

**CARACTERISATION D'UN HABITAT FORESTIER TEMPERE PAR
TELEDETECTION SATELLITALE POUR LE SUIVI DE POPULATIONS
AVIENNES. CAS DES MESANGES EN FORET DE LARIVOUR (AUBE, FRANCE)**

Characterization of a temperate forest habitat by remote sensing for the study of avian populations. Case of the titmice in forest of Larivour (Aube, France)

GODARD V.¹, DWORZYNSKA I.², DREISS A.³, DANCHIN E.⁴

¹ Espaces, Nature et Culture (CNRS UMR 8185), Université de Paris 8, Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord, 4, rue de la Croix Faron, F93210 La Plaine Saint-Denis – vgodard@univ-paris8.fr

² Université de Paris 8 – 2, rue de la Liberté, F93526 Saint-Denis Cedex 02 - izzabel@tiscali.fr

³ Fonctionnement et évolution des systèmes écologiques, UMR CNRS-UPMC 7625, Case 237, 7, quai Saint-Bernard, F75252 Paris Cedex 05 - adreiss@snv.jussieu.fr

⁴ Évolution et Diversité Biologique (EDB), UMR CNRS-UPS 5174, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 118 Route de Narbonne. Bat IV R3, F31062 Toulouse Cedex 9 - edanchin@cict.fr

Résumé court (150 mots)

Dans le cadre d'une étude sur les effets des perturbations engendrées par les tempêtes (simulées par des coupes !) sur la diversité de l'ensemble de l'avifaune forestière, il a été mené une analyse des structures forestières à l'aide d'enquêtes de terrain et de traitements d'imagerie satellitale. L'objectif était de dresser une cartographie des structures forestières pour mesurer l'impact de celles-ci sur la répartition et le comportement de passereaux cavernicoles (essentiellement des mésanges charbonnières et des mésanges bleues). Une typologie forestière a été réalisée autour d'un échantillon de 80 nichoirs. Cette typologie, issue d'une classification (de type CAH), a permis de superviser les traitements des données satellitales ETM+ Landsat7. Une première partition en trois classes est présentée ici. Elle est centrée sur les trois stades (gaulis-perchis, coupe de régénération, taillis-sous-futaie de chêne et charme) qui sont souvent retenus pour caractériser la richesse spécifique avienne forestière.

Mots clefs :

Analyse spatiale, Avifaune, Biogéographie forestière, Enquête par échantillonnage, France, Télédétection satellitale

Key words :

Avifauna, Forest biogeography, France, Remote sensing, Sample survey, Spatial analysis

1. Introduction

L'étude du comportement des populations aviennes forestières s'intéresse, entre autres, aux stratégies de relocalisation des individus après la venue d'une perturbation. Lorsque cette perturbation est d'origine naturelle (tempête, ...), son côté imprévisible, tant d'un point de vue chronologique que spatial, impose de recourir à des simulations (coupes, ...) pour faire l'analyse de son impact. Un état des lieux peut ainsi être réalisé, avant la perturbation simulée, puis après.

La venue d'une perturbation entraîne souvent, pour une espèce donnée, la disparition d'un milieu qui lui était favorable. Les individus qui occupaient ce milieu avant celle-ci doivent en général trouver un nouvel habitat et également un nouveau partenaire de reproduction. L'impact d'une telle perturbation sur le milieu forestier peut s'étudier de différentes manières. L'une d'entre elle consiste à mesurer son influence sur la biodiversité. Il est à noter que nous n'avons qu'une très faible connaissance de l'impact des perturbations engendrées par les activités humaines sur le fonctionnement des écosystèmes naturels (Heywood and Watson 1995). Une autre approche concerne la stratégie du choix de l'habitat de reproduction. Des études théoriques ont montré l'avantage sélectif des animaux qui choisissent leur lieu de vie en fonction des conditions rencontrées (McPeck and Holt 1992, Lemel *et al.* 1997). Ceci implique que les animaux utilisent des indices révélateurs de la qualité environnementale pour choisir leur lieu de reproduction. D'autres études ont montré que les individus pouvaient choisir leur site de reproduction en fonction de leur propre expérience (l'information individuelle, basé sur le succès ou l'échec de leur propre reproduction passée) ou en fonction de l'information qu'ils obtiennent sur l'expérience de leurs congénères, dite « information publique » (Boulinier et Danchin 1997, Danchin *et al.* 1998 et Danchin et Wagner 1997). Ces

indices présentent l'avantage de résumer en un seul paramètre l'effet de nombreux facteurs environnementaux influençant le succès reproducteur. De même, du point de vue de la sélection sexuelle, nous savons que la stabilité des couples est fortement remise en cause après un échec de reproduction et après une forte perturbation du milieu. Il ressort de cette présentation que, l'analyse de l'habitat forestier est une des étapes indispensables à la compréhension des stratégies de reproduction de l'avifaune.

