysage : rappelons par exemple que les chênes pédonculés occupent encore souvent les vides créés dès l'époque médiévale par la surexploitation forestière, comme en forêt de Tronçais par exemple. L'intensité des dépérissements forestiers (chênes en forêt de Tronçais, sapin ou épicéa dans les Vosges) peut ainsi plus ou moins directement dépendre de la carte des occupations humaines anciennes. Pour l'époque gallo-romaine, l'analyse foliaire des chênes sur anciennes cultures montre des niveaux de nutrition en phosphore satisfaisants et déficients sur forêts

non perturbées. On comprend que l'adéquation station-essence puisse se raisonner aussi à partir de cartes historiques.

Au-delà de ces aspects liés à la productivité, à la durabilité et à la qualité, nos travaux ont aussi des conséquences importantes en terme de gestion de la biodiversité « ordinaire », puisque les cortèges floristiques des zones anciennement cultivées diffèrent fortement des zones non perturbées. La gestion conservatoire du patrimoine végétal bénéficiera donc d'une meilleure prise en compte des aspects historiques. Ce bénéfice est à double sens : la cartographie des occupations anciennes permettra en effet de mieux connaître le milieu forestier mais, à l'inverse, la connaissance des caractéristiques environnementales très particulières des zones anciennement cultivées sera précieuse à l'historien et l'archéologue, en lui fournissant de nouveaux indicateurs d'occupations anciennes (espèces indicatrices, chimie des sols). D'un point de vue opérationnel, dans la mesure où la composition floristique de la végétation est l'outil utilisé pour bâtir les catalogues de station, les déterminismes écologiques de ces variations doivent être connus.

Nos résultats fournissent enfin des références pour évaluer l'impact à très long terme de modifications environnementales induites par l'homme. Ils permettent par exemple d'éclairer d'un œil nouveau les effets à long terme des amendements calciques aujourd'hui entrepris dans les forêts européennes.

4.2 - Mise en œuvre concrète d'une meilleure prise en compte de l'histoire dans la gestion forestière.

- Epoque moderne

Pour les raisons évoquées précédemment, l'ancienneté des forêts doit être un paramètre à intégrer dans la gestion des forêts, au même titre que la typologie des stations forestières ou des peuplements par exemple, qu'elle vient compléter. Il est bien prévu dans les aménagements forestiers une partie historique, mais celle-ci est souvent très partiellement renseignée et surtout, elle ne prend en compte l'histoire qu'en tant qu'élément patrimonial et non outil de gestion. Pour être opérationnelle, cette connaissance sur l'ancienneté des forêts devrait être disponible pour le gestionnaire sous forme directement cartographique, intégrée dans des systèmes d'information géographique lorsqu'ils existent.

Nous proposons comme une étape importante pour la gestion des milieux forestiers du territoire national l'établissement d'une carte d'ancienneté des forêts. Cet objectif n'est pas si utopique qu'il pourrait paraître à première vue. L'Angleterre s'est doté d'une carte nationale des forêts anciennes (forêts déjà existantes en 1600) au 1/25000, disponible sur Internet et très utilisée. Nous avons testé au cours de ce projet plusieurs approches pour atteindre un but similaire. Le minimum de la couverture forestière française a été atteint autour des années 1830. La carte des forêts françaises à cette époque permettrait donc de localiser une large part des forêts anciennes de France. Le tableau VIII indique les principales sources de données utilisables pour cartographier l'état des forêts à la charnière XVIIIème siècle. Si la carte de Cassini offre la possibilité d'aboutir assez rapidement à un résultat (devis établi à 30 K€ pour une digitalisation des contours forestiers à l'échelle de la France entière), c'est la solution la moins intéressante en terme de précision et d'échelle. A l'opposé, la digitalisation du cadastre napoléonien, solution la plus adéquate en terme d'échelle, de précision et de date n'est praticable que pour de petites surfaces. La digitalisation des minutes couleur de la carte d'Etat-Major au 1/40 000, en grande partie basées sur le cadastre napoléonien, semble une voie médiane prometteuse. Une convention est en cours d'établissement avec l'IGN, détenteur de ces minutes, afin de pouvoir y accéder. Nous avons démarré des tests de scannage par nos soins d'Ektachromes réalisés par l'IGN, puis de digitalisation des contours forestiers et de vérification de la précision de ces cartes. D'autres organismes sont intéressés par ce projet (WWF, ENGREF, IFN, Région Lorraine).

Carte	couverture géographique	date des levés	échelle
mappes sardes	Savoie et Haute-Savoie	1728-1738	1:2 400
cartes des Naudin	Lorraine - Alsace - Champagne/Ardennes	1728-1739	1:28 800
cartes de Bourcet	Haut Dauphiné	1749-1754	-
Carte dite de Cassini	France entière	1750-1815	1:86 400
plan masse de cultures	16 000 communes	1802-1808	1:5 000
Cadastre napoléonien	France entière	1808-1850	1:500 à 1:5 000
minutes de la carte d'Etat-Major	France entière	1818-1881	1:40 000
carte d'Etat-Major	France entière	1818-1881	1:80 000

Tableau VIII : Inventaire des principales sources cartographiques possibles pour la réalisation d'une carte des forêts anciennes de France.

Au-delà des aménagements forestiers, de nombreux autres acteurs du monde forestier sont directement concernés par cette nécessité d'une connaissance plus précise de l'histoire de l'utilisation du sol. Nos collègues chercheurs au premier chef, qui devraient mieux prendre en compte ce paramètre lors des échantillonnages, inventaires de terrain, installations de dispositifs en forêt... L'Inventaire forestier national (IFN) pourrait apporter une information précieuse s'il intégrait cette problématique dans ses relevés. Certains pays comme la Suisse notent déjà la présence de murets anciens lors de leurs inventaires nationaux. Nous allons proposer à l'IFN une très courte liste de paramètres à prendre en compte.

Auprès de ces divers acteurs, le transfert de nos résultats passe aussi par la réalisation de documents pédagogiques présentant comment, d'une part, identifier des traces d'anciennes occupations humaines en forêt et quelles sont les espèces végétales les plus caractéristiques de ces usages anciens.

- Epoques anciennes

Pour les époques plus anciennes, il n'est le plus souvent pas possible aujourd'hui de dresser des cartes de type d'utilisation du sol. Notre approche a consisté pour ces périodes à élaborer une base de données des sites d'intérêt en forêt (Maussion 2003). Construite à partir d'un dépouillement minutieux de la bibliographie et de l'interrogation des bases archéologiques nationales Dracar et, à l'échelle de certaines régions, Patriarche, cette base recèle déjà près de 10 000 mentions d'activités humaines anciennes (agriculture, élevage, artisanat) dans les forêts actuelles. On trouvera en fin d'annexe I (p. 80) un exemple de fiche de cette base. Cette base est soumise a des droits d'accès particuliers, car elle recèle des informations sensibles pour la protection du patrimoine archéologique.

Les forêts ont permis la conservation de traces remarquables des utilisations agraires anciennes, contrairement aux cultures où ces traces sont régulièrement brisées et enfouies. Ces traces, inaccessibles aux outils classiques de la télédétection, sont restées longtemps ignorées. Les sciences forestières et l'archéologie ont encore beaucoup de chemin à parcourir ensemble!

5 – Articles cités dans le texte (les articles des participants du présent projet sont regroupés au paragraphe suivant).

Becker M., 1979, Influence du traitement sylvicole sur la flore forestière : cas de la futaie et du taillis-sous-futaie, *Vegetatio* 40 (3), 155-161.

Dorken M.E., Eckert C.G., 2001, Severely reduced sexual reproduction in northern populations of a clonal plant, *Decodon verticillatus* (*Lythraceae*), *J. Ecology* 89 (3), 339-350.

Doyle J.J., Doyle J.L., 1990, Isolation of plant DNA from fresh tissue, *Focus* 12, 13-15.

Eckert C.G., Barrett S.C.H., 1993, Clonal reproduction and patterns of genotypic diversity in *Decodon verticillatus (Lythraceae)*, *American Journal of Botany* 80 (10), 1175-1182.

Escaravage N., Questiau S., Pornon A., Doche B., Taberlet P., 1998, Clonal diversity in a *Rhododendron ferrugineum* L. (*Ericaceae*) population inferred from AFLP markers, *Molecular Ecology* 7, 975-982.

Frey P., Frey-Klett P., Garbaye J., Berge O., Heulin T., 1997, Metabolic and genotypic fingerprinting of fluorescent pseudomonads associated with the Douglas fir-*Laccaria bicolor* mycorrhizosphere, *Applied and Environmental Microbiology* 63, 1852-1860.

Gabrielsen M., Brochmann C., 1998, Sex after all: high levels of diversity detected in the arctic clonal plant *Saxifraga cernua* using RAPD markers, *Molecular Ecology* 7, 1701-1708.

Harada Y., Iwasa Y., 1996, Analyses of spatial patterns and population processes of clonal plants, *Researches in Population Ecology* 38 (2), 153-164.

Honnay O., Degroote B., Hermy M., 1998, Ancient-forest plant species in Western Belgium: a species list, *Journal of Biogeography* 19, 195–204.

Le Tacon F., Sélosse M.A., Gosselin F., 2001, Biodiversité, fonctionnement des écosystèmes et gestion forestière : part. 2 Interventions sylvicoles et biodiversité, *Revue forestière française* 53 (1), 55-80.

Schulz K., Thelen C., 2000, Impact and control of *Vinca minor* L. in an Illinois forest preserve (USA), *Natural Areas Journal* 20, 189-196.

Watkinson A.R., Powell J.C., 1993, Seedling recruitment and the maintenance of clonal diversity in plant populations. A computer simulation of *Ranunculus repens*, *J. Ecology* 81 (4), 707-717.

Xu C.Y., Zhang W.J., Fu C.Z., Lu B.R., 2003, Genetic diversity of alligator weed in China by RAPD analysis, *Biodiversity & Conservation* 12 (4), 637-645.

6 - Valorisation des résultats.

Nous reprenons ici les publications, conférences ou cours réalisés au cours des deux projets financés par le GIP Ecofor (1998-2000 et 2001-2004) mais aussi, afin de faciliter la recherche bibliographique, quelques publications antérieures sur le même thème. Il faut noter un article dans *Ecology*, revue à fort coefficient d'impact en écologie, et une synthèse en français dans la Revue forestière française, ainsi que de nombreuses communications à des colloques, nationaux ou internationaux. Les résultats de nos recherches sont régulièrement enseignés à l'Université, dans les DEA de Biologie forestière d'une part et de Pédologie d'autre part, où nous intervenons. Un point presse organisé par l'INRA a débouché sur une importante valorisation de ce projet dans les médias. Trois nouvelles publications scientifiques sont en cours (biodiversité et archéologie en forêt de Tronçais, interaction sylviculture-histoire sur la biodiversité en forêt de Saint-Amond, variabilité des cortèges microbiens en forêt de Thuilley-aux-Groseilles).

Mais surtout, nous organisons, pour la fin de ce projet, un colloque francophone sur le thème "forêt et archéologie" (Nancy, 14-16 décembre 2004, informations sur http://www.nancy.inra.fr/sylva2004/). Il nous est apparu en effet, à l'occasion des multiples contacts établis en France au cours de nos travaux avec les archéologues, les gestionnaires de la forêt et les biologistes, que les échanges sont encore insuffisants entre ces trois disciplines.

6.1 - Articles dans des revues à comité de lecture :

Koerner W., Dupouey J.L., Dambrine E., Benoit M., 1997, Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, *Journal of Ecology* 85, 351-358

Jussy J. H., Koerner W., Dambrine E., Dupouey J. L., Benoit M., 1999, Influence of former agricultural land use on net nitrate production in forest soils, *European Journal of Soil Science* 53 (3), 367-374.

Koerner W., Benoit M., Dambrine E., Dupouey J. L., 1999, Influence des anciennes pratiques agricoles sur la végétation et les sols des anciennes forêts reboisées dans le massif vosgien, *Revue Forestière Française* 51 (2), 231-238.

Koerner W., Dambrine E., Dupouey J. L., Benoît M., 1999, The δ^{15} N of forest soil and understorey vegetation reflects the former agricultural land use, *Oecologia* 121 (3), 421-425.

- Jussy J. H., Koerner W., Moares C., Dambrine E., Dupouey J. L., Zeller B., Benoit M., 2000, Influence de l'usage ancien des sols sur le cycle de l'azote dans les forêts vosgiennes, *Etude et Gestion des Sols* 8, 91-102.
- Moares C., Sciama D., Dambrine E., Dupouey J.L., Gégout J.C., Bréchet C., 2001, Evolution des stocks de carbone et de la disponibilité de l'azote lors de la dynamique de recolonisation des prairies abandonnées du Jura, *Etude et Gestion des Sols* 2, 119-144.
- **Dupouey J.L., Dambrine E., Moares C., Laffite J.D.**, 2002, Irreversible impact of past land use on forest biodiversity, *Ecology* 83 (11), 2978–2984.
- **Dupouey J.L., Sciama D., Koerner W., Dambrine E., Rameau J.C.**, 2002, La végétation des forêts anciennes, *Revue Forestière Française* 54 (6), 521-532.
- **Laffite J.D, Dambrine E, Dupouey J.L., Leroy M.**, 2002, Le parcellaire Gallo-Romain de la Forêt Domaniale de Saint-Amond à Favières (Meurthe et Moselle), *Revue Archéologique de l'Est* 51, 465-476.
- **Prévosto B., Curt T., Moares C., Dambrine E., Poutier F, Pollier B.**, 2002, Les sols sous boisements spontanés de bouleau et de pin sylvestre dans la Chaîne des Puys. Influence du substrat et de l'utilisation ancienne. Conséquences sur la végétation, *Etude et Gestion des Sols* 9, 250-257.
- Colin-Belgrand M., Dambrine E, Bienaimé S., Nys C., Turpault M.-P., 2003, The influence of tree roots on N mineralisation, *Scandinavian Journal of Forest Research* 18, 260-268.
- **Prévosto B, Dambrine E., Moares C., Curt T.**, 2003, Soils and vegetation characteristics of birch and Scots pine natural woodlands according to tephras chemistry and past land use in a volcanic mountain range of the French Massif Central, *Catena* 56, 239-261.
- Dambrine E., Dupouey J.L., Laüt L. Humbert L., Thinon M., Beaufils T, Richard H., 2004, Legacies of Roman agriculture on present forest biodiversity (soumis).
- **Nguyen C., Valé M., Dambrine E., Dupouey J.L.** 2004, Microbial activity and abundance in the rhizosphere of seven herbaceous species cultivated under controlled conditions: relationships with plant growth and root C concentration (soumis).

6.2 - Communications à des colloques :

- Koerner W., Jussy J.H., Dambrine E., Dupouey J.L., Benoît M., 1999, Utilisation du δ^{15} N des sols et des plantes pour tracer les anciennes pratiques agricoles en forêt, "Homme, climat, environnement : outils d'analyses et approches pluridisciplinaires", GDR 489 : ECOFIT, Cargèse, 12-17 avril [présentation orale].
- Moares C., Dambrine E., Dupouey J.L., Pollier B., 1999, Le δ^{15} N des sols forestiers actuels, témoin de leurs usages antiques ? 16^{emes} Journées françaises de spectrométrie de masse, 6-9 septembre, Nancy, [poster].
- **Dambrine E., Dupouey J.L., Moares C., Laffite J.D.**, 2000, Effets de l'usage antique des sols sur l'écologie des forêts actuelles, "Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols", 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, AFES, 25-28 avril, Nancy [tournée de terrain avec livret].
- **Dupouey J.L.,** 2000, The role of history in forest ecosystem functioning, Pan European Programme for the Intensive Monitoring of Forest Ecosystems, 5th meeting, 20-22 septembre, Heerenveen, Hollande [présentation orale].
- Georges-Leroy M., Dambrine E., Dupouey J.L., Laffite J.D., 2000, Habitats gallo-romains et structures agraires fossiles du plateau de la Côte bajocienne (Meurthe-et-Moselle et Vosges), Etat de la question, in Vème Colloque AGER, Actualité de la recherche en histoire et archéologie agraires, Besançon, 19-20 septembre [poster].
- Jussy J.H., Koerner W., Moares C., Dambrine E., Dupouey J.L., Zeller B., Benoît M., 2000, Influence de l'usage ancien des sols sur le cycle de l'azote dans les forêts vosgiennes, "Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols", 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, AFES, 25-28 avril, Nancy [présentation orale].
- Koerner W., Benoît M., Dambrine E., Dupouey J.L., 2000, Influence des anciennes pratiques agricoles sur la végétation et les sols des forêts créées dans le massif vosgien, In: "Environnement, forêt et société, XVIe-XXe siècle. Forêts et troupeaux". Journées d'Etudes du Groupe d'Histoire des Forêts Françaises, Paris, 29 janvier, A. Corvol (Ed.), CNRS [présentation orale].
- **Koerner W., Dupouey J.L., Benoît M., Dambrine E.,** 2000, L'ortie dans les forêts du massif vosgien. Et pourquoi pas ? Colloque "Patrimoines Naturels Forestiers Gestion de la biodiversité : Réalisations concrètes", Nancy, AFCVE-ENGREF, 28-30 novembre [poster].

- **Moares C., Dambrine E., Dupouey J.L.,** 2000, Effets de l'usage antique des sols sur l'écologie des forêts actuelles, Journées d'Ecologie Fonctionnelle, La Londe Les Maures, 6-9 mars [présentation orale].
- **Moares C., Sciama D., Dambrine E., Dupouey J.L., Zeller B.,** 2000, Etude synchronique des propriétés des sols sur substrats calcaires au cours de l'évolution terre cultivée-forêt, "Les enjeux actuels de l'anthropisation des sols", 6^{èmes} Journées Nationales de l'Etude des Sols, AFES, 25-28 avril, Nancy [présentation orale].
- **Dupouey J.L., Koerner W., Dambrine E.**, 2001, Ancienneté et naturalité des forêts : des critères déterminants pour la végétation forestière ? Journées Scientifiques et Techniques de l'INRA, 20-22 juin, "Gestion de la végétation forestière : enjeux et évolutions" [présentation orale].
- **Dambrine E. & Dupouey J.L.,** 2002, Incidence des pratiques agricoles passées sur la biodiversité spécifique en milieu forestier dans l'Est de la France, Biodiversité et gestion forestière, GIP-ECOFOR, Paris, 12-13 février [présentation orale].
- **Dupouey J.L. & Dambrine E.,** 2002, Importance spatiale et causes de l'impact des pratiques agricoles anciennes en France, Biodiversité et gestion forestière, GIP-ECOFOR, Paris, 12-13 février [poster].
- **Dupouey J.L., Dambrine E., Koerner W.,** 2002, Ancient land-use and current ecosystems functions: a tour in the past, « 4th International Conference on Forest Vegetation Management: Technical, Environmental and Economic Challenges », 17-21 juin, Nancy [tournée de terrain avec livret].
- **Prévosto B, Dambrine E., Curt T., Moares C.,** 2002, Vegetation and soils of natural woodlands in a volcanic mountain: impact of tephras chemistry and past land use, 16th Annual Meeting of the Society for Conservation Biology, 14-19 juillet, Canterbury, UK [présentation orale].
- **Bachacou J., Koerner W., Cosserat-Mangeot R., Dupouey J.L.,** 2003, Delineating ancient woodland boundaries: georeferencing errors in Naudin maps, "History and Forest Biodiversity Challenges for Conservation", IUFRO symposium, 13-15 janvier, Université Catholique de Leuven, Belgique [poster].
- **Dupouey J.L.,** 2003, L'impact de l'homme sur la biodiversité : les interactions forêt agriculture, « La biodiversité végétale Des plantes pour l'avenir », colloque AFCEV-BRG, Troyes, 13-15 novembre 2003 [présentation orale]
- **Dupouey J.L., Dambrine E., Laffite J.D., Laüt L., Bertrand E.,** 2003, Large impact of former Roman agriculture on vegetation diversity in present day forests, "History and Forest Biodiversity Challenges for Conservation", IUFRO symposium, 13-15 janvier, Université Catholique de Leuven, Belgique [présentation orale].
- Frey-Klett P., Boussouel N., Dupouey J.L., Dambrine E., 2003, Impact of past land use on bacterial communities in forest soils, "History and Forest Biodiversity Challenges for Conservation", IUFRO symposium, 13-15 janvier, Université Catholique de Leuven, Belgique [poster].
- Georges-Leroy M., Dambrine E., Dupouey J.L., Laffite J.D., 2003, Structures agraires fossiles du plateau de la Côte bajocienne (Meurthe-et-Moselle et Vosges) Approches méthodologiques, Table Ronde "Sols et structures agraires", ADRAL-DRAC-INRAP, 10-11 octobre, Musée de Sarrebourg [présentation orale].
- **Prévosto B., Curt T., Dambrine E., Coquillard P.,** 2003, Natural tree colonization in French Massif Central according to past land uses: impact on stand structure and vegetation, "History and Forest Biodiversity Challenges for Conservation", IUFRO symposium, 13-15 janvier, Université Catholique de Leuven, Belgique [présentation orale].
- **Rochel X., Dupouey J.L.,** 2003, Ancient forestry practices and present landscapes in the Vosges mountains, France, "History and Forest Biodiversity Challenges for Conservation", IUFRO symposium, 13-15 janvier, Université Catholique de Leuven, Belgique [poster].
- **Rochel X., Dupouey J.L.,** 2003, Ancient forestry practices and present landscapes in the Vosges mountains, France, The sixth Regional Biodiversity Conference and International Conference, "Working and Walking in the Footsteps of Ghosts The ecology, archaeology and management of ancient woods and associated land coincidence, conflict and compromise, or sustainability?", 29 mai-1^{ier} juin, Sheffield, UK [poster].
- Valé M., Nguyen C., Dupouey J.L., Dambrine E., 2003, Densités microbiennes dans la rhizosphère de plantes de milieux riches et de milieux pauvres, Journées d'Ecologie Fonctionnelle, 12-14 mars, Nancy [poster].