C'est dans le cadre d'un programme financé par ECOFOR 2002 « Biodiversité et gestion forestière », qu'une étude, ayant trait à l'impact des perturbations d'origine anthropique (liées à la gestion sylvicole) sur la diversité de l'ensemble de l'avifaune sylvatique, a développé cette analyse de la répartition des structures forestières par télédétection satellitale. Il s'agissait de déterminer si des données à moyenne résolution spatiale, celles du capteur ETM+ de Landsat7, pouvaient permettre de réaliser une cartographie structurelle et renseigner le volet habitat de cette étude d'écologie comportementale. Alors qu'un millier de nichoirs devaient faire l'objet d'un suivi d'occupation entre 2000 et 2003, il était nécessaire de pouvoir décrire « l'ambiance forestière » dans laquelle ils se trouvaient avant de réaliser les premières « perturbations ». Était-il possible, à l'aide d'un échantillon réduit de ceux-ci, tiré aléatoirement, de faire une description suffisamment complète de leur environnement (en terme d'essences, structures, gestion, ..., cf. fiche type *in* Dworzynska 2005, annexe 8 et 9), puis de régionaliser (passer d'une information ponctuelle, tiré de l'échantillon, à une surface) une information pertinente à l'ensemble du massif forestier avec des données satellitales ?

2. Contexte méthodologique

L'étude s'est déroulée en forêt domaniale de Larivour-Piney (Canton des Grands Sillons) dans le Parc Naturel Régional de la forêt d'Orient (Aube). Ce massif forestier de 500 ha est isolé du reste du massif forestier de la forêt d'Orient par un lac large de 3 km à l'est et des champs cultivés sur au moins 1 km au nord, à l'ouest et au sud. Ce massif forestier est

majoritairement géré par l'Office national des forêts (ONF) où l'ancien taillis de charme sous futaie de chêne est en voie de conversion vers la futaie de chêne. Cette forêt présente une grande diversité de biotopes pour des passereaux.

Nous avons travaillé sur des passereaux cavernicoles forestiers [essentiellement des mésanges charbonnières (*Parus major*), bleues (*P. caeruleus*) et nonnettes (*P. palustris*)], en raison de la très bonne connaissance de leur biologie par les membres de l'équipe, et de leur tendance à utiliser des nichoirs artificiels, facilitant ainsi grandement leur manipulation et leur observation dans la nature.

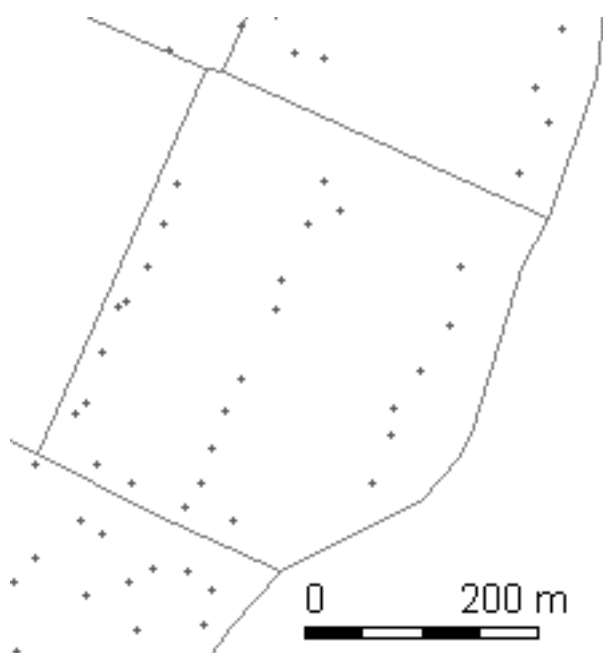
2.1. Echantillonnage et collecte de l'information

Le secteur forestier étudié est divisé en 52 parcelles à des stades de gestion différents. Parmi celles-ci, une quarantaine de parcelles ont été choisies au hasard pour recevoir une moyenne de 25 nichoirs. Cependant, ceux-ci n'ont pas été répartis aléatoirement, mais accrochés selon les possibilités du milieu (présence d'un arbre, accessibilité, ...), laissant voir une répartition probablement corrélée avec le milieu (*cf.* Dworzynska 2005 p.89, ou un extrait *cf. figure 1*). Cette répartition non aléatoire est clairement apparue après la campagne de positionnement des nichoirs par GPS. Il n'est donc pas possible de considérer cet échantillon comme un tirage à deux degrés, représentatif du massif forestier.

Nous avons donc eu recours à un tirage de 81 nichoirs parmi les 1 003 installés en 2002. Tirage aléatoire qui a permis de s'affranchir des risques de dépendances spatiales entre des nichoirs trop rapprochés et donc trop ressemblants (la dépendance spatiale n'a toutefois pas été testée). Ces 81 nichoirs représentatifs de la « population » des nichoirs ont ensuite été « revisités » pour l'enquête de végétation qui a permis d'établir les typologies forestières puis l'extrapolation à l'ensemble du dispositif, grâce aux données satellitales. La phase de terrain a eu lieu d'avril à juin puis en décembre 2002. L'inventaire proprement dit porte sur des

surfaces d'environ 3 600 m² (cf. Dworzynska 2005 p.70). Cette placette d'inventaire est enquêtée sous forme d'une succession de levés espacés de dix mètres et décrivant un carré de 60 m par 60 m, en général centrée sur le nichoir.