- **Dambrine E., Dupouey J.L., Humbert L., Laffite J.D., Laüt L., Leroy M., Thinon M.,** 2004, The memory of forest ecosystems. Impact of former land use on soil properties and biodiversity in present forests, Eurosoil, 4-12 septembre, Freiburg, Allemagne [présentation orale].
- **Dambrine E., Dupouey J.L., Laüt L., Humbert L., Thinon M.,** 2004, Le pédologue, le botaniste et l'archéologue; un croisement inter-ethnique fertile pour comprendre la distribution des sols en forêt de Tronçais, 8èmes Journées Nationales d'Etude des Sols, 26-28 octobre, Bordeaux [présentation orale].
- **Dupouey J.L., Georges-Leroy M., Laffite J.D., Dambrine E., Laüt L.,** 2004, Les plantes herbacées dans les forêts actuelles : des bio-indicateurs de pratiques anciennes ?, « Est-ce que la paléobotanique casse des briques ? », ADRAL-DRAC-INRAP, 11 juin, Laquenexy [présentation orale].
- **Laüt L., Dambrine E., Dupouey J.L., Humbert L.,** 2004, La forêt domaniale de Tronçais (Allier) : approches archéologique et environnementale de l'occupation antique, VIIème colloque AGER, « Silva et Saltus en Gaule romaine : Dynamique et gestion des forets et des zones rurales marginales (friches, landes, marais...) », Rennes, 27-28 octobre [présentation orale].

6.3 - Publications de congrès et chapitres d'ouvrages :

- **Koerner W., Dupouey J. L., Dambrine E., Benoit M.**, 1998, L'évolution des espaces forestiers et les conséquences pour leurs fertilités, *In* « Des bois dont on fait les Vosges. Une histoire de la forêt vosgienne », Epinal, 174-183.
- **Koerner W., Benoît M., Dambrine E., Dupouey J.L.,** 2001, Influence des anciennes pratiques agricoles sur la végétation et les sols des forêts créées dans le massif vosgien, In: "Forêts et troupeaux", *Cahiers d'étude* 11, Forêt, Environnement et Société, XVI^e-XX^e siècle. A. Corvol (Ed.), IHMC-CNRS, 20-25.
- **Koerner W., Dupouey J.L., Benoît M., Dambrine E.,** 2001, L'ortie dans la forêt du massif vosgien. Et pourquoi pas ? "Patrimoines Naturels Forestiers- Gestion de la biodiversité : Réalisations concrètes", *Revue forestière française* 53 (n° spécial), 323-324.
- **Georges-Leroy M., Dambrine E., Dupouey J.L., Laffite J.D.,** 2003, Structures agraires fossiles du plateau de la Côte bajocienne (Meurthe-et-Moselle et Vosges) Approches méthodologiques, Table Ronde "Sols et structures agraires", ADRAL-DRAC-INRAP, 10-11 octobre, Musée de Sarrebourg, Document de travail, 70-79.
- Georges-Leroy M., Dambrine E., Dupouey J.L., Laffite J.D., 2003, Habitats gallo-romains et structures agraires fossiles du plateau de la Côte bajocienne (Meurthe-et-Moselle et Vosges). Etat de la question, In « Actualité de la recherche en histoire et archéologie agraires », Presses Universitaires Franc-Comtoises, *Annales Littéraires de l'Université de Franche-Comté*, volume 764, Série «Environnement, Sociétés et Archéologie», 5, 173-180.
- Koerner W., Dupouey J.L., Buisson-Delandre A., Bachacou J., Bienaimé E., Riéla R., Corvisier de Villèle M.A., Gloersen E., 2003, De la carte des Naudin à la carte IGN: précision et déformations spatiales de la feuille de Nancy, In «Les Naudin entre Meuse et Vosges», Médiathèque du Pontiffroy, Metz, 47-56.
- Laüt L., Dambrine E., Dupouey J.L., Humbert L., 2004, La forêt domaniale de Tronçais (Allier): approches archéologique et environnementale de l'occupation antique, In « Silva et Saltus en Gaule romaine: Dynamique et gestion des forets et des zones rurales marginales (friches, landes, marais...) », Presses Universitaires de Rennes, coll. "Archéologie, Culture", sous presse.
- **Prévosto B., Curt T., Dambrine E., Coquillard P.,** 2004, Natural tree colonization of former agricultural lands in the French Massif Central: impact of past land use on stand structure, soil characteristics and understorey vegetation. In Honnay O., Verheyen K., Bossuyt B., Hermy M. (eds.), "Forest biodiversity: lessons from history conservation", CABI Publishing, sous presse.

6.4 - Rapports d'études :

Laffite J.D., 1998, Opération de sondages archéologiques dans la cadre du Programme Biodiversité de L'INRA-Nancy, Forêt Domaniale de Saint-Amond, commune de Favières, DRAC-Metz, AFAN, 23 p. + ann.

Dambrine E., Dupouey J.L., 2000, Incidence des pratiques agricoles passées sur la biodiversité spécifique en milieu forestier dans l'Est de la France, Rapport final contrat GIP-ECOFOR Biodiversité, 9 p.+ ann.

Laffite J.D., Georges-Leroy M., Dambrine E., Dupouey J.L., 2000, Habitats et structures agraires fossiles du plateau de la côte bajocienne de Pont-à-Mousson (Meurthe-et-Moselle) à Neufchâteau (Vosges) - Prospection thématique, Rapport 2000, SRA-DRAC Lorraine, Metz, 25 p. + ann

Laüt L., 2000, Prospection-Inventaire dans la forêt domaniale de Tronçais (Allier), Document final de synthèse, 48 p. + ann.

Laüt L., 2001, L'occupation du sol dans l'Antiquité en forêt de Tronçais - Prospection-Inventaire - Prospection thématique annuelle - Sondages - Document Final de Synthèse, 88 p. + ann.

Laffite J.D., 2002, Forêt Domaniale de Haye - Document final de synthèse de fouille d'évaluation archéologique, INRAP Grand Est / SRA-DRAC Lorraine, Metz, 20 p. + ann.

Laffite J.D., Georges-Leroy M., Dambrine E., Dupouey J.L., 2002, Habitats et structures agraires fossiles du plateau de la côte bajocienne de Pont-à-Mousson (Meurthe-et-Moselle) à Neufchâteau (Vosges) - Prospection thématique, Rapport 2001-2002, SRA-DRAC Lorraine, Metz, 17 p. + ann.

Maussion A., 2003, Occupation ancienne du sol et milieux forestiers actuels en France métropolitaine - Synthèse bibliographique, 54 p. + ann.

Richard C., 2003, Forêt de Tronçais, Le Brethon et Saint-Bonnet-Tronçais (03), tests polliniques, Université de Besançon, rapport.

6.5 - Mémoires d'étudiants :

Koerner W., 1993, Histoire de l'utilisation des sols et dépérissement de la forêt vosgienne à l'échelle locale et parcellaire, Maîtrise, Université Paris I, 128p.

Koerner W., 1994, Histoire des parcelles forestières: d'un passé agricole à une fertilité actuelle du milieu, DEA Géographie, Université Paris I, 61p.

Hemmer F., 1997, Conséquences des anciennes pratiques agricoles sur la productivité forestière actuelle, B.T.S.A. Gestion forestière - Mirecourt, 25 p. + ann.

Jussy J.H., 1998, Minéralisation, nitrification et prélèvement racinaire dans des écosystèmes forestiers sur sols acides. Rôle de l'essence, du stade de développement du peuplement et de l'usage ancien des sols, Thèse, Université H. Poincaré, Nancy, 161 p.

Koerner W., 1999, Conséquences des anciennes pratiques agricoles sur la flore, la fertilité des sols et la production forestière dans les Vosges, Thèse Géographie Université Paris I, 235 p.

Marchand A., 1999, Influence de l'usage antique des sols sur la fertilité et la biodiversité en forêt. Parcellaire de Saint-Amond, Mémoire BTS Forêt.

Pierron A., 1999, Influence de l'usage antique des sols sur la fertilité et la biodiversité en forêt. Parcellaire de Thuilley. Mémoire BTS Forêt.

Sciama D., 1999, Dynamique de la végétation forestière dans les terrains en déprise agricole en Petite Montagne jurassienne, Thèse de Doctorat de l'ENGREF, 19/11/99, Nancy, 268 p. + ann.

Bourdet J.R., 2000, Analyse spatiale des relations entre utilisation ancienne du sol et caractéristiques du milieu forestier, Mémoire 3^{ème} année ENITA-Bordeaux, 126 p. + ann.

Buisson A., 2001, Les cartes Naudin à travers les S.I.G., DEA Patrimoine, Aménagement et Environnement, Université de Nancy 2, INRA-Nancy, 57 p.

Humbert L., 2002, Relation entre l'utilisation du sol à l'époque gallo-romaine et la biodiversité actuelle en forêt de Tronçais. Mémoire de Maîtrise, Université de Nancy 1/ INRA-Nancy, 42 p.

Lemouland Q., 2002, Impact de l'occupation gallo-romaine sur la flore actuelle en forêt de Haye (54): nouveaux outils pour la prospection et la détermination du risque archéologique en milieu forestier. DEA Environnement et Archéologie, INRA-Nancy, Université de Paris I, DEA Paris, 48 p. + ann.

Humbert L., 2003, Evolution du paysage forestier à l'époque gallo-romaine — Approche pédoanthracologique, Diplôme supérieur de Biologie forestière, Université de Nancy 1 / INRA-Nancy / Université d'Aix-Marseille III, 29 p.

Jannet A., 2003, Biodiversité et Archéologie, Mémoire des Hommes et des Milieux, DEA Archéoenvironnement, MAE, Nanterre, 57 p.

6.6 - Enseignement:

Dupouey J.L., 2000, Biodiversité forestière et usage ancien des sols, Séminaire invité, Maîtrise d'Archéologie, Université Paris I.

Dupouey J.L., 2001, L'homme modifie son environnement, Formation des professeurs de collège, IUFM Lorraine, 1 jour.

Dupouey J.L., 2002, L'homme modifie son environnement, Formation des professeurs de collège, IUFM Lorraine, 2 jours.

Dupouey J.L., 2004, L'impact de l'homme sur la biodiversité : les interactions forêt – agriculture, Conférence invitée à l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve.

Dupouey J.L., 2004, French forests dynamics in a changing environment, European Summer School, « Human environment : energy, forests, health and society », Université Nancy 1 [conférence et tournée de terrain].

Dupouey J.L., 2004, Impact de l'histoire de l'utilisation du sol sur la biodiversité et la fertilité des forêts actuelles : des Amish aux gallo-romains, Formation continue techniciens ONF, « La forêt et les modifications environnementales d'origine humaine : CO₂, pollution, climat », Nancy [conférence].

6.7 - Vulgarisation:

Dupouey J.L., 2001, Comment 2000 ans d'histoire marquent l'écologie des forêts actuelles, Fête de la Science, Nancy [conférence].

Dupouey J.L., 2001, Les forêts anciennes : un patrimoine botanique méconnu, Association des botanistes lorrains (Floraine) [conférence].

Dupouey J.L., 2002, Relations entre l'occupation du sol à l'époque gallo-romaine et végétation sur le site de Thuilley-aux-Groseilles, Association des botanistes lorrains (Floraine) [tournée de terrain].

Dambrine E., Dupouey J.L., 2002, La mémoire des forêts : la biodiversité des forêts actuelles reflète l'histoire de leurs usages, *INRA mensuel* 114, 3-6.

Jaupart-Chourrout N., 2002, Archéologie forestière et écologie des peuplements : un mariage plein d'avenir ! *La forêt privée* 267, 25-27.

Crançon S., 2002, Lorraine : la découverte du paysage gallo-romain, Archéologia 391, 40-45.

Bachacou J., Dupouey J.L., Cosserat R., 2004, Précisions et déformations des cartes anciennes : une étude des cartes lorraines, Journée d'études sur la cartographie lorraine, Conseil Régional de Lorraine [conférence].

Dambrine E., Dupouey J.L., 2004, La mémoire des forêts, *Pour la Science*, soumis.

Dupouey J.L., Bachacou J., Koerner W., 2004, Intérêt des cartes anciennes pour l'étude et la gestion de l'environnement actuel, Journée d'études sur la cartographie lorraine, Conseil Régional de Lorraine [conférence].

Georges-Leroy M., 2004, Des romains en forêt de Haye? Quand la forêt n'existait pas! CPIE de Nancy-Champenoux [conférence].

6.8 - Médias :

- . Brouet X., 18/6/97, La forêt redessine le paysage lorrain, *Le Républicain Lorrain*.
- . Dambrine E., Dupouey J.L., Laüt L., 19/09/02, La mémoire de la forêt, Point Presse INRA, 9 p.
 - . Miserey Y., 20/02/02, Les arbres dessinent les champs du passé, *Le Figaro*.
 - . Miserey Y., 26/09/02, Les forêts gardent la mémoire de leur passé agricole, *Le Figaro*.
- . Delaunay F., 26/09/02, L'INRA décrypte la mémoire des forêts, *bois-foret.info*, http://www.boisforet.info/

- . Gruhier F., 31/10/02, Une nouvelle discipline, l'archéologie forestière La mémoire des arbres, Nouvel Observateur n°1982.
 - . Lewino F., 8/11/02, La double vie des forêts, *Le Point*. . France 3, 2002, Journal régional, 2'.

 - . INRA, 01/03, La mémoire de la forêt, *La lettre de l'INRA* 1, p. 4. . Paillard G., 2003, La mémoire de la forêt, DVD-video, INRA, 4'55.
 - . Boullard L., TF1, 21/7/04 19h50, «1,2,3 Forêt », 1'30.

Annexe I

Occupation ancienne du sol et milieux forestiers actuels, en France métropolitaine

Synthèse bibliographique

par

Anne MAUSSION

2003

Institut National de la Recherche Agronomique Unité Phytoécologie Forestière - Unité Cycles Biogéochimiques 54280 Champenoux

A T C	(1.1	1 '1 1'	1 .	12	•	1 1	-
Annexe $I - S$	wnthese	hibliogran	Migue cur	Laccumation	ancienne a	വാ വേ	en France
1 IIII CAC I D	ymmese	Ulullugia	mique sui.	i occupation	and citing v	uu soi	cii i i ance

Nous tenons à remercier particulièrement ici tous les interlocuteurs que nous avons pu avoir, dans le cadre de ce travail, au sein des Services Régionaux de l'Archéologie, de la Sous-Direction de l'Archéologie, de l'INRA ou ailleurs, et dont les conseils ou la collaboration nous ont permis de mener cette enquête à bien :

<u>INRA</u>:

J.-L Dupouey

E. Dambrine

<u>CNRS</u>:

O. Buchsenschutz

Ministère de la Culture, Sous-Direction de l'Archéologie :

J. Thomas

C. Tilloux

Services Régionaux de l'Archéologie :

- Centre: L. Bourgeau (conservateur), S. Lauzanne, J. Vilpoux

- <u>Ile-de-France</u> : C. Marcille

- <u>Lorraine</u>: M. Georges-Leroy

- <u>Midi-Pyrénées</u> : L. Sévègnes

- <u>Picardie</u>: J.-L. Collart (conservateur), G. Leroy

Cellule Archéologique de l'Office National des Forêts - Ile-de-France :

- G. Bénaily
- C. Dardignac
- T. Vigneau

SOMMAIRE

Introduction	44
1 - Les recherches bibliographiques	45
1.1 - L'état des connaissances	45
1.2 - Les ouvrages dépouillés	
1.3 - La base de données	46
1.4 - Résultats	16
1.4.1 - Répartition géographique des sites	
1.4.2 - Eléments de chronologie	
1.4.3 - Les structures agraires fossiles	
2 – Les données de la carte archéologique	49
2.1 – Les données « Dracar » à l'échelle nationale	50
2.1.1 - Présentation des données	
2.1.2 - Résultats	
Répartition spatiale des sites	
Eléments de chronologie	
2.2 – Les données « Patriarche » : tests régionaux	
2.2.1 – Présentation des données	
2.2.2 – Résultats	
Données concernant la Région Midi-Pyrénées	
Données concernant la Picardie	
2.3 - Comparaisons « Dracar » / « Patriarche »	
Conclusion	55
Bibliographie	56
FIGURES	62
ANNEXES	

Introduction

La présente synthèse bibliographique s'inscrit dans le cadre du projet de recherches « Importance spatiale et mécanismes de maintien des variations de la biodiversité forestière résultant des pratiques agricoles passées » (Convention de recherche ECOFOR n°2001.25 (INRA 1505 A)), dirigé par J.-L. Dupouey (Directeur de recherches, Unité Phytoécologie Forestière, INRA, 54280 Champenoux) et E. Dambrine (Directeur de recherches, Unité Cycles Biogéochimiques, INRA, 54280 Champenoux).

Ce projet de recherches vise à « produire des synthèses cartographiques à différentes échelles d'espace sur l'occupation ancienne des territoires actuellement forestiers et les variations de biodiversité qui lui sont associées », et à « comprendre les mécanismes de maintien de la biodiversité floristique issue d'un usage agricole très ancien » (Dambrine, Dupouey 2003).

En Lorraine, les recherches – menées en étroite collaboration entre l'INRA, l'Office National des Forêts (ONF) et les archéologues – ont d'ores et déjà permis de reconnaître, de cartographier et d'étudier d'importants réseaux associant bâtiments, chemins et structures agraires (murets, terrasses, tas d'épierrement…), dont certains remontent à l'époque gallo-romaine (Laffite, Georges-Leroy 2000 ; Laffite, Georges-Leroy 2002).

Dans ce contexte, il s'agissait pour nous – au cours d'un contrat d'une durée de 6 mois (1^{er} mars - 31 août 2003) – de dresser une liste de ce type de vestiges et plus largement de recenser les sites archéologiques actuellement connus en forêt française. A l'échelle de cette synthèse, qui devait initialement concerner les implantations gallo-romaines, une fourchette chronologique large a finalement été retenue : du Néolithique au XVIIème siècle. Concernant la nature des vestiges, la recherche a concerné l'ensemble des types de sites archéologiques, à l'exception des découvertes isolées (de type dépôts monétaires). A partir de cet important corpus de base, des tris répondant à divers critères, plus pertinents par rapport au projet de l'INRA, seront bien sûr possibles.

Dès les premiers jours de notre contrat, nous avons envoyé un courrier aux différents Services Régionaux de l'Archéologie, de façon à les informer de notre démarche d'inventaire et à solliciter leur collaboration (*cf.* annexe 1). Dans le même but, un courrier a également été envoyé, par J.-L. Dupouey et E. Dambrine, à la Sous-Direction de l'Archéologie du Ministère de la Culture (4 rue d'Aboukir, 75002 Paris), Service de la Carte Archéologique Nationale (resp. J. Thomas).

Parallèlement à ces démarches auprès des institutions archéologiques, nous avons rapidement commencé le dépouillement bibliographique d'un certain nombre d'ouvrages, de façon à dresser un premier bilan et à cerner les grandes zones concernées par les découvertes en milieu forestier.

1 - Les recherches bibliographiques

1.1 - L'état des connaissances

Sans être spécifiquement consacrés à la forêt, un certain nombre d'ouvrages archéologiques mentionnent des massifs forestiers à l'intérieur desquels des découvertes ont été effectuées à des dates plus ou moins récentes. Par exemple, on peut ainsi trouver, dans l'ouvrage d'A. Ferdière sur les campagnes de la Gaule romaine, une liste des sites gallo-romains situés en forêt (Ferdière 1988 : 120).

Dans l'ouvrage que M. Mangin a récemment consacré à l'agglomération antique de Blessey-Salmaise (Côte-d'Or), la liste d'A. Ferdière est dite « utile et toujours valable » (Mangin *et al.* 2000 : 328). Ce dernier ouvrage dresse, quant à lui, un inventaire des villages, hameaux et parcellaires antiques dont certains ont été fossilisés par la forêt.

1.2 - Les ouvrages dépouillés

A côté des deux ouvrages cités ci-dessus et des documents mentionnés dans la première partie de la bibliographie (cf. infra), l'essentiel du dépouillement bibliographique a concerné la « Carte archéologique de la Gaule » (désignée sous le signe CAG). Cette collection, dirigée par M. Provost, vise à recenser, département par département, les découvertes archéologiques relevant de la fourchette chronologique suivante : 800 av. / 700 ap.

Dans le cadre de notre contrat, en fonction des départements publiés et de leur disponibilité dans les bibliothèques, nous avons pu achever le dépouillement des volumes correspondant aux 52 départements suivants :

	(0.1)
-	Ain (01)
-	Allier (03)
-	Hautes-Alpes (05)
-	Ardèche (07)
-	Ariège (09)
-	Calvados (14)
- - -	Cantal (15)
-	Charente (16)
-	Charente-Maritime (17)
-	Cher (18)
-	Corrèze (19)
- - -	Creuse (23)
-	Dordogne (24)
-	Eure (27)
-	Finistère (29)
-	Gers (32)
-	Gironde (33)

Indre (36)
Indre-et-Loire (37)
Isère (38)
Jura (39)
Landes (40)
Loir-et-Cher (41)
Loire (42)
Haute-Loire (43)

- Ille-et-Vilaine (35)

- Loire-Atlantique (44)
- Loiret (45)
- Lot (46)
- Lot-et-Garonne (47)
- Lozère (48)
- Maine-et-Loire (49)
- Manche (50)
- Haute-Marne (52)
- Mayenne (53)
- Nièvre (58)
- Nord (59)
- Oise (60)
- Orne (61)
- Pas-de-Calais (62)

- Pas-de-Calais (62)
- Puy-de-Dôme (63)
- Hautes-Pyrénées (65)
- Bas-Rhin (67)
- Haut-Rhin (68)
- Saône-et-Loire (71)
- Sarthe (72)
- Savoie (73)
- Haute-Savoie (74)
- Seine-Maritime (76)
- Tarn (81)
- Vendée (85)
- Haute-Vienne (87)

1.3 - La base de données

A partir de ces ouvrages, toutes les mentions de sites archéologiques situés dans des forêts (ou des bois, des bosquets, etc.) ont été relevées et chaque site a fait l'objet d'une fiche de description.

Le modèle de fiche a été élaboré – avant le début de notre contrat – par L. Laüt, à l'aide du logiciel FileMaker Pro. Par la suite, nous ne l'avons que légèrement modifié, notamment en supprimant les rubriques pour lesquelles nous manquions systématiquement de renseignements. La fiche-type utilisée comporte des rubriques relatives à l'identification du site (n° Patriarche, par exemple), à sa localisation (région, département, commune, lieu-dit, etc.), aux structures archéologiques reconnues (fonction, remarques...) ainsi qu'à leur datation (cf. annexe 2).

Faute de pouvoir faire défiler les fiches une à une, en l'absence du logiciel FileMaker Pro, la base de données – convertie en fichier .dbf – peut être consultée sous format tableur.

Précisons qu'en bibliographie, à quelques rares exceptions près, les coordonnées Lambert des sites archéologiques ne sont qu'exceptionnellement mentionnées, de façon à éviter le pillage de ces gisements. C'est pourquoi, ne disposant que rarement de cette information, notre fichier relatif au dépouillement bibliographique comporte essentiellement des coordonnées correspondant aux centroïdes des différentes communes françaises concernées. Le fichier contient également quelques coordonnées qui peuvent être considérées comme précises, puisque nous les avons trouvées dans des ouvrages. Enfin, les coordonnées des régions Nord-Pas-de-Calais et Limousin doivent être regardées comme approximatives (au lieu-dit près), dans la mesure où nous les avons calculées à partir des fichiers BYO 25 de l'Institut Géographique National (données issues de la numérisation des cartes IGN 1 : 25 000).

1.4 - Résultats

A l'issue du dépouillement bibliographique, la base de données ainsi constituée comprend un total de **1631 fiches de sites**, dont 1599 fiches relatives à la CAG (voir départements ci-dessus), 23 fiches pour la Lorraine (tirées de deux rapports de prospections : Laffite, Georges-Leroy 2000 ; Laffite, Georges-Leroy 2002), 4 fiches pour la Bourgogne (Mangin *et al.* 2000) et 5 fiches correspondant à des sites en Eure-et-Loir et dans les Yvelines (Robreau, Leroy 1989 ; Baray 1989 ; Zuber 1985).

Concernant plus spécifiquement la « *Carte archéologique de la Gaule* », les 1599 fiches se répartissent relativement inégalement selon les départements. On s'aperçoit, en effet, que l'on ne recense pas plus d'une dizaine de sites dans certains départements : les Hautes-Alpes, la Manche, le Gers, la Loire, la Lozère, la Mayenne, la Savoie, la Vendée, le Calvados, les Landes, la Haute-Loire, le Lot-et-Garonne, l'Ain, les Hautes-Pyrénées, l'Ariège, le Lot, l'Ardèche, le Finistère ou encore la Loire-Atlantique (fig. 1 et 2). A l'inverse, certains départements (la Saône-et-Loire, le Nord, le Jura, l'Allier, l'Oise, le Bas-Rhin et la Seine-Maritime) dépassent plus ou moins largement les 90 sites. Ces chiffres élevés peuvent s'expliquer de plusieurs façons :

- les départements en question possèdent un important couvert forestier, impliquant de nombreux sites concernés par ces milieux. Cela paraît notamment être le cas pour le Jura, le Bas-Rhin ou la Saône-et-Loire.
- un ou plusieurs massifs forestiers sont bien connus archéologiquement : c'est le cas pour le départements de l'Allier (avec la forêt de Tronçais), du Nord (avec la forêt de Mormal), de l'Oise (avec les forêts de Compiègne, d'Halatte, de la Haute-Pommeraye...), de la Seine-Maritime (avec les forêts de Brotonne, d'Eu, de La Londe et de Lyons). Certains de ces massifs forestiers peuvent présenter de fortes proportions de sites par rapport à l'ensemble du département dont ils font partie. Ainsi, par exemple, la forêt domaniale de Tronçais renferme 63 % des sites recensés, à partir de la CAG, pour le département de l'Allier. Pour la forêt domaniale de Mormal par rapport au département du Nord, la proportion monte jusqu'à 80 %.

Enfin, les deux phénomènes exposés ci-dessus peuvent également être plus ou moins combinés à l'intérieur d'un même département.

1.4.1 - Répartition géographique des sites

Suite au géoréférencement – sous Arcview 3.2a – de ce fichier correspondant au dépouillement bibliographique (CAG, rapports de prospections en Lorraine, articles), on peut observer la répartition du semis des 1631 sites inventoriés. Rappelons que pour la majorité d'entre eux (1415 sur 1631, soit 87 % des sites), les coordonnées Lambert correspondent au centre géométrique des communes. La figure 3 présente les découvertes par commune; les points y ont été agrandis en fonction du nombre de sites recensés sur le territoire de la commune, de façon à mettre en évidence les concentrations les plus importantes. Celles qui ressortent le plus nettement correspondent à la forêt de Tronçais (Allier), de Haguenau (Bas-Rhin), de Mormal (Nord), aux forêts de l'Oise (Compiègne, Hez...) ainsi qu'à celles de Haute-Normandie (Brotonne, La Londe...).

A côté de ces fortes concentrations, on constate également par endroit des semis particulièrement denses de points : Haut-Rhin, Bas-Rhin, Jura, Saône-et-Loire, Eure et Seine-Maritime (fig. 4).

A l'inverse, de larges zones se révèlent relativement clairsemées, notamment dans la moitié sud du pays, ainsi que dans une bonne partie des régions de l'ouest (fig. 3). Enfin, rappelons que les zones totalement blanches n'ont pas, quant à elles, de signification du point de vue archéologique. Elles se rapportent, en effet, aux départements dont les CAG n'ont pas pu être consultées (fig. 2) et correspondent donc à un état du dépouillement bibliographique et non à une absence réelle de sites.

1.4.2 - Eléments de chronologie

A partir de ce fichier, nous avons également cherché à savoir comment se répartissent les différents sites archéologiques inventoriés par rapport aux grandes périodes chronologiques. En représentant ces données sous forme d'histogramme (fig. 5), on constate une prédominance très nette des sites gallo-romains : 991 sites (soit 61 % du total) révèlent effectivement une occupation antique attestée ou probable. Quant aux faibles effectifs relatifs au Néolithique, à l'âge du Bronze et aux époques moderne et contemporaine, ils s'expliquent facilement par la fourchette chronologique choisie par la CAG (*cf. supra*), document dont proviennent l'essentiel de nos informations.

Répartition spatiale des sites

Les sites relevant de façon certaine ou probable de l'âge du Fer se répartissent assez largement à travers le territoire (fig. 6). On note néanmoins quelques concentrations importantes en Alsace et dans le Jura, qui correspondent aux nombreuses nécropoles tumulaires reconnues – pour les âges du Bronze et du Fer – dans ces régions : forêt des Moidons (Jura), du Kastenwald (Haut-Rhin), de Haguenau (Bas-Rhin), etc.

Les sites ayant connu une occupation gallo-romaine attestée ou probable sont également bien dispersés sur l'ensemble des départements documentés. On retrouve ici certaines des concentrations déjà mises en évidence sur la figure 3 : forêt de Tronçais (Allier), de Mormal (Nord), forêts de l'Oise et de Haute-Normandie (fig. 7). Ces différents massifs forestiers, qui ont été bien étudiés, ont donc principalement livré la trace d'une dense occupation gallo-romaine. Par exemple, pour la forêt de Mormal (Nord), prospectée systématiquement entre 1967 et 1970 par J.-C. Carmelez, on ne recense – parmi les 77 sites inventoriés – que 6 structures archéologiques dont la datation n'est pas déterminée (notamment des puits non datés et un foyer sans doute moderne), ainsi que 3 sites du haut Moyen Age (dont un douteux et deux réoccupations de bâtiments antiques par des sépultures mérovingiennes).

Enfin, les sites médiévaux sont également bien répartis, sans que l'on puisse particulièrement noter de concentrations (fig. 8).

1.4.3 - Les structures agraires fossiles

Nous avons évoqué plus haut les vestiges découverts en Lorraine (bâtiments, chemins, et structures agraires) étudiés par divers intervenants dans le cadre du projet « Importance spatiale et mécanismes de maintien des variations de la biodiversité forestière résultant des pratiques agricoles passées ». A partir des mentions qui en sont faites dans les rapports de prospections archéologiques (Laffite, Georges-Leroy 2000 et Laffite, Georges-Leroy 2002 pour la Meurthe-et-Moselle et les Vosges), nous avons cartographié ces vestiges (au centre géométrique des communes concernées). En partant d'autres documents bibliographiques (et notamment des différents volumes de la « Carte archéologique de la Gaule »), nous avons également recherché – pour les autres régions – les structures susceptibles de s'apparenter à celles découvertes en Lorraine. Nous en avons repéré un certain nombre :

- Corbonod (Ain), Les Aîtres, à la limite des bois : pierriers avec tegulae / Gallo-romain ?
- <u>Vœllerdingen (Bas-Rhin)</u>, *Bauerbist-Pfaffenloch*, à la lisière du bois du *Buerbusch* : pierriers / datation indéterminée.
- <u>Barr (Bas-Rhin)</u>, *Schwartzenberg*, forêt du *Moenkalb* : bâtiments, cases, lignes de délimitation de parcelles / Gallo-romain ?
- <u>Eckartswiller (Bas-Rhin)</u>, Forêt de *Saint-Jean-Saverne*: tas d'épierrements, terrasses de culture, habitat... / Gallo-romain.
- <u>Haegen (Bas-Rhin)</u>, *Wasserwald*, *Gross-Limmersberg*: agglomération rurale de hauteur = Culture des sommets vosgiens / Gallo-romain.
- <u>Haegen (Bas-Rhin)</u>, <u>Sommet du *Diebsberg*, forêt domaniale de *Saverne* : tas d'épierrement, traces de charrue (stries aratoires), bâtiment = Culture des sommets vosgiens / Gallo-romain.</u>
- <u>Haegen (Bas-Rhin)</u>, *Ditschelkopf*, forêt domaniale de *Saverne*: chemin bordé de murets en pierres sèches, bâtiment... = Culture des sommets vosgiens / Gallo-romain.
- <u>Haegen (Bas-Rhin)</u>, *Kuhbergkopf*, forêt domaniale de *Saverne*: bâtiments, tas d'épierrement, terrasses de culture = Culture des sommets vosgiens / Gallo-romain.
- <u>Haegen (Bas-Rhin)</u>, <u>Versant ouest du *Diestchelkopf*</u>: terrasses de cultures, quelques tas d'épierrement = Culture des sommets vosgiens / Gallo-romain.
- <u>Niederbronn-les-Bains (Bas-Rhin)</u>, *Hochscheid* et *Degelboesch* : tas d'épierrement et chemins creux forestiers / datation indéterminée.
- Cohons (Haute-Marne), Bois de la *Vergentière* : pierriers linéaires / datation indéterminée.
- <u>Saint-Gervais-les-Bains (Haute-Savoie)</u>, *La Grange*, lisière du bois des *Amérans* : tumulus et pierriers / datation indéterminée.
- <u>Saint-Jorioz (Haute-Savoie)</u>, *Les Glaisi*: pierriers, alignements de pierres, ruisseaux canalisés... / datation indéterminée.
- <u>Valempoulières (Jura), entre Arbois et Champagnole, à la limite de la forêt des Moidons</u>: constructions, tertres, chemins empierrés, champs délimités par des murs / datation indéterminée
- <u>Blessey (Côte-d'Or), Forêts de *Chalonge* et de *la Combe* : un village, des hameaux, un réseau parcellaire / Gallo-romain.</u>
- <u>Essarois (Côte-d'Or), Forêt de *Châtillon*</u>: vestiges de parcellaires, enclos d'habitats et « tertres » / Protohistoire et Gallo-romain.
- <u>Flavigny (Côte-d'Or), Forêt domaniale de Flavigny</u>: sans doute un village et 2 hameaux, avec parcellaire / Gallo-romain.
- <u>Villy-en-Auxois (Côte-d'Or), La Montagne</u>: hameau avec habitats et enclos associés, parcellaire / Gallo-romain.
- <u>Bouhy (Nièvre)</u>, <u>Bois des *Moulambaux*</u> : tumulus souvent fouillés au XIXe s. et pierriers récents / Protohistoire et époque contemporaine.
- Mont-Saint-Vincent (Saône-et-Loire), à environ 400 m de la ferme du *Rompas-Cochon*, dans le bois : un pierrier dont les matériaux passent pour venir d'une construction gallo-romaine.
- <u>Morlet (Saône-et-Loire)</u>, en lisière du Bois de *Mazerolles* : pierriers avec *tegulae* / Galloromain ?
- <u>Ozenay (Saône-et-Loire)</u>, *Bois de la Taine*: nombreux pierriers, évoquant des tumulus protohistoriques / Protohistoire?

- Royer (Saône-et-Loire), *Le Fourneau à la Brique*, au bord du bois de la *Rougie* : pierriers avec fragments de *tegulae* et de céramique gallo-romaine / Gallo-romain ?
- <u>Saint-Martin-de-Commune (Saône-et-Loire)</u>, *Bois des Riaux*, en lisière sud de la forêt : Habitat, avec des pierriers importants, des *tegulae*, de la céramique commune... / Gallo-romain.

La figure 9 présente à la fois les découvertes lorraines et celles répertoriées à partir de la bibliographie (mentionnées dans la liste ci-dessus). On s'aperçoit que, jusqu'à présent, ces découvertes ont essentiellement été faites dans la moitié orientale du territoire. En effet, outre les vestiges lorrains du plateau de la côte bajocienne déjà connus des équipes de l'INRA, on a repéré des structures agraires fossiles en Alsace (Bas-Rhin), en Champagne-Ardenne (Haute-Marne), en Bourgogne (Côte-d'Or, Nièvre, Saône-et-Loire), en Franche-Comté (Jura) et dans la région Rhône-Alpes (Ain, Haute-Savoie). Le département du Bas-Rhin (avec notamment le Wasserwald et la forêt domaniale de Saverne, commune de Haegen) présente, par exemple, de nombreuses structures archéologiques rattachables à la « Culture des sommets vosgiens » (fin du I^{er} s. ap – début du III^{ème} s. ap.) : agglomérations rurales, tas d'épierrements, terrasses de culture, murets parcellaires, bâtiments divers.

2 - Les données de la carte archéologique (Ministère de la Culture)

La carte archéologique nationale « rassemble et ordonne pour l'ensemble du territoire national les données archéologiques disponibles » (art. 3 de la loi n° 2001-44 du 17 janvier 2001 relative à l'archéologie préventive). Afin d'enrichir encore cet inventaire informatisé, outil de recherche et de gestion du patrimoine archéologique, les Services Régionaux de l'Archéologie (et la Sous-Direction de l'Archéologie) ont récemment adopté une nouvelle application, « Patriarche », qui est venue remplacer l'ancien système appelé « Dracar ».

Dans leur courrier du 21 février 2003 adressé au Service de la Carte Archéologique (Ministère de la Culture, Sous-Direction de l'Archéologie, 4 rue d'Aboukir, 75002 Paris), J.-L. Dupouey et E. Dambrine (INRA) demandaient la possibilité d'accéder à cette base nationale de façon à en extraire les enregistrements correspondant au champ « occupation du sol = forêt / bois... ». Or, le champ « occupation du sol » – qui existait bien dans la base « Dracar » – a été supprimé lors du passage au système « Patriarche ». En accédant à la demande de J.-L. Dupouey et E. Dambrine telle qu'elle a été formulée, le Service de la Carte Archéologique n'était donc à même de nous fournir que des données correspondant à l'état « Dracar » de la base de données, soit antérieures au passage au système « Patriarche » (vers fin 2000 ?).

Outre le fait de nous communiquer des informations plus ou moins anciennes et non mises à jour, qui posait problème au Service de la Carte Archéologique, nous avons également été confrontée au problème de la confidentialité des données de la carte archéologique nationale. En effet, pour éviter de faire peser des menaces sur la protection des sites archéologiques, un certain nombre d'informations sensibles (coordonnées Lambert principalement) ne sont accessibles qu'à un public restreint (notamment aux agents de l'Etat dans le cadre de leurs fonctions, aux agents de l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives, aux agents des services archéologiques de collectivités territoriales, aux enseignants et chercheurs des établissements publics d'enseignement supérieur et de recherche pour l'exercice de leurs missions).

Au terme de plusieurs mois d'explications et de négociations, la Sous-Direction de l'Archéologie nous a finalement accordé l'accès à ces données, qui nous ont été remises – sous forme de fichiers informatisés – le 20 juin 2003. Si les coordonnées Lambert des sites archéologiques nous ont été communiquées, il convient néanmoins de rappeler ici qu'elles l'ont été à titre exceptionnel et que ces données ne doivent faire l'objet d'aucune diffusion. Dans le cadre d'utilisations futures du fichier concernant les sites en milieu forestier, l'INRA devra donc veiller à ne pas communiquer les champs correspondant aux coordonnées Lambert des sites archéologiques. L'idéal serait, dans l'éventualité de la poursuite du projet, d'aboutir à la signature – entre l'INRA et la Sous-Direction de l'Archéologie – d'une convention définissant les modalités d'utilisation des données archéologiques par l'INRA, de façon à assurer la protection de ce patrimoine.

2.1 - Les données « Dracar » à l'échelle nationale

2.1.1 - Présentation des données

Rappelons que les données qui nous ont été transmises ont été extraites de l'ensemble de la base nationale « Dracar » en sélectionnant, au moyen du champ « occupation du sol », les sites correspondant à un couvert boisé. Il convient de souligner ici les limites d'une telle démarche :

- les données ne sont pas forcément à jour puisqu'il s'agit, comme nous l'avons déjà précisé, de l'état « Dracar » de la carte archéologique, qui n'a donc pas bénéficié des dernières mises à jour effectuées dans le cadre de l'utilisation de l'application « Patriarche ».
- le champ « occupation du sol » à été renseigné à une date déterminée pour chaque fiche, or le milieu végétal a pu se modifier depuis la dernière mise à jour des fiches « Dracar ». Un certain nombre de sites alors situés en milieu forestier peuvent correspondre actuellement à d'autres types de paysages (déboisement, remise en culture...), alors que des sites non renseignés comme forestiers peuvent l'être devenus entre-temps (reboisement).
- enfin, il est à noter que le champ « occupation du sol » paraît avoir été très inégalement renseigné d'une région à l'autre, la rubrique n'ayant parfois été, dans certaines régions ou départements, que rarement remplie.

Il est donc raisonnable de considérer qu'un certain nombre de sites archéologiques situés dans les forêts françaises ont vraisemblablement échappé à cet inventaire.

Les fichiers (sous format .txt) qui nous ont été communiqués par la Sous-Direction de l'Archéologie comprenaient les informations suivantes :

- code national du site
- numéro de région
- numéro d'identification « Dracar »
- nom de la commune
- lieu-dit
- nom du site
- attribution chronologique
- type de structure archéologique
- X et Y du site

Nous avons intégré ces données, sous FileMaker Pro, de façon à pouvoir les visualiser et les manipuler grâce à la fiche d'inventaire du projet INRA (élaborée par L. Laüt). Cette base de données contenait à l'origine 14114 sites sous couvert forestier. Nous avons procédé à l'élimination d'un certain nombre de sites selon des critères de sélection définis avec J.-L. Dupouey et E. Dambrine :

- selon le champ « chronologie », les sites débordant des limites chronologiques choisies ont été supprimés. Il s'agit principalement des sites datant du Paléolithique, de l'Epipaléolithique, du Mésolithique et de l'époque contemporaine (XIXème et XXème siècles).
- en fonction du champ « structure », les sites correspondant à des objets isolés ou dépôts isolés (notamment monétaires), à des figurations rupestres...
- à partir des « coordonnées », les sites parfois en très grand nombre dans certaines régions (ex. la Bourgogne) dont les coordonnées Lambert n'étaient pas renseignées (1034 au total).
- enfin, après géoréférencement sous Arcview3.2a, les sites archéologiques situés hors emprise forestière actuelle, telle que la base de données « Corine land cover » (*cf. infra*) nous permet de l'appréhender.

A l'issue de ce tri, la base de données – extraite du fichier « Dracar » du Ministère de la Culture – comporte un total de **9403 fiches** relatives à des sites archéologiques situés en forêt française. Précisons que pour un même site, en terme de localisation, il existe parfois plusieurs fiches en fonction des éventuelles périodes d'occupation différentes qui peuvent le caractériser.

2.1.2 - Résultats

Répartition spatiale des sites

Avant de pouvoir cartographier le semis de ces points, il s'est révélé nécessaire de transformer les coordonnées Lambert des sites « Dracar », de façon à obtenir des fichiers régionaux graphiquement jointifs à l'échelle de l'ensemble du territoire. En effet, les coordonnées initiales correspondaient, d'une région à l'autre, à différentes zones Lambert françaises. Pour cette manipulation, nous avons utilisé le logiciel Circé 2000, développé par l'Institut Géographique National, qui nous a permis de transférer l'ensemble des coordonnées en Lambert II étendu.

Une fois le semis de points correspondant à ces 9403 fiches cartographié, la répartition des sites se révèle relativement inégale (fig. 10). La frange ouest du territoire apparaît comme relativement peu dense. En revanche, on note des zones de fortes concentrations, notamment au nord-est du territoire (Alsace, Lorraine, Champagne-Ardenne et Franche-Comté), dans la région limousine et sur ses marges (Poitou-Charentes, Auvergne) ainsi qu'au sud-est du pays (notamment Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte-d'Azur et sud de la région Rhône-Alpes). Mais, c'est surtout le vide caractérisant la Bourgogne qui apparaît comme le phénomène le plus frappant de cette répartition spatiale. En effet, on sait que des sites archéologiques y sont connus sous couvert forestier (mentions dans Mangin et al. 2000, dans la « Carte archéologique de la Gaule »...). Or, dans les fichiers de « Dracar » qui nous ont été communiqués, les données correspondant à cette région paraissent très incomplètes. On n'y compte, en effet, que 26 sites pour l'ensemble de la région. De plus, nous n'avons pu en conserver que 17, dans la mesure où les autres sites ne possédaient pas de coordonnées Lambert. Comment expliquer le déséquilibre très net, en nombre de sites, entre la Bourgogne et les autres régions ? Il est certain que ce dernier ne reflète ni la réalité archéologique ni la réalité de la recherche en Bourgogne; il doit s'agir plutôt soit d'une erreur de manipulation, susceptible d'amputer artificiellement l'échantillon, au moment de l'extraction depuis le fichier d'origine, soit – et c'est le plus probable – d'un problème au niveau du remplissage de la rubrique « occupation du sol ». En effet, on sait que, pendant l'utilisation de « Dracar », ce champ a pu être très diversement rempli d'une région à l'autre. Il est donc possible qu'en Bourgogne, on n'ait prêté que peu d'attention à cette rubrique et qu'elle n'ait été qu'exceptionnellement renseignée.

Afin de tenter de réduire ce vide, nous avons choisi d'intégrer aux 9403 fiches « Dracar », les informations concernant la Bourgogne dont nous disposions à l'issue de notre dépouillement bibliographique :

- les fiches réalisées à partir de la CAG portant sur la Nièvre et la Saône-et-Loire (avec, dans la localisation, une précision aux centroïdes communaux).
- les fiches réalisées à partir des mentions de vestiges dans l'ouvrage de M. Mangin (Mangin *et al.* 2000) (précision centroïde ou approximative).

Nous avons également ajouté au fichier des sites « Dracar » :

- le fichier des sites de la forêt domaniale de Tronçais (Allier), élaboré et communiqué par L. Laüt, qui y a repris des prospections archéologiques depuis plusieurs années.
- les fiches réalisées à partir des volumes de la CAG du Limousin (départements de la Corrèze, de la Creuse et de la Haute-Vienne) et de la région Nord-Pas-de-Calais (départements du Nord et du Pas-de-Calais): les sites ont fait l'objet d'une recherche des coordonnées à partir des fichiers BYO 25 de l'Institut Géographique National (données issues de la numérisation des cartes IGN 1:25 000). Les fiches correspondant à des sites déjà répertoriés dans « Dracar » ont été supprimées.

Suite à ces différents ajouts, notre fichier définitif se compose de **9828 fiches** relatives à des sites archéologiques situés en milieu forestier. Si le vide initial de la Bourgogne est en partie comblé, la carte correspondant à ce nouveau semis de points complété (fig. 11) présente sensiblement les mêmes caractéristiques que celles de la figure précédente. La carte des densités de sites (fig. 12),

réalisée sous Arcview 3.2a au moyen d'un carroyage de 50 km de côté, souligne bien certaines des zones de concentrations déjà perceptibles sur les figures 10 et 11 : l'est de la France, le Limousin, etc. Elle précise également l'importance de certains massifs forestiers : Tronçais (Allier), Boulogne (Loiret-Cher), forêts de l'Oise (Compiègne, Halatte...).

Eléments de chronologie

Les différentes périodes chronologiques sont assez diversement représentées à l'intérieur du fichier définitif. Si l'on se rapporte à l'histogramme (fig. 13), on constate que la période antique et la période médiévale (haut Moyen Age et Moyen Age classique confondus) atteignent des effectifs relativement similaires. Ce sont, par ailleurs, les deux périodes les mieux représentées (23 % de l'ensemble des fiches pour chacune d'entre elles). On note également une proportion relativement importante -18 % des fiches - pour les sites non datés.

Concernant la répartition géographique des sites, nous avons repris le découpage chronologique utilisé pour l'histogramme, afin de réaliser une carte pour chaque période.

Pour le Néolithique – Chalcolithique (fig. 14), on trouve des sites archéologiques un peu dans toutes les régions de France, avec des concentrations plus marquées dans certains départements du sud du pays (Ardèche, Gard, Hérault, Drôme, Lozère...), du fait des nombreux vestiges funéraires (grottes sépulcrales, dolmens...) qui y sont connus.

A l'âge du Bronze (fig. 15), c'est l'est du territoire qui paraît réunir le plus grand nombre de sites connus.

Pour l'âge du Fer (fig. 16), on observe des sites en Limousin : il s'agit essentiellement de tumulus en Corrèze et en Haute-Vienne, ainsi que d'aurières en Haute-Vienne. Il faut également noter de nombreux sites d'*oppida* dans le sud-est de la France (notamment dans le Var, mais aussi dans les Bouches-du-Rhône, en Ardèche...).

Avec la carte correspondant à la période gallo-romaine (fig. 18), on retrouve certaines des zones dont nous avons souligné l'existence depuis le début de ce document. Notons principalement une densité importante de sites dans l'est de la France, dans le Limousin et en Narbonnaise (liée soit à un important couvert forestier, soit à l'intensité de la recherche archéologique, ou encore à une combinaison de ces deux phénomènes), ainsi que la présence de concentrations plus ponctuelles correspondant à des massifs forestiers particuliers (forêt de Tronçais (Allier), forêt de Mormal (Nord), forêts de l'Oise, de Haute-Normandie).

Pour le haut Moyen Age (fig. 19), les sites recensés sont peu nombreux (au nombre de 189 sites) et plutôt dispersés, malgré un vide caractérisant l'ouest de la France.

Au Moyen Age (fig. 20), toutes les zones du territoire semblent concernées (en proportion du nombre de sites global qui les caractérisent). On note des densités relativement importantes sur la frange est du pays ou dans le Limousin, même si l'on ne constate pas vraiment de concentrations ponctuelles comme pour la période gallo-romaine.

Enfin, concernant l'époque moderne (fig. 21), les sites, assez largement répartis sur l'ensemble du territoire, paraissent particulièrement bien représentés sur la frange nord-est du territoire.

Structures agraires anciennes recensées

Lorsque l'on sélectionne uniquement les fiches relatives à des structures agraires anciennes, on en dénombre 167, qui se répartissent typologiquement de la manière suivante :

Désignation vestiges	Nombre de fiches
Enclos pastoral	5
Espace cultivé	1
Parcellaire	39
Structure agraire	19
Talus d'épierrement	14
Tas d'épierrement	3
Terrasse(s)	86

La figure 23 permet d'observer la répartition spatiale de ces vestiges à l'intérieur du territoire. On y retrouve les concentrations relatives aux découvertes lorraines, avec notamment en Moselle une zone apparemment particulièrement dense en vestiges. En revanche, on peut s'étonner de ne pas voir apparaître les vestiges de la « Culture des sommets vosgiens » mis au jour en Alsace. Ils ont sans doute été codés, dans « Dracar », avec des désignations – du type « habitat » – qui ne nous ont pas permis de les sélectionner en tant que structures agraires. Notons également la présence d'assez nombreux vestiges désignés comme « structure agraire » (pour l'essentiel d'époque indéterminée) en Indre-et-Loire, ainsi que de structures définies comme des « enclos pastoraux » (du Moyen Age, de l'époque moderne ou non datés) en Provence-Alpes-Côte-d'Azur.

Quant aux vides de cette carte, ils ne correspondent bien évidemment pas à une réalité d'ordre historique, mais sont dus à l'état des connaissances archéologiques, voire – comme nous l'avons vu pour les sites alsaciens de la « Culture des sommets vosgiens » – à des caractéristiques de codage qui nous ont empêché de les cerner.

2.2 - Les données « Patriarche » : tests régionaux

Parallèlement aux démarches effectuées auprès du Service de la Carte Archéologique à la Sous-Direction de l'Archéologie, nous avons également contacté, par courrier (*cf.* annexe 1), l'ensemble des Services Régionaux de l'Archéologie du territoire métropolitain. Or, certains de ces SRA ont répondu positivement à notre demande en acceptant de nous communiquer, à partir de la base « Patriarche » en application, les sites découverts en zone boisée. Il s'agit des SRA suivants :

- Centre
- Nord-Pas-de-Calais
- Midi-Pyrénées
- Lorraine (données non communiquées à la date de rédaction du présent document).

2.2.1 - Présentation des données

Contrairement à la démarche suivie au niveau national avec la Sous-Direction de l'Archéologie (et le fichier « Dracar »), ici l'extraction n'a pas été réalisée au moyen de la rubrique « occupation du sol ». Tout d'abord, comme nous l'avons déjà évoqué plus haut (*cf. supra*), ce champ n'existe plus depuis le passage au système « Patriarche ». De plus, nos interlocuteurs au sein des différents SRA contactés nous ont confirmé les divers problèmes relatifs au remplissage du champ « occupation du sol » dans « Dracar » : remplissage irrégulier parfois inexistant, informations obsolètes du fait des changements survenus dans la couverture végétale... En accord avec ces interlocuteurs, nous avons donc décidé de leur fournir un fond vecteur des forêts de leurs régions respectives, afin qu'ils puissent procéder à la sélection des sites archéologiques concernés.

Pour ce faire, nous disposions d'une base de données géographiques d'occupation des sols de France produite par l'Institut Français de l'Environnement (IFEN), du nom de « CORINE Land Cover ». Cette base de données, au 1 : 100 000, a été mise au point à partir d'images satellites SPOT acquises entre 1989 et 1992. Plus de quarante types d'occupation du sol y sont détaillés, rendant ainsi compte de la végétation sur l'ensemble du territoire français. Pour notre part, nous avons retenu l'ensemble des polygones répondant aux attributs suivants (fig. 24) :

- forêts de feuillus
- forêts de conifères
- forêts mélangées

Cette fois, l'extraction des données ne correspond donc pas à une interrogation de la carte archéologique au moyen d'un champ, mais à un croisement entre des fonds régionaux représentant la couverture forestière et la base « Patriarche » des régions correspondantes.

2.2.2 - Résultats

Données concernant la Région Centre

Nous avons sélectionné les informations communiquées par le SRA de la Région Centre en fonction des mêmes critères que pour les données « Dracar » (notamment fourchette chronologique et type de structure). Nous avons pu, par la suite, observer la répartition des sites à l'intérieur des 6 départements concernés (Cher, Eure-et-Loir, Indre, Indre-et-Loire, Loir-et-Cher et Loiret) (fig. 25). Il apparaît que les massifs forestiers les mieux documentés sont la forêt de Chinon (Indre-et-Loire), la forêt de Chambord (ou Boulogne, dans le Loir-et-Cher), la forêt d'Orléans (Loiret) et la forêt d'Allogny (Cher). En forêt d'Allogny, ce sont les vestiges métallurgiques – dont certains remontent à l'Antiquité – qui dominent. Les vestiges métallurgiques sont également assez nombreux dans la forêt de Chambord. Cette dernière abritant aussi de très nombreux tumulus protohistoriques. En forêt d'Orléans, sont principalement connus de nombreux tumulus protohistoriques et des vestiges d'habitats gallo-romains. Enfin, les sites semblent plus diversifiés en forêt de Chinon : enceintes, carrières de pierre, voies, habitats, scories, structures mégalithiques...

Données concernant la Région Midi-Pyrénées

A l'intérieur des huit départements concernés (Ariège, Aveyron, Gers, Haute-Garonne, Hautes-Pyrénées, Lot, Tarn et Tarn-et-Garonne) (fig. 26), on note des zones de forte densité de sites archéologiques en milieu boisé, essentiellement au sud de la région (c'est-à-dire dans les Pyrénées), ainsi qu'au nord-ouest (notamment dans le Lot et l'Aveyron). En revanche, les sites sont nettement plus rares à l'intérieur d'une sorte de bande médiane qui correspond principalement à une partie du Gers, de la Haute-Garonne et du Tarn.

Données concernant la Picardie

Nous avons appris de G. Leroy – ingénieur d'études au Service Régional de l'Archéologie de Picardie – que, pour cette région, c'est essentiellement le patrimoine archéologique gallo-romain qui était susceptible d'intéresser l'INRA dans le cadre des problématiques du projet « Importance spatiale et mécanismes de maintien des variations de la biodiversité forestière résultant des pratiques agricoles passées ». Pour la Picardie, l'extraction n'a donc porté que sur les sites antiques, ou présumés antiques, de la base « Patriarche », sélectionnés à partir des polygones forestiers de « CORINE Land Cover ». La répartition spatiale des sites s'avère relativement irrégulière à l'intérieur des 3 départements (Aisne, Oise et Somme) concernés (fig. 27). Les concentrations les plus significatives se trouvent, en effet, dans le département de l'Oise : forêts de Compiègne, de Halatte, de Chantilly, de la Haute Pommeraye, de Hez notamment. Ces massifs forestiers recèlent, en proportions plus ou moins variables, des habitats isolés (dont des *villae*), des habitats groupés (villages, agglomérations secondaires), des lieux de culte (plusieurs sanctuaires en forêt de Halatte et de Compiègne, par exemple), des structures artisanales (ex : ateliers de potiers en forêt de Compiègne), des vestiges funéraires (ex : nécropole du Mont Chyprès en forêt de Compiègne), etc.

2.3 - Comparaisons « Dracar » / « Patriarche »

Nous l'avons dit plus haut, deux démarches distinctes ont présidé à l'extraction des données archéologiques dont nous avons pu disposer dans le cadre de ce travail : d'une part, une sélection des sites dans la base « Dracar » à partir du champ « occupation du sol », d'autre part – pour trois régions françaises – une extraction par croisement entre un fond vecteur des forêts et la base « Patriarche ». Pour les trois régions concernées (Centre, Midi-Pyrénées et Picardie), nous disposons donc d'échantillons extraits au moyen de chacune de ces deux méthodes. Ceci nous a permis de comparer les effectifs relatifs aux deux approches (fig. 28), de façon à désigner la méthode la plus fiable, celle susceptible de fournir les extractions les plus complètes possibles.

Il apparaît que, pour la région Centre et la région Midi-Pyrénées, le nombre de fiches obtenu est nettement plus élevé à partir du croisement entre le fond « CORINE Land Cover » et la base « Patriarche » qu'en partant du champ « occupation du sol » de « Dracar ». La différence est beaucoup moins nette lorsque l'on observe le cas de la Picardie (419 sites « méthode Dracar » / 478 sites

« méthode Patriarche »), mais il convient de rappeler que, pour cette dernière région, la comparaison ne porte que sur les sites gallo-romains puisque seuls ces derniers nous ont été communiqués par le SRA

A partir de ces trois cas, on peut dire que la méthode d'extraction qui semble la plus appropriée – dans l'optique d'obtenir le fichier le plus complet possible – consiste à confronter le semis des sites archéologiques enregistrés dans l'application « Patriarche » à un fond comprenant les polygones boisés des régions correspondantes. Il s'agit donc ici d'un point méthodologique intéressant à souligner et à retenir, dans la mesure où les équipes de l'INRA souhaiteront très vraisemblablement poursuivre leurs enquêtes auprès des différents SRA qui n'ont pas collaboré à cette première étape de synthèse documentaire.

Conclusion

Pour conclure, on peut souligner qu'au terme de notre contrat, nous sommes arrivée à un certain nombre de résultats satisfaisants. Tout d'abord, l'objectif – qui consistait, rappelons-le, à réaliser une synthèse documentaire de façon à dresser un inventaire des sites archéologiques situés en milieu forestier – a été atteint. Nous avons procédé, en effet, à un large travail de synthèse bibliographique qui a notamment porté sur les volumes de la « *Carte archéologique de la Gaule* ».

S'il s'agit d'un travail long et relativement fastidieux (lecture exhaustive de chaque volume, réalisation d'une fiche de site à partir de chaque mention utile, intégration des coordonnées des centroïdes communaux pour l'ensemble des fiches), ce dernier a porté ses fruits puisque nous avons pu élaborer un fichier comprenant 1631 fiches de sites relatives à 52 départements de France métropolitaine. En outre, le dépouillement de cette collection nous a permis de comparer entre eux les résultats obtenus pour tous ces départements. A partir de là, nous avons pu dresser quelques premières synthèses cartographiques permettant d'ores et déjà de mettre en évidence, à travers les divers départements renseignés, des zones denses en vestiges archéologiques, voire d'éventuelles concentrations nettes.

Dans un second temps, ce travail s'est trouvé validé dans la mesure où ces densités et concentrations ont été confirmées grâce à la seconde synthèse réalisée à partir des informations de la carte archéologique nationale du Ministère de la Culture. En effet, le deuxième pan de notre travail a consisté à contacter les diverses institutions archéologiques susceptibles de pouvoir nous apporter des informations quant à l'occupation ancienne des zones actuellement boisées. Cette étape du travail a tout d'abord eu pour conséquence positive de porter à la connaissance d'un certain nombre de Services Régionaux de l'Archéologie (SRA) les travaux menés par l'INRA dans le cadre du projet « Importance spatiale et mécanismes de maintien des variations de la biodiversité forestière résultant des pratiques agricoles passées ».

Nous avons réussi à obtenir, de la Sous-Direction de l'Archéologie, l'accès aux informations de l'ancienne base « Dracar », informations qui en ont été extraites à partir du champ « occupation du sol ». Le traitement de ces données nous a notamment permis de mettre au point un fichier couvrant le territoire métropolitain et comprenant 9828 fiches. Parmi ces 9828 fiches, qui s'inscrivent à l'intérieur des limites chronologiques et typologiques définies par l'INRA, dominent les fiches relatives à l'Antiquité et au Moyen Age. Outre la réalisation de cartes par périodes, ce fichier permet également de recenser et de cartographier les structures agraires anciennes, complétant ainsi la première carte réalisée à l'issue du dépouillement bibliographique.

Parallèlement à ce travail sur le « fichier Dracar », nous avons pu bénéficier d'informations tirées de l'actuelle application « Patriarche » pour trois régions (Centre, Midi-Pyrénées, Picardie). Les zooms, réalisés à l'échelle de ces régions, mettent en évidence la bonne connaissance archéologique de certains massifs forestiers comme les forêts de Chinon (Indre-et-Loire), de Chambord (dans le Loir-et-Cher), d'Orléans (Loiret), d'Allogny (Cher), de Compiègne (Oise), de Halatte (Oise), etc.

Ces données régionales, extraites par croisement avec un fond vecteur représentant les forêts françaises (« CORINE Land Cover »), se révèlent plus complètes que celles obtenues — pour les mêmes régions — à partir du champ « occupation du sol » de « Dracar ». Il s'agit d'un acquis méthodologique important, car c'est donc cette méthode qu'il conviendra d'appliquer à nouveau dans l'hypothèse de futures collaborations avec les SRA.

Ces quelques résultats sont positifs puisque qu'ils apportent des éléments de réponse concernant le patrimoine archéologique en milieu forestier, satisfaisant ainsi aux objectifs énoncés au début de notre contrat.

On peut néanmoins regretter d'avoir manqué de temps, ce qui ne nous a pas permis d'approfondir les analyses à partir des données « Dracar » et « Patriarche ». En effet, nous avions initialement prévu un certain nombre d'analyses complémentaires (remplissage d'une fiche de synthèse pour chaque massif forestier concerné par des découvertes archéologiques nombreuses, calcul du nombre de sites archéologiques par rapport au taux de boisement pour chaque département, etc.). La réception des fichiers de la carte archéologique nationale s'est malheureusement faite trop tardivement (vers fin juin pour l'extrait de « Dracar », comme pour les extraits régionaux) pour que nous puissions mener à bien ces projets. Il reste que le matériau est désormais réuni et que ces diverses manipulations pourront sans problème être réalisées dans le cadre d'une prochaine phase du projet « Importance spatiale et mécanismes de maintien des variations de la biodiversité forestière résultant des pratiques agricoles passées ».

Bibliographie

Abréviations :

AFAN : Association pour les fouilles archéologiques nationales. AFEAF : Association française pour l'étude de l'âge du Fer.

DRAC : Direction régionale des affaires culturelles. INRA : Institut national de la recherche agronomique.

SRA: Service régional de l'archéologie.

Baray 1989 : BARAY (L.). – Deux enclos quadrangulaires de la fin de l'Indépendance gauloise en forêt de Saint-Arnould (Yvelines). *In* : BUCHSENSCHUTZ (O.) dir., OLIVIER (L.) dir. – *Les viereckschanzen et les enceintes quadrilatérales en Europe celtique* : 9^{ème} colloque de l'AFEAF, Châteaudun, 16-19 mai 1985, Paris : AFEAF, Errance, 1989, p. 81-95.

Bordeloup 1995 : BORDELOUP (J.-M.). – Nouvelles observations sur la métallurgie ancienne du fer à Allogny (Cher). *Bulletin du Groupe de Recherches Archéologiques et Historiques de Sologne*, t. 17, n° 3-4, juill-déc 1995, p. 143-158.

Collectif 1997 : COLLECTIF. – *Forêt et archéologie*. Office National des Forêts, *Arborescences*, n° 71, nov-déc 1997, 56 p.

Couderc 1989 : COUDERC (J.-M.). – Les enceintes quadrangulaires de Touraine. *In :* BUCHSENSCHUTZ (O.) dir., OLIVIER (L.) dir. – *Les viereckschanzen et les enceintes quadrilatérales en Europe celtique :* 9^{ème} colloque de l'AFEAF, Châteaudun, 16-19 mai 1985, Paris : AFEAF, Errance, 1989, p. 69-79.

Dambrine, Dupouey 2003 : DAMBRINE (E.), DUPOUEY (J.-L.). – Importance spatiale et mécanismes de maintien des variations de la biodiversité forestière résultant des pratiques agricoles passées, Rapport d'étape, INRA, Mai 2003.

Ferdière 1988: FERDIERE (A.). – Les campagnes en Gaule romaine. Les techniques et les productions rurales en Gaule. Paris : Errance, 1988, p. 120.

Laffite, Georges-Leroy 2000 : LAFFITE (J.-D.), GEORGES-LEROY (M.). – *Habitats et structures agraires fossiles du plateau de la côte bajocienne de Pont-à-Mousson (Meurthe-et-Moselle) à Neufchâteau (Vosges). Prospection thématique, rapport 2000.* Document final de synthèse, Ministère de la Culture et de la Communication, DRAC de Lorraine, SRA, AFAN, Metz, 2000. 25 p, annexes.

Laffite, Georges-Leroy 2002 : LAFFITE (J.-D.), GEORGES-LEROY (M.). – *Habitats et structures agraires fossiles du plateau de la côte bajocienne de Pont-à-Mousson (Meurthe-et-Moselle) à Neufchâteau (Vosges). Prospection thématique, rapport 2001-2002*. Document final de synthèse, Ministère de la Culture et de la Communication, DRAC de Lorraine, SRA, INRAP, Metz, 2002. 17 p, annexes.

Mangin et al. 2000: MANGIN (M.), COURTADON (J.-L.), FLUZIN (P.), LACLOS (E. de) – Village, forges et parcellaire aux Sources de la Seine. L'agglomération antique de Blessey-Salmaise (Côte-d'Or). Presses Universitaires franc-comtoises, Annales Littéraires de l'Université de Franche-Comté (vol. 699), Série "Environnement, Société, Archéologie"... (n° 1), 2000. 517 p.

Olivier 1989 : OLIVIER (L.). – Les enceintes quadrangulaires en Lorraine : état de la question. *In :* BUCHSENSCHUTZ (O.) dir., OLIVIER (L.) dir. – *Les viereckschanzen et les enceintes quadrilatérales en Europe celtique* : 9^{ème} colloque de l'AFEAF, Châteaudun, 16-19 mai 1985, Paris : AFEAF, Errance, 1989, p. 97-106.

Robreau, Leroy 1989 : ROBREAU (B.), LEROY (A.). – Les deux enceintes quadrilatérales du Bois des Goislardières à Lanneray (Eure-et-Loir). *In* : BUCHSENSCHUTZ (O.) dir., OLIVIER (L.) dir. – *Les viereckschanzen et les enceintes quadrilatérales en Europe celtique* : 9^{ème} colloque de l'AFEAF, Châteaudun, 16-19 mai 1985, Paris : AFEAF, Errance, 1989, p. 57-61.

Zuber 1985 : ZUBER (F.). – Milieu sylvestre et traces d'utilisation du bois à la *villa* de *La Millière* (Yvelines). In : *Le bois et la forêt en Gaule et dans les provinces voisines* : colloque. Paris : Errance, *Caesarodunum*, t. 21, 1985, p. 207-210.

Collection « Carte archéologique de la Gaule » :

Bernouis 1999 : BERNOUIS (P.) – *L'Orne, 61*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, Conseil Général de l'Orne, ministère de l'Education Nationale, 1999. 249 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 61).

Bertrandy *et al.* **1999** : BERTRANDY (F.), CHEVRIER (M.), SERRALONGUE (J.) – *La Haute-Savoie*, 74. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, Conseil Général de Haute-Savoie, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1999. 412 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 74).

Bigeard *et al.* **1996** : BIGEARD (H.). – *La Nièvre*, *58*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1996. 300 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 58).

Boyrie-Fénié 1994 : BOYRIE-FENIE (B.). – *Les Landes, 40.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1994. 192 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 40).

Buisson, 1990 : BUISSON (A.). – *L'Ain, 01*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1990. 192 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 01).

Chevrot, Troadec 1992 : CHEVROT (J.-F.), TROADEC (J.) – *Le Cher, 18.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1992. 370 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 18).

Cliquet 1993 : CLIQUET (D.) – *L'Eure*, 27. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1993. 285 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 27).

Comité Départemental d'Archéologie du Tarn 1995 : COMITE DEPARTEMENTAL D'ARCHEOLOGIE DU TARN – *Le Tarn, 81*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1995. 298 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 81).

Corrocher *et al.* **1989**: CORROCHER (J.), PIBOULE (M.), HILAIRE (M.) – *L'Allier*, *03*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1989. 216 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 03).

Coulon, Holmgren 1992 : COULON (G.), HOLMGREN (J.). – *L'Indre, 36.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1992. 240 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 36).

Delacampagne 1990 : DELACAMPAGNE (F.) – *Le Calvados, 14*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1990. 166 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 14).

Delmaire, 1994 : DELMAIRE (R.). – *Le Pas-de-Calais, 62*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1994. 2 vol., 607 p (Carte archéologique de la Gaule ; 62-1, 62-2).

Delmaire 1996 : DELMAIRE (R.) dir. – *Le Nord, 59*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, CNRS, 1996. 497 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 59).

Dupraz, Fraisse 2001 : DUPRAZ (J.), FRAISSE (C.) – *L'Ardèche, 07*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, MSH, 2001. 496 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 07).

Dussot 1989 : DUSSOT (D.) – *La Creuse, 23*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1989. 205 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 23).

Escudé-Quillet (J.-M.), Maissant (C.), sous la direction de Sablayrolles (R.) 1996: ESCUDE-QUILLET (J.-M.), MAISSANT (C.) – *L'Ariège*, 09. Paris: Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1996. 211 p. (Carte archéologique de la Gaule; 09).

Fabrié 1989 : FABRIE (D.) – *La Lozère, 48*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1989. 144 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 48).

Fages 1995: FAGES (B.) – *Le Lot-et-Garonne, 47*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1995. 365 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 47).

Flotté, Fuchs 2000 : FLOTTE (P.), FUCHS (M.). – *Le Bas-Rhin, 67.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Conseil Général du Bas-Rhin, AFAN, 2000. 735 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 67).

Gaillard 1996 : GAILLARD (H.) – *La Dordogne, 24*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1996. 299 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 24).

Galliou 1989 : GALLIOU (P.) – *Le Finistère, 29*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1989. 229 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 29).

Ganet (I.), sous la direction de Barruol (G.) et Bertucchi (G.) 1995 : GANET (I.). – Les Hautes-Alpes, 05. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1995. 188 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 05).

Labrousse, Mercadier 1990: LABROUSSE (M.), MERCADIER (G.) – *Le Lot, 46*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1990. 156 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 46).

Lapart, Petit 1993 : LAPART (J.), PETIT (C.) – *Le Gers, 32*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, 1993. 354 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 32).

Lavendhomme 1997 : LAVENDHOMME (M.-O.) – *La Loire, 42*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1997. 305 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 42).

Leroux, Provost 1990 : LEROUX (G.), PROVOST (A.) – *L'Ille-et-Vilaine, 35*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1990. 304 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 35).

Lintz 1992 : LINTZ (G.) – *La Corrèze, 19.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1992. 223 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 19).

Lussault 1997 : LUSSAULT (A.) – *Les Hautes-Pyrénées, 65.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, 1997. 304 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 65).

Maurin 1999 : MAURIN (L.) – *La Charente-Maritime, 17*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie, 1999. 363 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 17).

Naveau 1992 : NAVEAU (J.) – *La Mayenne, 53.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, 1992. 176 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 53).

Pelletier *et al.* **1994** : PELLETIER (A.), DORY (F.), MEYER (W.), MICHEL (J.-C.) – *L'Isère, 38*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, 1994. 197 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 38).

Perrier 1993 : PERRIER (J.) – *La Haute-Vienne, 87.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1993. 224 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 87).

Pilet-Lemière, Levalet 1989 : PILET-LEMIERE (J.), LEVALET (D.) – *La Manche, 50.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1989. 136 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 50).

Provost 1988 : PROVOST (M.) – *L'Indre-et-Loire*, *37*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1988. 141 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 37).

Provost 1988 : PROVOST (M.) – *Le Loir-et-Cher*, *41*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1988. 159 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 41).

Provost 1988 : PROVOST (M.) – *La Loire-Atlantique*, 44. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1988. 177 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 44).

Provost, 1988 : PROVOST (M.). – *Le Loiret, 45*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1988. 249 p (Carte archéologique de la Gaule ; 45).

Provost 1988 : PROVOST (M.) – *Le Maine-et-Loire, 49*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, 1988. 174 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 49).

Provost, Mennessier-Jouannet 1994 : PROVOST (M.), MENESSIER-JOUANNET (C.). – *Le Puy-de-Dôme, 63*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de

l'Enseignement supérieur et de la Recherche, tome 2, 1994. 375 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 63).

Provost, Rémy *et al.* **1994**: PROVOST (M.) dir., REMY (B.) dir. – *La Haute-Loire, 43*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1994. 192 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 43).

Provost et al. 1996 : PROVOST (M.) – *La Vendée, 85.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, 1996. 246 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 85).

Provost, Vallat et al. 1996 : PROVOST (M.), VALLAT (P.) – *Le Cantal, 15*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1996. 217 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 15).

Rémy *et al.* **1996** : REMY (B.), BALLET (F.), FERBER (E.) – *La Savoie, 73*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1996. 247 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 73).

Rebourg 1993 : REBOURG (A.). – *Autun, Saône-et-Loire, 71*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, 1993. t. 1, 238 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 71).

Rebourg 1993 : REBOURG (A.). – *La Saône-et-Loire*, 71. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, 1993. t. 3, 276 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 71).

Rebourg 1994 : REBOURG (A.). – *La Saône-et-Loire*, 71. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, 1994. t. 4, 552 p (Carte archéologique de la Gaule ; 71).

Rogeret 1998 : ROGERET (I.). – *La Seine-Maritime, 76.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1998. 663 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 76).

Rothé 2001 : ROTHE (M.-P.) – *Le Jura, 39.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Maison des Sciences de l'Homme, 2001. 840 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 39).

Service Régional de l'Archéologie des Pays de Loire 2001 : SERVICE REGIONAL DE L'ARCHEOLOGIE DES PAYS DE LOIRE – *La Sarthe, 72.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, 1993. 519 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 72).

Sion 1994 : SION (H.) – *La Gironde, 33*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, Conseil Général de la Gironde, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1994. 360 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 33).

Thévenard *et al.* **1996**: THEVENARD (J.-J.). – *La Haute-Marne*, *52*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, CNRS, 1996. 372 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 52).

Vernou 1993 : VERNOU (C.) – *La Charente, 16.* Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de l'Education Nationale et de la Culture, 1992. 253 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 16).

Woimant 1995 : WOIMANT (G.-P.) - L'Oise, 60. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, CNRS, 1995. 570 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 60).

60

Zehner 1998 : ZEHNER (M.). – *Le Haut-Rhin, 68*. Paris : Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, ministère de la Culture, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 1998. 375 p. (Carte archéologique de la Gaule ; 68).

Annexe I – Synthèse bibliographique sur l'occupation ancienne du sol en France

FIGURES

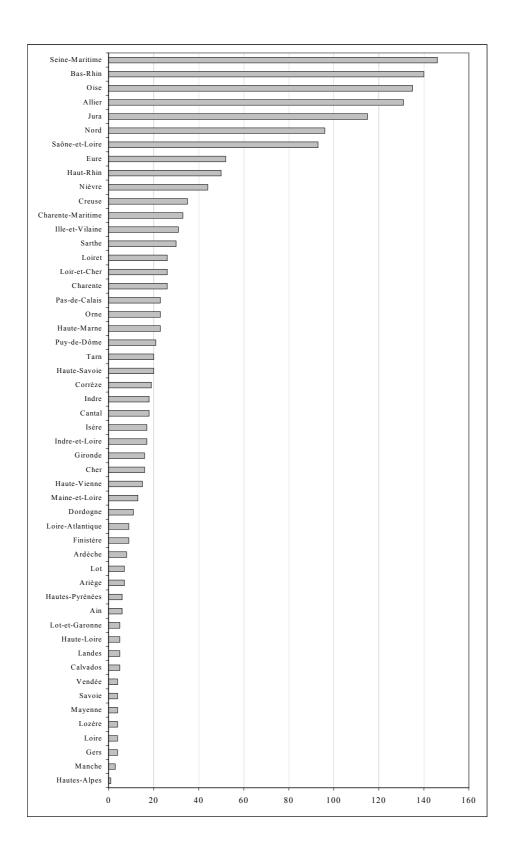


Fig. 1 : Dépouillement de la « Carte archéologique de la Gaule » : nombre de fiches par département.

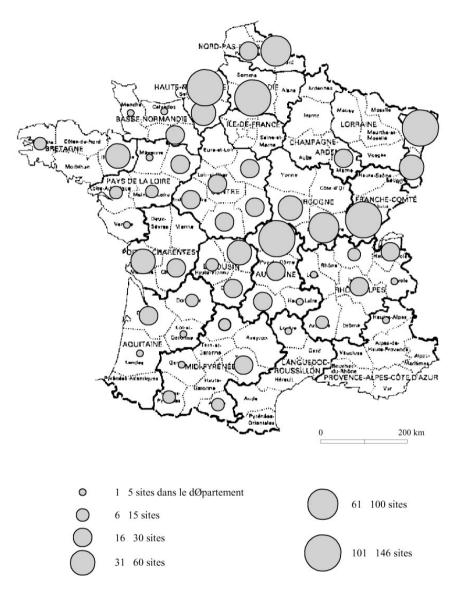


Fig. 2 : Dépouillement de la « Carte archéologique de la Gaule » : nombre de fiches par département (fond de carte : « Carte archéologique de la Gaule »).

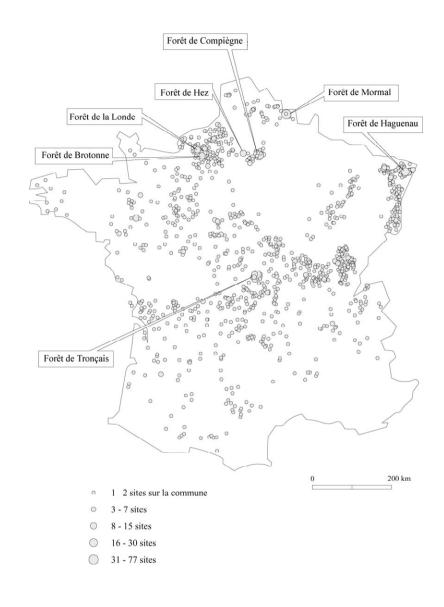


Fig. 3 : Dépouillement bibliographique : nombre de sites par commune.

Annexe I – Synthèse bibliographique sur l'occupation ancienne du sol en France

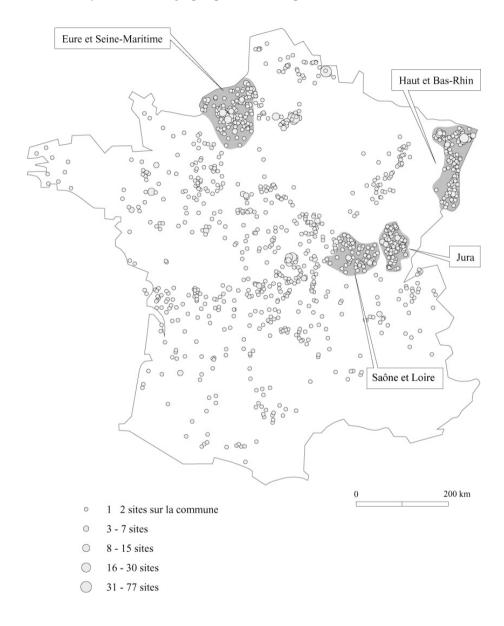


Fig. 4 : Dépouillement bibliographique : zones denses en vestiges.

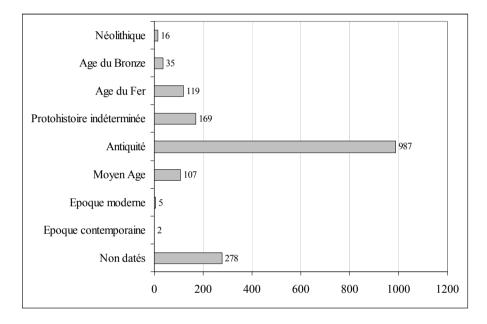


Fig. 5 : Dépouillement bibliographique : nombre de sites par période.

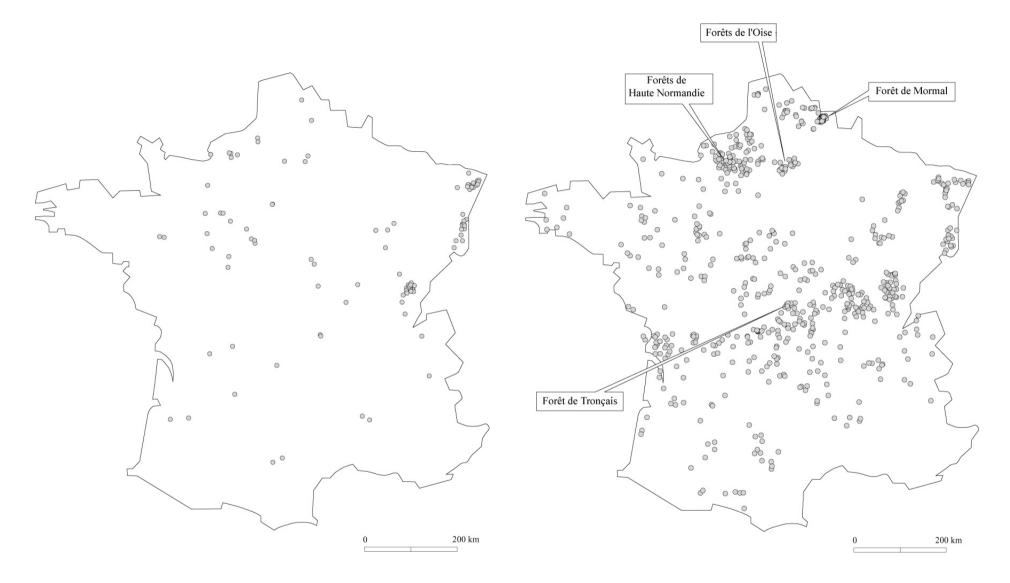


Fig. 6 : Dépouillement bibliographique : sites de l'Age du Fer (datation attestée ou probable).

Fig. 7 : Dépouillement bibliographique : sites gallo-romains (datation attestée ou probable).

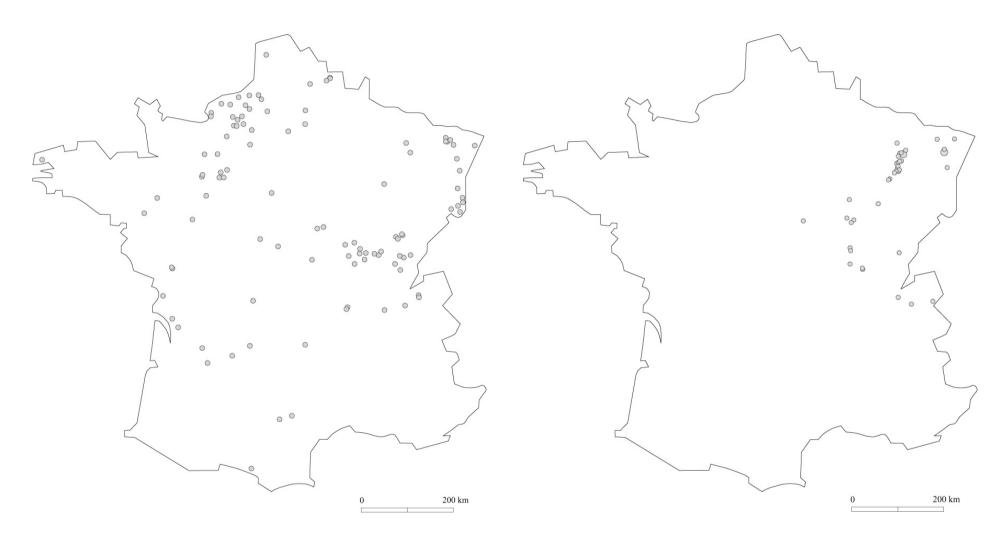


Fig. 8 : Dépouillement bibliographique : sites médiévaux (datation attestée ou probable).

Fig.9 : Dépouillement bibliographique : structures agraires reconnues.

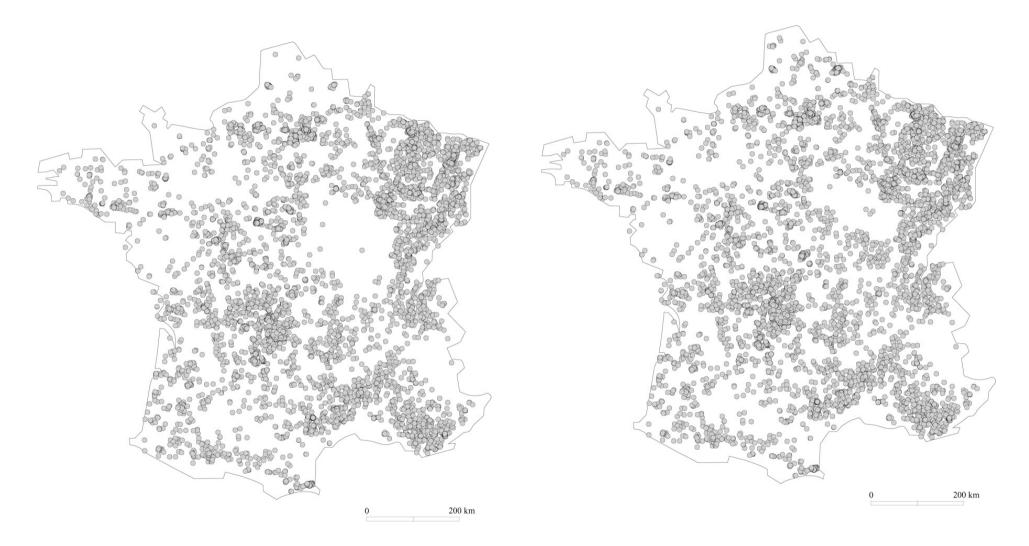


Fig. 10 : Sites situés en milieu forestier : extrait de la base de données «Dracar » du ministère de la Culture par le champ « occupation du sol ».

Fig. 11 : Sites situés en milieu forestier (base de données « Dracar », dépouillement bibliographique et fichier de prospection de L. Laüt).

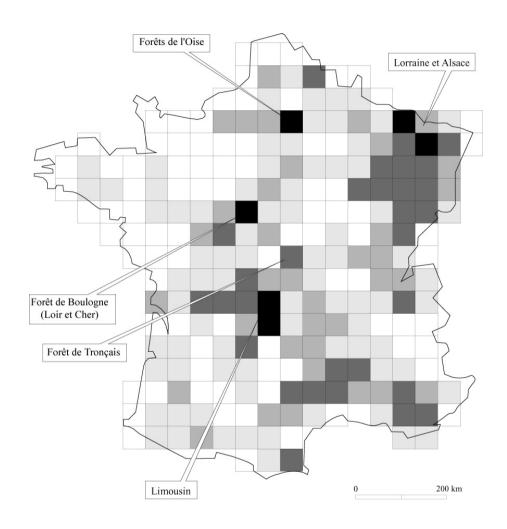


Fig. 12 : Densité de sites archéologiques (base de données « Dracar », dépouillement bibliographique, fichier de prospection de L. Laüt).



Fig. 13 : Répartition des sites par période (base de données « Dracar », dépouillement bibliographique, fichier de prospection de L. Laüt).

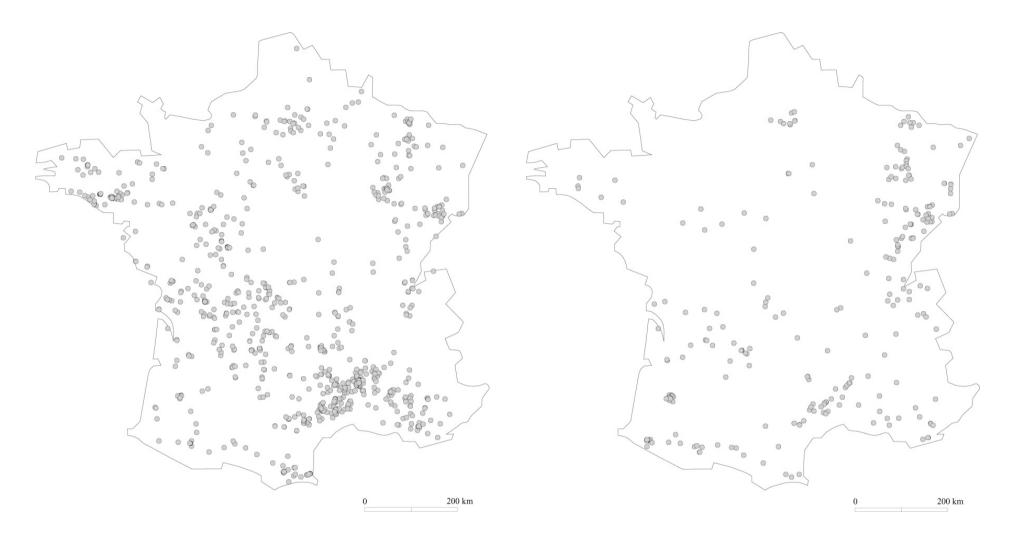


Fig. 14 : Sites du Néolithique-Chalcolithique situés en milieu forestier (base de données « Dracar »).

Fig. 15 : Sites de l'Age du Bronze situés en milieu forestier (base de données « Dracar »).

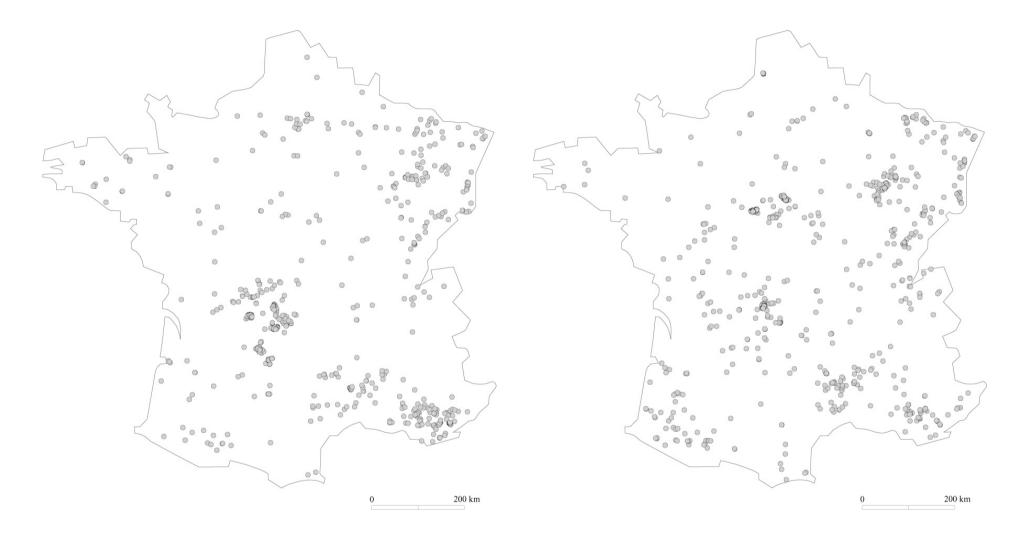


Fig. 16 : Sites de l'Age du Fer situés en milieu forestier (base de données « Dracar »).

Fig. 17 : Sites protohistoriques indéterminés situés en milieu forestier (base de données « Dracar »).

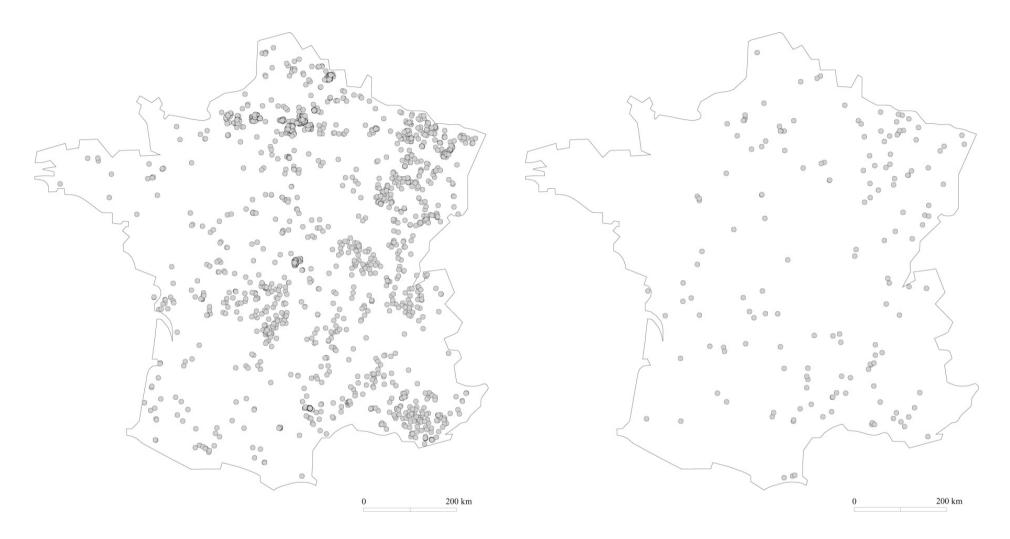


Fig. 18 : Sites gallo-romains situés en milieu forestier (base de données « Dracar »).

Fig. 19 : Sites du haut Moyen Age situés en milieu forestier (base de données « Dracar »).

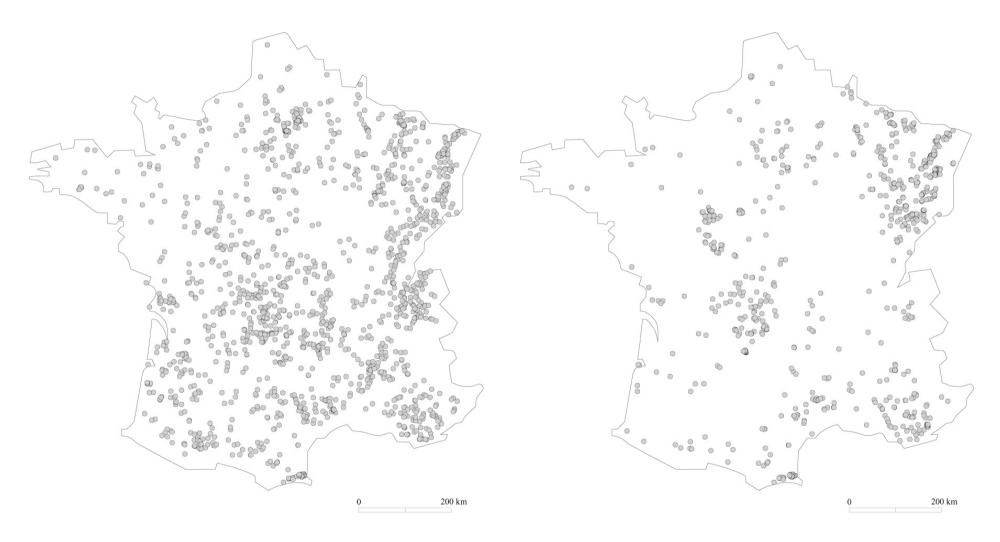


Fig.20 : Sites du Moyen Age situés en milieu forestier (base de données « Dracar »).

Fig. 21 : Sites de l'époque moderne situés en milieu forestier (base de données « Dracar »).

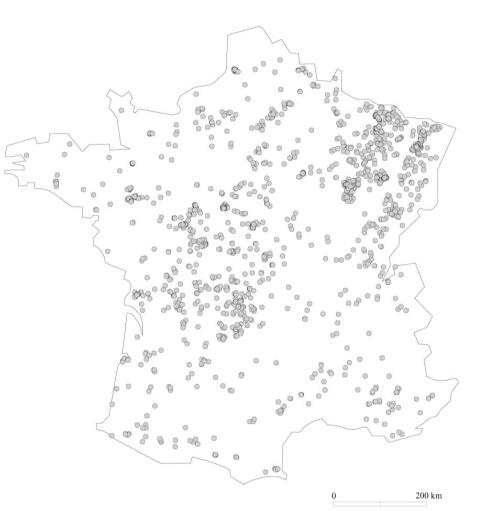
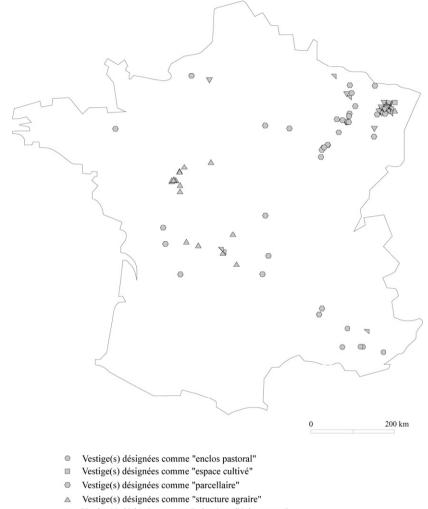


Fig. 22 : Sites de datation indéterminée situés en milieu forestier (base de données « Dracar »).



- ▼ Vestige(s) désignées comme "talus / tas d'épierrement"
- ▼ Vestige(s) désignées comme "terrasse(s)"

Fig. 23 : Structures agraires anciennes situées en milieu forestier (base de données « Dracar »).

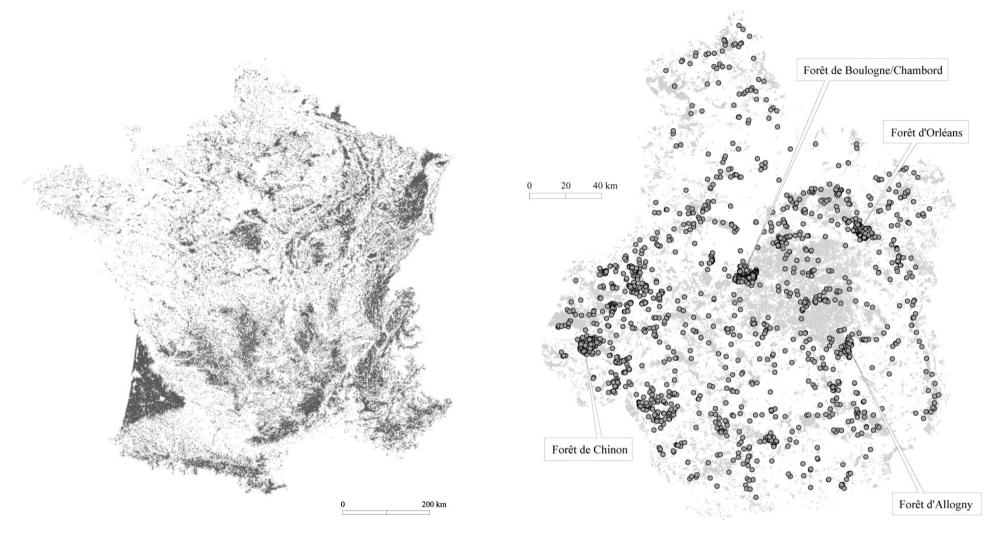


Fig. 24 : Les espaces forestiers en France métropolitaine d'après la base de données CORINE Land Cover.

Fig. 25 : Sites archéologiques situés dans les forêts de la région Centre (base de données « Patriarche »).

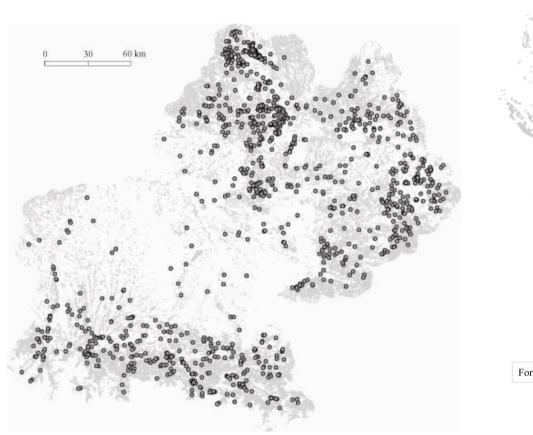


Fig. 26 : Sites archéologiques situés dans les forêts de la région Midi-Pyrénées (base de données « Patriarche »).

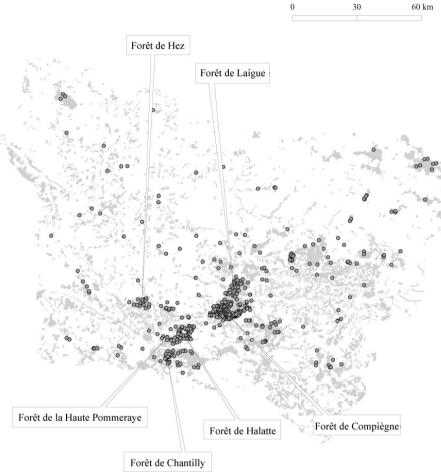


Fig. 27 : Sites gallo-romains situés dans les forêts de Picardie (base de données « Patriarche »).

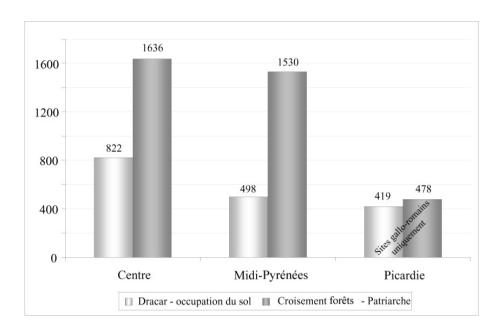


Fig. 28 : Comparaison du nombre de fiches obtenues à partir de deux méthodes d'extraction différentes : par le champ « occupation du sol » de « Dracar » ou par croisement entre les forêts et la base de données « Patriarche ».

Annexe I – Synthèse bibliographique sur l'occupation ancienne du sol en France

ANNEXES



REPUBLIQUE FRANÇAISE
Institut National de la Recherche Agronomique

Jean-Luc DUPOUEY
UMR INRA /UHP
Ecologie et Ecophysiologie Forestière
54280 Champenoux
tél. 03 83 39 40 49
fax. 03 83 39 40 22
courriel : dupouey@nancy.inra.fr

Objet : Archéologie et forêt

Champenoux, le 27 février 2003

Monsieur le Conservateur,

Dans le cadre d'un projet de recherches concernant l'"importance spatiale et les mécanismes de maintien des variations de la biodiversité forestière résultant de pratiques agricoles passées", j'ai chargé Anne Maussion¹, docteur en archéologie de l'université de Paris I de la réalisation d'un inventaire diachronique des sites archéologiques situés en milieu forestier. Ce projet est encadré par Laure Laüt, qui a déjà collaboré avec l'INRA dans le cadre des recherches archéologiques qu'elle mène en forêt domaniale de Tronçais (Allier), et fait l'objet d'une convention (en cours) avec l'UMR 8546 du CNRS.

L'inventaire, réalisé à l'échelle du territoire national, se présentera sous la forme de données réunies à la fois dans des fiches correspondant aux différents sites, et dans des fiches synthétiques à l'échelle de massifs forestiers (densité d'occupation, activités reconnues...).

Cette base de données est destinée à l'élaboration, par le biais d'un SIG, d'une carte des vestiges archéologiques des forêts françaises, carte qui devrait, à terme, se révéler utile aussi bien aux chercheurs qu'aux différents intervenants concernés par la gestion et la conservation du patrimoine historique forestier.

C'est dans l'optique de cette recherche que je me permets de solliciter auprès de vous l'autorisation, pour Anne Maussion, d'accéder à certaines informations contenues dans la base Patriarche ainsi qu'aux archives de votre service. Serait-il possible notamment d'identifier, à partir de Patriarche, les sites relevant d'un couvert boisé et de pouvoir intégrer diverses informations les concernant (essentiellement en terme de localisation, de datation et de grands types de vestiges) à notre base de données ? Il est bien évident qu'en retour vous seront communiquées les informations tirées des dépouillements bibliographiques et des corrélations, sous SIG, avec divers fonds environnementaux. Ceci afin, je l'espère, de pouvoir éventuellement augmenter ou préciser Patriarche.

En outre, vous serait-il possible de préciser à Anne Maussion le nom de la personne à contacter plus particulièrement au SRA, afin de pouvoir discuter de ces questions ?

Je reste à votre entière disposition pour vous fournir tout renseignement complémentaire. Veuillez recevoir, Monsieur le Conservateur, mes salutations respectueuses.

Jean-Luc Dupouey

Directeur de Recherches

nerches 4

¹¹ Anne Maussion, 10 rue Lantiez 75017 Paris. Tél. 01-42-29-45-74, courriel: triangle@magic.fr

INRA - CENTRE DE RECHERCHES FORESTIERES DE NANCY F-54280 CHAMPENOUX - Tél. 03 83 39 40 41 - Fax 03 83 39 40 22

ONNÉES ARCHÉOLOGIQUES EN MILIEU FORESTIER INVENTAIRE POUR LE TERRITOIRE FRANCAIS INRA-NANCY						Fiche analytique par site			
N° INSEE 71	572	2	N° PATRIARCHE			N° S	ITE [
RÉGION	BOURG	OGNI	=	D ₂	DATE DE LA				
DÉPARTEMENT	SAONE-	ET-L	OIRE	DE	DÉCOUVERTE 1976				
COMMUNE	VERS				coordonnées lambert				
LIEU-DIT	Dans les	bois	de Montmâcon	Р	PRÉCISION Centroide communal PROJECTION Lambert II étendu				
MICROTO- PONYME					SURFACE DU SITE				
N° D'UNITÉ FO'RESTIÈRE					RAYON				
atelier de ta	FONCTION PRINCIPALE atelier de taille								
REMARQU	ACTIVITÉS RECONNUES SUR LE SITE REMARQUES "Dans les bois de Montmâcon, lors de prospections de surface, a été découve un vaste atelier de taille néolithique."							ı été découvert	
 ○ agriculture ○ élevage ○ activités artisanales ○ autres VESTIGES MATÉRIELS CORRESPONDANTS									
	DATATION								
PHASE NEOLITHIQUE PÉRIODE									
SOURCES Carte archéologique de la Gaule - Saône-et-Loire, 1994, 439.									

Exemple de fiche de la base de données FileMaker Pro.

Annexe II

Legacies of Roman agriculture on present forest biodiversity

Dupouey J.L. $^{(1)}$, Dambrine E. $^{(1)}$, Laüt L. $^{(2)}$, Humbert L. $^{(1)}$, Thinon M. $^{(3)}$, Beaufils T. $^{(4)}$, Richard H $^{(5)}$

- (1): INRA, 54280 Champenoux, France
- (2): UMR 8546, Ecole Normale Supérieure, 45 rue d'Ulm, 75005 Paris, France
- (3): IMEP, Case 461, Faculté St-Jérôme, 13397 Marseille cedex 20, France
- (4): 5, rue Chevigney, 25170 Emagny, France
- (5): CNRS, Laboratoire de Chrono-écologie, 16 route de Gray, 25030 Besançon, France

Correspondence and requests for materials should be addressed to Jean-Luc Dupouey (dupouey@nancy.inra.fr).

Abstract for readers of the journal

Combined archaeological and ecological investigations in ancient oak forests of Central France show an unexpected strong correlation between present day forest biodiversity patterns and ancient human settlements dated from the Roman period. Plant species richness increases systematically towards the centre of the settlements. This pattern is paralleled by an increase in soil pH, available P and $\delta^{15}N$ indicating a long-term impact of agriculture. Hence, forest biodiversity has been strongly altered over large areas by ancient agricultural land use. This impact is probably irreversible because of the conservative nature of forest biogeochemical cycles.

Abstract for the general public

Plant diversity patterns in present forests are generally explained by climate and soil variations, and the way these areas were managed for forest or agriculture during the last centuries. Recent archaeological investigations in France show that forests had been cultivated over large areas during the Roman period. Here we show that plant species distribution in these forests is closely linked to the distribution of Roman settlements. Hence ancient agriculture is a major cause of present day plant diversity patterns. This long term memory of forest ecosystems is related to soil fertility changes induced by agriculture.

Keywords: biodiversity, archaeology, forest, land-use history

Sentence summary:

Former agricultural land use, even dating from two millennia, is an important and underestimated cause of biodiversity in present forests.

In Western Europe and Eastern USA, between 50 and 80% of the present forest area are recent forests, developed on lands previously used for agricultural purposes in the 19th and early 20th Centuries^{1,2}. The comparison of these recent forests versus ancient forests, that were not deforested according to written historical documents, shows that former agricultural use is a major factor influencing biodiversity patterns in present forests³⁻⁷. The length of time these agricultural legacies persist is a major scientific question^{5,8}, both for the analysis of present biodiversity patterns and for predicting long term impacts of present human activities on future ecosystems. In order to examine the question of how long the consequences of agriculture can persist, we searched for the oldest abandoned agricultural systems we could find in present day forests. Here we show that forest biodiversity is strongly altered over large areas by ancient agricultural land use dating from two millennia, and that this impact is probably irreversible because of the conservative nature of forest biogeochemical cycles.

Impacts of former agriculture on plant diversity are clearly visible in recent forests dating from the beginning of the 20th century⁹⁻¹¹. They have also been observed in Western European forests dating from the 19th century³ or 18th century^{5,12}. Where sufficiently ancient maps or texts are available, significant differences between recent and ancient forests can still be observed after 400 years⁵. Recent forests are richer in ruderal plants, typical of cultivated landscapes^{3,4}. Some species, which are present in ancient forests only, mainly due to their poor dispersal abilities^{5-7,13}, have been given a high conservative value. For periods preceding the Middle Ages, archaeological information only can be used. Few archaeological investigations have taken place in forests compared to open cultivated areas because aerial identification of ancient settlements is not possible under forest cover, and artefacts are not brought back to the soil surface by ploughing. This has lead to the questionable impression that ancient forests have never been cultivated before the historical period. However, systematic inspection of the ground surface in French forests has recently brought to light large agricultural cadastres dated from the Roman times^{14,15}, and we used these sites to study the consequences today of agriculture from 2000 years ago.

Tronçais forest, covering 10,600 ha on a homogeneous sandy plateau of Central France, is the most well known source of high quality oak wood in France. Soils are mostly sandy acidic inceptisols, with various degrees of hydromorphy, developed from sandstone or alluvial sand deposits 16. Stands are mainly pure even-aged high forests of *Quercus petraea*. All available historical documents point to a long and continuous forest history. First available maps (Fleury, dated from 1665, scale 1:7,300) indicate forest boundaries very similar to the present ones. By the 17th century, according to the King's advisers Doquère (1645) and Hurault (1670), this forest, as with most forests in France, was heavily exploited for wood products and husbandry. Soil charcoal identification down to the bedrock in two sites displayed a large dominance of oak (between 75% and 100% of charcoal mass), whatever the soil layer.

In this previously considered ancient forest, belonging to the Roman Biturige Cubi territory, one hundred and eight Roman settlements were located and dated^{17,18} (1st-4th century AC) using surface survey of stones, tiles and ceramics (Fig. 1). Some buildings appear as 0.1-1m high elevations made of stones covering between 10 and 100 m². But many settlements where only detected from surface collection of ceramics pieces, notably in mole hills. A spatial analysis of human settlements distribution showed they were scattered over most of the landscape, but preferentially located not far from a source of water. All soil types were equally occupied, except the most hydromorphic and acid ones, covering a minor proportion of the forest area.

Plant diversity and soil properties were assessed in 165 plots along gradients of increasing distance (0 to 500 m) from the centre of 10 roman sites. Sites were chosen to cover a range of settlement sizes. Four of these sites were excavated. Different types of occupation were identified from the artefacts found and the spatial layout of buildings and structures: farming, tile making, iron smelting and religious buildings. In two sites, pollen grains were analyzed in wet depressions in the close vicinity of the settlements. Both displayed deep layers enriched in

cereal pollen (between 2.7% and 11.1% of total pollen, versus between 71% and 91% of arboreal pollen) demonstrating former cultivation in a forested landscape.

A correspondence analysis of plant community composition displayed a main factor, significantly and positively correlated to the number of species (r=0.81), soil pH (r=0.65), the Ellenberg's indices¹⁹ for acidity (r=0.78) and nitrogen availability (r=0.64), the abundance of archaeological artefacts (ceramic and tile pieces, r=0.52), and negatively to the distance to the centre of the site (r=-0.47). Thus, ancient human occupation appeared as a major determinant of present forest plant diversity and soil fertility. The second factor was related to between site differences.

The number of species per plot (α -diversity) increased sharply from remote areas towards the centre of the settlements (Fig. 2a), by 9 species on average. Balancing the number of samples between inner and outer zones, at 100 meters from the centre of the settlement, 160 species were found in total within the central zones, while 131 species only were found in the external areas, although covering a more extended sampling area. Thirty-nine species were significantly more frequent near the centre of the settlements, according to a Fisher's exact test. These species were typical of neutral soils, especially many shrubs such as *Crataegus monogyna*, *Evonymus europaeus*, *Rosa arvensis*, *Acer campestre* or *Prunus spinosa*. Others were nitrogen-demanding species (*Ajuga reptans*, *Urtica dioica*, *Geranium robertianum*, *Scrophularia nodosa*, *Poa trivialis*). Seven species only were more frequently found >100m from the centre, typical of acidic soils (*Leucobryum glaucum*, *Molinia caerulea*, *Polytrichum formosum*) or previously known as ancient forest species 7 (*Convallaria maialis*). Thus ancient human occupation, both in terms of species richness and habitat types adds a significant amount of diversity to the present forest.

This conclusion was validated against an independent dataset of 151 vegetation plots surveyed for a previous forest inventory. This sample covered the entire range of natural ecological conditions occurring in the Tronçais forest, mostly outside the Roman settlements. In the whole forest, the vegetation was mostly composed of acidophilous species and no site appeared richer in species than those close to the Roman settlements.

Distance to the centre of the plot was also a strong determinant of soil variations around the buildings. Soil P content, pH and $\delta^{15}N$ all increased towards the centre of the settlements (Fig 2 b, c, d). The role of differences in fertility prior to the settlement installation can be ruled out as no systematic relationship was observed between the distance to the settlements and soil depth, soil types or texture. Moreover, an analysis of variance showed that the local abundance of soil artefacts, in addition to the distance to the centre, explained a significant proportion of total variance in vegetation diversity, soil $\delta^{15}N$ and pH variations.

Several mechanisms explain this fine tuning of forest biodiversity over short distances by the intensity of ancient land-use. Given the small spatial scale and long time span studied, limitation by dispersal is unlikely. Soil modifications are a more likely explanation. Higher soil pH near the buildings and in locations with a high artefact content is related to the dissemination of lime mortar found in several ruins, and possibly former liming which was a common practice in Gaul before and during the Roman times²⁰. Soil P content is known to be elevated at sites formerly cultivated due to manuring practices²¹. The elevation of the ¹⁵N/¹⁴N ratio can be related to both the input of ¹⁵N enriched manure and an increased nitrification of soil nitrogen^{22,23}. Such effects have been described on agricultural fields abandoned a century ago^{24,25} but they were unexpected in fields from Roman agriculture.

Nevertheless, Latin authors repeatedly mentioned the need for regular fertilization after ploughing, using ashes or animal manure²⁰. This fertilization involved a transfer of mineral elements from remote areas, probably forest, to the cultivated areas surrounding the farms, by cattle grazing and fuel wood collection. The spatial distribution of broken ceramics in soils indicates formerly manured areas, which are still presently more fertile and diverse. This

transfer of fertile elements from forested or grazed areas to cultivated areas may have contributed, not only to the present higher fertility of cultivated areas but also to the acidity and poverty of sites away from the settlements.

The maintenance during more than 1500 years of this signal is related to the conservative nature of mineral cycling in these forest ecosystems, where inputs and outputs of mineral elements are fairly low (Ulrich). Differences in soil bacterial or mycorrhizal communities could be both a consequence and a cause of the long-term maintenance of soil and vegetation spatial differentiation.

Our results show that forest biodiversity is strongly impacted today by ancient cultivation, almost two millennia after abandonment of human occupation. They extend to a much larger scale and to acid soils previous observations obtained in a small Roman settlement on limestone in France²⁶. Forest area in Western Europe has often been considered to be continuously shrinking from the first large Neolithic deforestations until the minimum of the 19th century. But recent surveys in large forests of France, that were previously considered to be ancient, show that occupations abandoned to forest in the 3rd and 4th century AD, are not exceptional but quite frequent (ref Leroy, AGER). These findings challenge the concept of ancient forest, at least in France and probably for the former Roman Empire, which covered a large part of Europe. They also open a new perspective on the origins of biodiversity patterns in forests. Such legacies of ancient agriculture in present forests are not restricted to the temperate world or Roman period. Recent investigations in the Amazon show long-term legacy of pre-Columbian agriculture on tropical forest biodiversity²⁷. Understanding present and future patterns of biodiversity requires investigation of land-use history on a much longer time scale than previously thought.

Methods

Charcoal identification

Three soil pits located at 20, 240 and 440 meters from the settlements were opened and 6-15 kilograms of soil were sampled in each soil layer down to the bedrock (ca 1m). Samples were sieved and all charcoals down to 400 µm were collected by flotation, acid-washed and identified under the microscope. Total charcoal mass varied from 70 to 220 mg.kg⁻¹ soil. The cumulated amount of charcoal from old-field species such as *Corylus*, *Betula* and *Pinus* in each horizon was never higher than 7%.

Plant and soil sampling and analysis

In each plot (100 m²), the complete list of phanerogams and terricolous mosses was drawn up and the soil was described and sampled. Vegetation composition was characterized by correspondence analysis. The ecological meaning of vegetation differences between the plots was partly interpreted using Ellenberg's indicator values for nitrogen, acidity and humidity¹⁹. Low values of nitrogen, acidity and humidity scores indicate preferences for nitrogen-poor, acid and dry conditions, respectively. Soil humus, colours, texture and stoniness was described down to 1 meter. The upper mineral soil (0-10 cm) was sampled over a 400 cm² area and sieved (4 mm) to collect archaeological artefacts. Soil samples were air dried, and analyzed for pH, C, N, acid extractable P. δ^{15} N and coarse sand content were measured after sieving (200µm).

References

- 1. Mather, A.S., Needle, C. L. & Fairbairn, J. The human drivers of global land cover change: the case of forests. *Hydrol. Proc.* 12, 1983 (1998).
- 2. Bellemare, J., Motzkin, G. & Foster, D. R. Legacies of the agricultural past in the forested present: an assessment of historical land-use effects on rich mesic forests. *J. Biogeogr.* 29, 1401 (2002).
- 3. Koerner, W., Dupouey, J.-L., Dambrine, E. & Benoît, M. Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains. *J. Ecol.* 85, 351 (1997).
- 4. Foster, D.R. Insights from historical geography to ecology and conservation: lessons from the New England landscape. *J. Biogeogr.* 29, 1269 (2002).
- 5. Peterken, G. F. & Game, M. Historical factors affecting the number and distribution of vascular plants species in Central Lincolnshire. *J. Ecol.* 72, 155 (1984).
- 6. Hermy, M. *Biodiversity, temperate ecosystems, and global change* (eds Boyle, T. J. B. & Boyle, C. E. B.) 123-144 (Springer, Berlin, 1994).
- 7. Hermy, M., Honnay, O., Firbank, L., Grashof-Bokdam, C. & Lawesson, J. E. An ecological comparison between ancient and other forest plant species of Europe, and the implication for forest conservation. *Biol. Conserv.* 91, 9 (1999).
- 8. Peterken, G. F. *Natural woodland. Ecology and conservation in northern temperate regions* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1996).
- 9. Foster, D. R. Land-use history (1730-1990) and vegetation dynamics in central New England. *J. Ecol.* 80, 753 (1992).
- 10. Dzwonko, Z. & Loster, S. Species richness and seed dispersal to secondary woods in southern Poland. *J. Biogeogr.* 19, 195 (1992).
- 11. Singleton, R., Gardescu, S., Marks, P. L. & Geber, M. Forest herb colonization of postagricultural forests in central New York State, USA. *J. Ecol.* 89, 325 (2001).
- 12. Wulf, M. Plant species as indicators of ancient woodland in northwestern Germany. *J. Veg. Sci.* 8, 635 (1997).
- 13. Vellend, M. Habitat loss inhibits recovery of plant diversity as forests regrow. *Ecology*, 84, 1158 (2003).
- 14. Laffite, J.-D., Dambrine, E., Dupouey, J.-L. & Georges-Leroy, M. Le parcellaire galloromain de la forêt domaniale de Saint-Amond à Favières (Meurthe-et-Moselle) : relevé et étude du parcellaire du «Grand Rinchard». *Revue Archéologique de l'Est* 51, 465 (2002).
- 15. Mangin, M., Courtadon, J.-L., Fluzin, P. & de Laclos, E. *Village, forges et parcellaire aux Sources de la Seine. L'agglomération antique de Blessey-Salmaise* (Presses Univ. Franc-Comtoises, Besançon, 2000)
- 16. Bonfils, P., La forêt de Tronçais Etude pédologique. Rev. For. Fr. 22, 35 (1970).
- 17. Bertrand, E. Le Pays de Tronçais. 2. Les sites antiques. *La lettre du Pays de Tronçais* 1 (1996).
- 18. Laüt, L. L'occupation du sol dans l'Antiquité en forêt de Tronçais, prospection thématique et sondages (Service Régional de l'Archéologie, Clermont-Ferrand, 2001).
- 19. Ellenberg, H. *et al.* Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica* 18, 1 (1991).
- 20. Columella, L. J. M. *On Agriculture (De Re Rustica)* (Harvard Univ. Press, Cambridge, Massachusetts, 1961, written ca 60-65 AD).
- 21. Craddock, P. T., Gurney, D., Pryor, F. & Hughes, M. J. The application of phosphate analysis to the location and interpretation of archaeological sites. *The Archaeological Journal* 142, 361 (1985).
- 22. Koerner, W., Dambrine, E., Dupouey, J.-L. & Benoît, M. δ^{15} N of forest soil and understorey vegetation reflect the former agricultural land use. *Oecologia* 121, 421 (1999).
- 23. Jussy, J.-H., Koerner, W., Dambrine, E., Dupouey, J.-L. & Benoît, M. Influence of former agricultural land use on net nitrate production in forest soils. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 367 (2002).

- 24. Compton, J. E., Boone, R. D., Motzkin, G. & Foster, D. Soil carbon and nitrogen in a pine-oak sand plain in central Massachusetts: role of vegetation and land-use history. *Oecologia* 116, 536 (1998).
- 25. Compton, J. E. & Boone, R. D. Long-term impacts of agriculture on organic matter pools and nitrogen transformations in central New England forests. *Ecology* 81, 2314 (2000).
- 26. Dupouey, J.-L., Dambrine, E., Laffite, J.-D. & Moares, C. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology* 83, 2978 (2002).
- 27. Heckenberger, M. J. et al. Amazonia 1492: pristine forest or cultural parkland? Science 301, 1710 (2003).

Acknowledgments

We thank P. Behr, B. Pollier and J.R. Bourdet for help during field work. E. Bertrand provided us with invaluable archaeological information. We also thank Y. Lejean from ONF for his helpful support and discussions, and P. Marks for helpful comments. This work was financially supported by the GIP-ECOFOR "Forest Biodiversity" program.

Figures and tables

Figure 1 - Tronçais forest map indicating the location of Roman buildings^{17,18}. Those studied here are black dots.

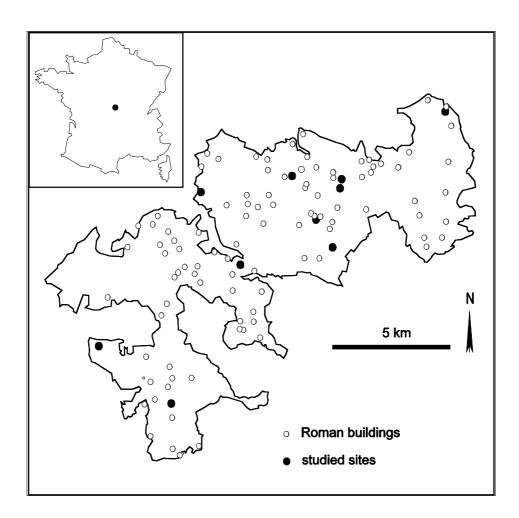


Figure 2 - Vegetation and soil characteristics as a function of distance to the centre of the settlement. (a) species richness (b) soil phosphorus content (mg.kg⁻¹) (c) soil pH (d) Ellenberg's indicator value¹⁹ for nitrogen (e) scores on the first axis of a correspondence analysis (f) $\delta^{15}N$ (‰). Relative values in reference to the average in the outer zone (> 100 m). Solid lines: moving average.

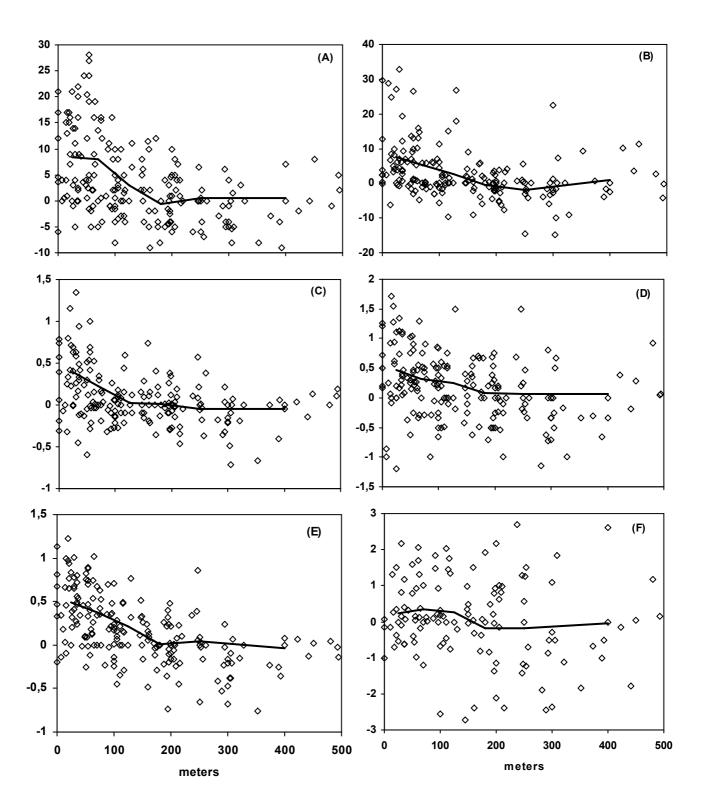


Table 1 - Analysis of variance of vegetation and soil characteristics as a function of distance to the centre of the settlements and site. For each variable are given the average values below and above 100m from the centre of the settlement, the F-values and associated tests (***: P<0.001, **: P<0.01, *: P<0.05, ns otherwise) of the distance and site effects, and the total R^2 of the model.

		veget	soil					
	Number of species	First axis of correspondence analysis	Ellenberg's pH indicator value	Ellenberg's light indicator value	Phosphorus (mg.kg ⁻¹)	рН	sand (%)	soil δ ¹⁵ N (‰)
Centre	25.3	0.42	5.3	4.6	26.4	5.1	43	-0.98
Remote areas	16.8	-0.08	4.3	4.6	20.2	4.8	42	-1.43
Fdist	49.9***	82.4***	84.9***	0.1 ^{ns}	24.8***	19.7***	0.3 ^{ns}	4.5*
Fsite	6.0***	6.8***	5.5***	20.1***	26.5***	6.7***	12.3***	1.9 ^{ns}
\mathbb{R}^2	34%	42%	41%	36%	50%	25%	26%	7%

Annexe III

Microbial activity and abundance in the rhizosphere soil of seven herbaceous species cultivated under controlled conditions: relationships with plant growth and root C concentrations

M. Valé¹, C. Nguyen^{1*}, E. Dambrine², J.L. Dupouey³

*Corresponding author

E-mail: christophe.nguyen@ensaia.inpl-nancy.fr

Telephone number : +33 383 59 57 87

Fax number: +33 383 59 57 99

Abstract

The stimulation of rhizosphere microorganisms by root-released exudates is important for nutrient cycling and differs between plant species. The reasons for this between-species variability are poorly understood. In the present work, we correlated the plant growth and root C concentrations with rhizosphere bacterial abundance (CFU: colony forming unit) and an index of microbial activity (*in vitro* utilization of [U-¹⁴C]glucose by soil microorganisms) in seven herbaceous plant species cultivated in greenhouse for 5 weeks. We found significant differences among species for the bacterial abundance and microbial activity. The bacterial abundance correlated negatively with the concentration of roots in non-soluble C and the microbial activity index correlated positively by shoot biomass. In addition, we found a negative correlation between the shoot biomass and the root non-soluble C. Hence, the faster the plant growth, the lower root non-soluble C concentrations and the higher the microbial activity and abundance in the rhizosphere.

Keywords: Exudation, microbial activity, rhizosphere, between-species variability

In natural ecosystems, the availability of nutrients to plants depends to a large extent on the heterotrophic microbial activity, which is central to the net mineralization of the soil organic matter (Norton, 1999; Molina and Smith, 1998). In the rhizosphere, root exudation of easily available organic compounds stimulates microorganisms, which in return favour the availability of minerals (Kuzyakov, 2002; Kuzyakov and Cheng, 2001; Grayston *et al.*, 1996). The rhizosphere microbial activity has been reported to be different among plant species (Van der Krift and Berendse, 2001) likely in relation with differences in root exudation among species (Warembourg *et al.* 2003; Van der Krift *et al.*, 2001). Root exudation originates in the diffusion of root solutes from the cytosol to the soil solution (Nguyen, 2003). Rhizosphere microbial activity is thus expected to be higher in plant species that have a high concentration in root solutes, a fast growth (important flux of photoassimilates) and a low concentration in root structural C, which may limit the passive diffusion of exudates through the root tissue. This hypothesis was evaluated in the present work by comparing the rhizosphere overall microbial activity (*in vitro* mineralization of small amount of [U-14C]glucose; Nguyen and Henry, 2002) and the bacterial abundance (CFU: colony forming unit) between seven herbaceous species

¹ Equipe Rhizosphère. UMR INRA/INPL-ENSAIA Agronomie et Environnement Nancy-Colmar, 2, avenue de la forêt de Haye, 54505 Vandoeuvre Les Nancy, France.

² Biogéochimie des écosystèmes forestiers, INRA Nancy, 54280 Champenoux, France. dambrine@nancy.inra.fr

³ Equipe Phyto-écologie forestière. UMR EEF INRA, 54280 Champenoux, France. dupouev@nancv.inra.fr

grown in greenhouse in relation with the plant growth and with the root C concentrations (soluble and non-soluble C).

Assuming that through microbial stimulation, exudation might accelerate nutrient cycling and favour mineral availability to the plant (Hamilton and Frank, 2001; Van der Krift *et al.*, 2001; Grayston *et al.*, 1996), we chose species with contrasted nutrient requirement according to Ellenberg N indicator 'EN' (Ellenberg *et al.*, 1992). The species associated to low nutrient requirements were *Teucrium chamaedrys* (EN = 1), *Briza media* L. (EN = 2), *Rumex acetosella* L. (EN = 2) and those associated to high requirements were *Epilobium hirsutum* L. (EN = 8), *Eupatorium cannabinum* L. (EN = 8), *Rumex obtusifolius* L. (EN = 9) and *Urtica dioica* L. (EN = 9). We expected that plant species with high nutrient requirements have high microbial abundance and activity in their rhizosphere in relation with a high growth and a high concentration of soluble C in roots.

We used a forest soil collected (5-30 cm depth) at Champenoux, (North-East of France). It had the following characteristics: 26.5 % clay, 48.8 % silt, 24.7 % sand, pH(H₂O) 4.8, 1.56 % organic C, 0.13% total N, C/N ratio of 12.2, 2.2 mg kg⁻¹ NO₃⁻-N, 19.9 mg kg⁻¹ NH₄⁺-N. After collection and sieving (<5 mm), 800 g of soil at 70 % of its water holding capacity (23 % of gravimetric water content) were packed into PVC square pots (height 10.5 cm, width 10 x 10 cm). The plant material was kindly provided by the Botanical Garden of Nancy (France). Plants of *R. obtusifolius* derived from seedlings whereas all other plants were obtained from cuttings. Eight cuttings or seeds per species were planted/sown in the aforementioned pots, in greenhouse at 25°C +/-7. The soil humidity was maintained at 70% of the water holding capacity by addition of water at least once a day. Five weeks after germination or after the re-growth of cuttings, the plants were sampled. Due to the death of some cuttings and to the failure of germination in case of *R. obtusifolius* the final number of replicates was as follows: *T. chamaedrys* n=7, *B. media* n=3, *R. acetosella* n=8, *E. hirsutum* n=6, *E. cannabinum* n=8, *R. obtusifolius* n=5 and *U. dioica* n=6.

The soil non-adhering to roots after shaking gently the plants was discarded. All visible roots and the soil adhering to them were soaked in 100 mL of phosphate buffer and shaken for 10 minutes at 40 rev min⁻¹. Afterwards, the slurry of rhizosphere soil was sieved (500 µm) to collect roots. Shoots and washed roots were freeze-dried and weighted. Root total C concentration was determined by a microanalyser (Flash EA 1112 series, Thermo Finnigan). The root soluble C was extracted sequentially twice from a 20 mg dry matter aliquot of root powder with 10 mL ethanol at 80°C for 30 minutes. The pooled ethanol fractions were evaporated under vacuum, the residue was dissolved in 20 mL of 1% phosphoric acid (to limit microbial development) and the extracts were analysed for the C concentration by a TOC analyser (TOC 5000, Shimadzu). The root non-soluble C concentration was calculated as the difference between the total and the soluble C concentrations.

After serial dilutions, the slurry of rhizosphere soil was plated on 10 % TSA (Trypticase Soy Agar) and incubated at 22°C. The colonies were counted after 2 days and expressed as bacterial density (Log(CFU g^{-1} soil)). The microbial activity was evaluated from a 14 C-glucose assay as described by Nguyen and Henry (2002). The soil samples were incubated 6 d with a small amount of [U- 14 C]glucose (3700 Bq, 2.9 ng C) and we determined the partitioning between 14 CO₂ and microbial labile 14 C_{FE} (flush of soluble 14 C after fumigation with chloroform vapours). High 14 CO₂ (derived from microbial gross growth) and low 14 C_{FE} (microbial storage of 14 C) are indexes of high overall microbial activity (Nguyen and Henry, 2002).

Statistical analyses were performed with SAS software V8.02 (The SAS institute, Cary, NC, USA). Because of the unequal number of replicates, we used the general linear model (proc GLM) to test the effect of the plant species on the microbial abundance and activity (ANOVA). Means were grouped according to the Tukey test at p<0.05 of significance level. The correlation coefficients were computed with the CORR procedure.

Plant growth was significantly different among species (Figure 1). *E. hirsutum* produced the greatest biomass (1.07 g) whereas growth of *T. chamaedrys* was the lowest (0.13 g). The differences in growth were more marked for shoots than for roots. The average of the total C concentration in roots was around 37% of dry weight (DW) and the partitioning between soluble and non-soluble C differed significantly among species (Figure 2). Roots of *E. hirsutum* and of *E. cannabinum* were the poorest in non-soluble C but they were among the richer in soluble C. *T. chamaedrys* had high concentrations in both soluble and non-soluble C. Relatively to these species, other species were

characterized by a high concentration in non-soluble C and a low concentration in soluble C. The root soluble and non-soluble C concentrations were weakly negatively correlated (Table 1). We found a very highly significant negative correlation between the concentration of roots in non-soluble C and the shoot biomass, in agreement with what was reported by Poorter and Bergkotte (1992) who evidenced that slow growing species had more structural C than fast growing species.

The bacterial densities in the rhizosphere soil ranged between 10⁸ and 3.10⁹ CFU/g dry soil (Figure 3). There was a highly significant effect of the plant species on the bacterial densities (p=0.007). The bacterial densities in the rhizosphere soil of *E. hirsutum* and *E. cannabinum* were one order of magnitude higher than that of *R. acetosella*, which was the lowest (Figure 3). Most of the soil bacteria are commonly not cultivable (McCaig *et al.*, 2001) and therefore, the bacterial densities determined after plating soil extracts on nutrient agar do reflect the *in situ* whole bacterial population. Nevertheless, the CFU counting has been reported to relate to the availability of C in the root environment (Duineveld and van Veen, 1999), which was targeted here. In addition, the *in vitro* utilisation of [U-14C]glucose, which is an index of the activity of all soil microorganisms (Nguyen and Henry, 2002) correlated significantly with the bacterial densities (Table 1) and classified the species in agreement with the classification based on the bacterial abundance: the highest microbial activity (high ¹⁴CO₂, low ¹⁴C_{FE}) was found in *E. hirsutum* and in *E. cannabinum* and the lowest in *T. chamaedrys* and *R. acetosella* (Figure 4). Altogether, our results suggest that roots of *E. hirsutum* and of *E. cannabinum* likely released more C in the soil than that of *T. chamaedrys* and *R. acetosella*

The bacterial densities were positively correlated with the shoot biomass (Table 1). However a stronger negative correlation was found with the concentration of roots in non-soluble C indicating that the more the non-soluble C in roots, the less the bacterial densities in the rhizosphere. We suggest that the accumulation of non-soluble C in roots (possibly structural C such as lignin and hemicellulose) might decrease the permeability of roots to solutes, which might limit the stimulation of the bacterial growth by root exudates. Unexpectedly, the bacterial densities were not correlated with the root soluble C (Table 1). Indeed, Henry *et al.* (2004) found that in *Lolium multiflorum*, exudation was correlated with the soluble C concentration in roots, which was assumed to favour the passive diffusion of solutes from the cytosol to the outside of the roots. This might indicate that when considering several species altogether, the non-soluble root C better reflects exudation, regardless of the richness of root tissue in solutes whereas for a given species, which has a fairly constant root concentration in non-soluble C, the concentration of soluble C in roots might be a better indicator of exudation.

The shoot biomass and to a less extent the root biomass were positively correlated with the microbial activity (positive correlation with $^{14}\text{CO}_2$ and negative correlation with $^{14}\text{C}_{FE}$, Table 1). Hence, the higher the plant growth, the greater the microbial activity in the rhizosphere soil. Similarly to bacterial densities, microbial activity was also negatively correlated with root concentration in non-soluble C (Table 1).

In summary, our results pointed out that the abundance and activity of microorganisms in the rhizosphere were well explained by the root non-soluble C and by the plant growth, which are correlated altogether. It can be assumed that the greater the growth, the less structural C in the roots (Poorter and Bergkotte, 1992), the greater the diffusion of root solutes (exudation) and the greater the microbial abundance and activity in the rhizosphere. Compared to plants with lower growth, fast growing plants need generally important fluxes of minerals and they might release more available root C, which would accelerate soil nutrient cycling through microbial stimulation (Hamilton and Frank, 2001).

Acknowledgements

The authors would like to thank Y. Lefèvre for providing us with the soil and P. Marchal for his helpful contribution to the analyses. This work was funded by the ACI-PNSE program of the INSU-CNRS.

References

Duineveld, B.M., van Veen, J.A., 1999. The number of bacteria in the rhizosphere during plant development: relating colony-forming units to different reference units. Biology and Fertility of Soils 28, 285-291.

Ellenberg, H., Weber, H.E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., Paulissen, D., 1992. Zeigerwerte von Pflanzen in Mittle-europa, 2nd ed., Scripta Geobotanica, vol. 18, 258p.

Grayston, S.J., Vaughan, D., Jones, D., 1996. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. Applied Soil Ecology 5, 29-56.

Hamilton, E.W., Frank, D.A., 2001. Can plants stimulate soil microbes and their own nutrient supply? Evidence from a grazing tolerant grass. Ecology 82, 2397-2402.

Henry, F., Nguyen, C., Paterson, E., Sim, A., Robin, C., 2004. How does N availability alter rhizodeposition in *Lolium multiflorum* Lam. during vegetative growth? Plant and Soil, *in press*.

Kuzyakov, Y., 2002. Review: Factors affecting rhizosphere priming effects. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 165, 382-396.

Kuzyakov, Y., Cheng, W., 2001. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. Soil Biology & Biochemistry 33, 1915-1925.

McCaig, A.E., Grayston, S.J., Prosser, J.I., Glover, L.A., 2001. Impact of cultivation on characterisation of species composition of soil bacterial communities. FEMS Microbiology Ecology 35, 37-48.

Molina, J.A.E., Smith, P., 1998. Modeling carbon and nitrogen processes in soils. Advances in Agronomy 62, 253-298.

Nguyen, C., Henry, F., 2002. A carbon-14-glucose assay to compare microbial activity between rhizosphere samples. Biology and Fertility of Soils 35, 270-276.

Nguyen, C., 2003. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and control. Agronomie 23, 375-396.

Norton, J.M., 1999. Soil bacteria: A dynamic pool of soil organic matter and catalysts of key belowground processes. Proceedings: Pacific Northwest Forest and Rangeland Soil Organism Symposium 461, 59-67.

Poorter, H., Bergkotte, M., 1992. Chemical composition of 24 wild species differing in relative growth rate. Plant Cell and Environment 15, 221-229.

Van der Krift, T.A.J., Berendse, F., 2001. The effect of plant species on soil nitrogen mineralization. Journal of Ecology 89, 555-561.

Van der Krift, T.A.J., Kuikman, P.J., Moller, F., Berendse, F., 2001. Plant species and nutritional-mediated control over rhizodeposition and root decomposition. Plant and Soil 228, 191-200.

Warembourg, F.R., Roumet, C., Lafont, F., 2003. Differences in rhizosphere carbon-partitioning among plant species of different families. Plant Soil 256, 347-357.

Table 1: Correlation matrix for variables related to plant growth and root C concentration and for rhizosphere bacterial densities (Log CFU/g soil) and rhizosphere microbial utilization of 14 C-glucose (14 CO₂: mineralization, 14 C_{FE}: incorporation into labile microbial C). The significance of the probability associated to the null hypothesis R=0 is as follows: ns: p>=0.05, *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001

	Shoot DW	Root DW	Root non- soluble C concentration	Root soluble C concentration	Log(CFU/g soil)	¹⁴ CO ₂
Root DW	0.64 ***					
Root non-soluble C concentration	-0.56 ***	-0.17				
Root soluble C concentration	0.21 ns	-0.07 ns	-0.34 *			
Log(CFU/g soil)	0.34	0.06 ns	-0.53 **	0.15 ns		
$^{14}\mathrm{CO}_2$	0.67 ***	0.44 **	-0.44 **	0.29 ns	0.46	
$^{14}\mathrm{C}_{\mathrm{FE}}$	-0.60 ***	-0.43 **	0.38	-0.29 *	-0.37 *	-0.83 ***

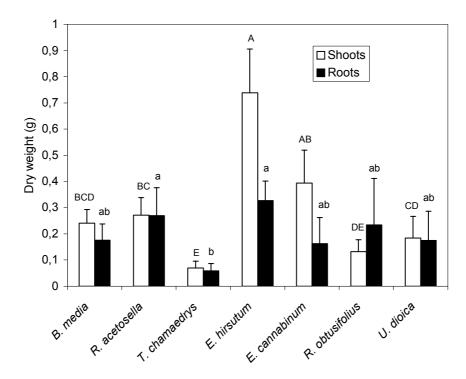


Figure 1: Shoot and root dry weight for 7 plant species cultivated 5 weeks in greenhouse. Vertical bars correspond to one standard error. For each series, means are grouped according to Tukey test at p<0.05.

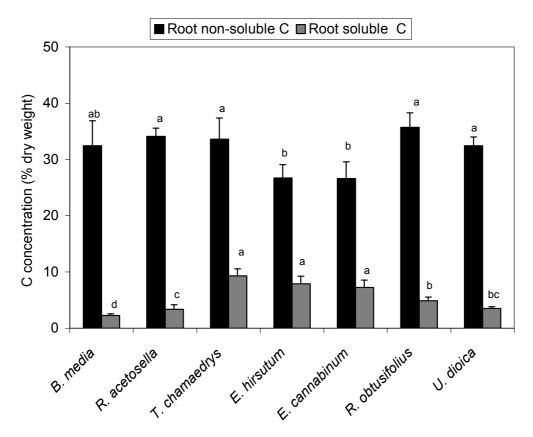


Figure 2: C concentrations in roots of seven plant species cultivated 5 weeks in greenhouse. Vertical bars correspond to one standard error. For each series, means are grouped according to Tukey test at p<0.05.

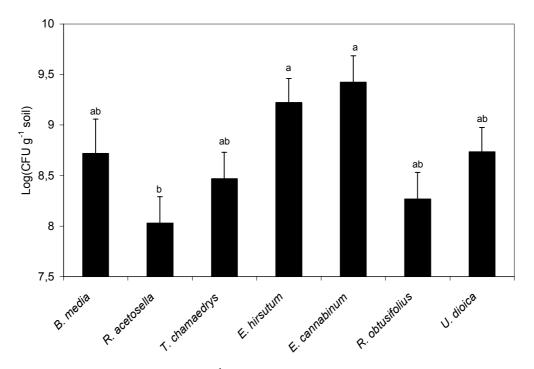


Figure 3: Bacterial abundance (Log(CFU g⁻¹ soil DW) in the rhizosphere soil of seven plant species cultivated 5 weeks in greenhouse. Vertical bars correspond to one standard error. Means are grouped according to Tukey test at p<0.05.

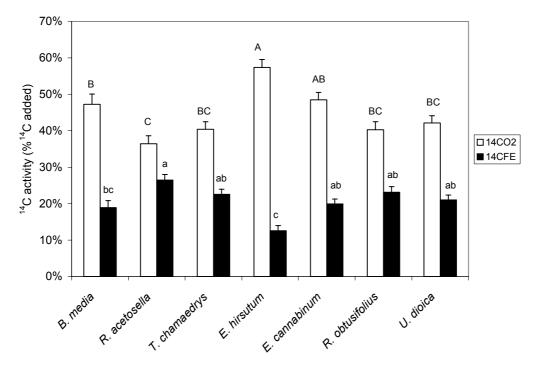


Figure 4: Microbial activity in the rhizosphere soil of seven species cultivated 5 weeks in greenhouse evaluated by the utilisation of [U- 14 C]glucose (14 CO₂: mineralization, 14 C_{FE}: microbial labile 14 C). Vertical bars correspond to one standard error. Means are grouped according to Tukey test at p<0.05.

Les plantes de forêts anciennes sont souvent des plantes pérennes à réserves souterraines importantes, bulbes (*Allium ursinum*), rhizomes (*Convallaria maialis*, *Anemone nemorosa*...). Des expériences de marquage isotopique montrent qu'elles sont de mauvaises compétitrices pour les éléments minéraux. Inversement les espèces de forêts nouvelles, rudérales, sont de fortes compétitrices. Des mesures d'activité enzymatique bactérienne couplées à des mesures isotopiques réalisées dans la rhizosphère des plantes montrent des différences marquées en fonction des plantes mais aussi pour une même plante, de l'histoire des anciens usages. On suggère donc que les plantes de forêts nouvelles influencent directement les cycles des éléments minéraux, et en particulier de l'azote, vers une meilleure disponibilité. En quelque sorte, elles assureraient ellesmêmes, en modifiant les conditions du milieu, leur maintien.

Il faut maintenant poursuivre les prospections archéologiques dans les forêts françaises. Les occupations antiques déjà découvertes sont probablement souvent associées à des activités agricoles, qui n'ont le plus souvent pas été relevées. Pour l'époque moderne, on peut envisager l'intégration dans la gestion forestière de cartes de l'ancienneté des forêts. Des pistes sont proposées pour accélérer cette intégration. La poursuite des recherches sur les mécanismes de maintien de différences de biodiversité passe par des analyses plus poussées des structures génétiques de certaines espèces, afin de mieux comprendre leur mode de colonisation. Pour les sols, il faut continuer l'analyse des communautés microbiennes, des mycorhizes et de leur rôle dans le cycle du phosphore en particulier. Nous envisageons enfin l'étude de l'impact de ces utilisations anciennes sur les communautés d'insectes.

Mots-clefs : synthèse, forêt, biodiversité, histoire, archéologie, époque gallo-romaine, utilisation du sol, agriculture, cartographie, carte ancienne, sol, fertilité, phosphore, azote, isotope stable, rhizosphère, communauté microbienne, végétation, clone, *Vinca minor*, France, Lorraine, Berry, forêt de Haye, forêt de Tronçais.

Résumé

Nous présentons dans ce rapport une synthèse des résultats obtenus à la suite de deux projets successifs, financés par le GIP Ecofor, sur l'impact de l'histoire de l'utilisation du sol sur la biodiversité des forêts actuelles. Depuis le début du XIXème siècle, la surface forestière française a doublé. Les "nouvelles" forêts croissent essentiellement sur d'anciennes terres agricoles. Dans les Vosges, le Massif Central et le Jura, en utilisant les documents historiques et de nombreux relevés de terrain, nous avons comparé la fertilité et la biodiversité des forêts anciennes et nouvelles. Nous avons montré que certaines propriétés des sols comme les taux de phosphore et de nitrate assimilable par les plantes sont plus élevés dans les forêts nouvelles croissant sur d'anciennes terres cultivées, et trouvé un marqueur à long terme des fumures organiques anciennes, l'abondance naturelle en isotope 15 de l'azote. Cette abondance en ¹⁵N est plus élevée dans les forêts nouvelles, ce qui démontre que l'azote dont ces forêts profitent provient en grande partie de la période agricole antérieure. Ces marqueurs fonctionnels diffèrent de marqueurs inertes, comme les charbons de bois car ils interviennent directement dans le fonctionnement actuel des forêts. D'autre part, la végétation des forêts nouvelles diffère profondément de celle croissant sur les anciennes forêts voisines. Certaines espèces, dites "de forêt ancienne" tendent à disparaître dans les forêts nouvelles, tandis que d'autres, dites "rudérales" ou "nitrophiles" deviennent plus abondantes. La richesse en espèce est plus élevée sur les sites anciennement cultivés.

Cette découverte nous a poussé à étudier la portée dans le temps de cette mémoire, ainsi que les mécanismes par lesquels cette mémoire se perpétue.

Grâce à une collaboration fructueuse entre écologistes et archéologues, nous avons relevé, cartographié et daté de vastes parcellaires gallo-romains en Lorraine et dans le Centre de la France. L'exploitation systématique de la « Carte archéologique de la Gaule », des bases de données archéologiques « Dracar » et « Patriarche » montre que les occupations humaines anciennes en forêt sont extrêmement nombreuses en France, et permet d'en dessiner une première carte. L'abondance de ces traces en forêt suggère que les zones aujourd'hui forestières n'ayant jamais connu de défrichement (autre que pour des activités forestières) sont peut-être plutôt l'exception que la règle.

La comparaison des propriétés des sols et de la composition de la végétation des zones situées à proximité ou à distance des établissements agricoles antiques nous a montré des divergences analogues à celles mesurées sur les occupations agricoles de la période moderne: les anciens terroirs cultivés sont moins acides, plus riches en phosphore assimilable, et une fraction de l'azote des sols porte la trace d'une perturbation ancienne. La végétation montre là encore des divergences nettes entre espèces de forêts anciennes et espèces de zones perturbées. On retrouve le fait que, plus le milieu est acide et pauvre en espèces, plus la différence de richesse spécifique entre forêts non perturbées et forêts anciennement cultivées est importante.

Nous avons donc la confirmation que l'occupation ancienne, en particulier agricole, marque les sols et la végétation d'une empreinte qui paraît irréversible à l'échelle historique. Par quels mécanismes l'écosystème forestier garde en mémoire ou oublie son passé agricole ? Plusieurs mécanismes sont proposés :

- Les perturbations d'origine humaine ont créé des microhabitats très spécifiques qu'affectionnent certaines espèces végétales ou animales. Ainsi des tas ou murs de pierre ou des dépressions humides. L'épierrement à but agricole modifie sensiblement les propriétés physiques des sols.
- Le cycle des éléments minéraux est extrêmement conservateur en forêt. Les mesures de flux annuels d'éléments nutritifs dans les différents compartiments de l'écosystème montrent que le flux annuel de phosphore recyclé est considérable par rapport au flux entrant ou quittant le sol. Les pH plus élevés s'expliquent là encore par la fermeture du cycle du calcium et la faible vitesse de dissolution des carbonates grossiers. En ce qui concerne l'azote, les flux entrants ne sont pas négligeables par rapport au cycle annuel. La conservation d'une meilleure disponibilité de l'azote dans les sols anciennement fumés pourrait résulter des apports associés, comme l'apport de chaux en milieu acide, ou de phosphore en milieu calcaire. Elle pourrait aussi résulter d'une interaction biotique (cf. *infra*).
- Les plantes typiques des milieux forestiers sont de mauvaises colonisatrices.
- Certaines plantes des forêts nouvelles ont pu être directement amenées par les agriculteurs romains. L'analyse de la structure génétique de la petite pervenche a montré, de façon surprenante, un clone unique sur deux sites gallo-romains distants de plusieurs kilomètres.

(suite en page intérieure de couverture)