Figure 1 : Répartition non aléatoire des nichoirs (exemple de la parcelle n°72)



2.2. Constitution des typologies

Des traitements multivariés ont été pratiqués pour constituer les typologies des paysages forestiers. Ils portent sur les variables collectées lors de l'enquête de terrain et servent à établir la typologie *au droit* des nichoirs échantillon sur lesquels sont « centrées » les placettes siège de la collecte. Si cette typologie ne permet pas de cartographier l'espace entre les nichoirs, elle permet de constituer les zones tests pour initier les classifications des données satellitales et la future légende de la carte des habitats forestiers.

2.2.1. Typologie construite sur les relevés de terrain

À l'issue de l'enquête de terrain et après un "recalibrage" des données collectées (harmonisation ou élimination des variables stationnelles), il restait quatre variables nominales (la répartition des trouées, le caractère aléatoire ou non de la répartition des arbres dans la strate arborescente haute, le stade des traitements du taillis ou de la futaie) ainsi que 30 variables continues (le rapport franc de pieds – cépée, le taux de recouvrement des différentes strates,...). Certaines variables continues ont été normalisées avant traitements en raison de leur forte asymétrie. Sur les 30 variables continues, 24 ont été traitées en variables continues actives, six en variables continues illustratives (essentiellement des essences peu présentes comme le pin sylvestre) car la normalisation n'a pas donné le résultat escompté (les coefficients d'aplatissement et d'asymétrie restant trop élevés). Les 81 individus (placettes autour des nichoirs échantillon) ont été traités en individus actifs.

Ont également été ajoutées aux traitements les variables relatives à l'occupation des nichoirs et au résultat des pontes. Neuf variables nominales illustratives [comme le type d'occupant (mésange, muscardin, hyménoptère,...), ou le résultat des pontes, quand elles ont eu lieu (de l'échec de l'éclosion jusqu'à poussins partis)] et dix-huit variables continues illustratives [comme le nombre d'œufs par ponte et par année ou le rapport nombre d'envols sur le nombre d'œufs] ont été rajoutées. Ces variables n'ont pas été codées comme active pour que la typologie soit caractéristique des seules variables d'habitat.

Des classifications ont été réalisées sur les facteurs issus d'une analyse en composantes principales (ACP). Ce sont des classifications ascendantes hiérarchiques par la méthode de Ward (perte d'inertie minimum, Nakache *et al.*, 2000, p.10). Classiquement, elles permettent de regrouper les individus, ici les placettes échantillon, dans une typologie qui fait ressortir des paramètres stationnels (sylvicoles, dendrométriques,...) significatifs, ainsi que les caractéristiques liées à l'occupation des nichoirs. En fonction du paramétrage du logiciel

(SPAD5.6), plusieurs partitions sont proposées. Elles sont ordonnées par perte d'inertie croissante.

Parmi les trois partitions les plus stables proposées par SPAD, une seule est présentée ici. Il s'agit d'une partition en trois classes. Elle oppose une classe de taillis sous futaie vieillissant de chêne sur charme (Classe 1), où le couvert de la strate arborescente haute est significatif, à deux autres classes marquées par le passage à la futaie. L'une vient de subir (juste avant 2000) une coupe de régénération où les grands semenciers de chêne sont disséminés sur les parcelles (Classe 2) et l'autre où l'on est déjà au stade du gaulis-perchis de chêne (Classe 3). Les autres partitions détaillent, par emboîtement, cette typologie.

2.2.2. Caractérisation des données satellitales par les relevés de terrain

Ce sont les données multispectrales issues du capteur ETM+ de Landsat7 extraites de la scène 198-026 du 1^{er} août 2000 qui ont été exploitées. Elles ont été fournies par l'Institut français de l'environnement (IFEN) par le biais d'un accord de valorisation des données acquises dans le cadre du programme *Image and Corine Land Cover 2000* [géré par *Land Management Unit* du *Join Research Center* d'Ispra (CE), Italie]. Elles n'ont subi aucun prétraitement en dehors de ceux réalisés pour le programme [à savoir : pas de calibration atmosphérique, quelques corrections radiométriques (délignage, correction des lignes perdues, erreurs de bit...), une correction géométrique par ortho-rectification dont la RMS est meilleure que 25 m] et un rééchantillonnage à 12,5 m pour être compatible avec la bande panchromatique.

L'emprise au sol des parcelles échantillon représente un carré de 60 mètres de côté. La caractérisation proprement dite, des données satellitales par les relevés de terrain, suppose un positionnement « satisfaisant ». Celui-ci a été évalué par l'erreur quadratique moyenne (EQM) qui est associée à chaque point GPS. Une visualisation de la répartition et de la précision de la localisation du nichoir est présentée en annexe (*cf. Planche hors-texte 1*). L'imprécision de la position peut atteindre 15 m, mais en moyenne l'EQM est de 5 m et seuls

10 p.100 des positionnements sont moins bons que 8 m pour les 81 nichoirs échantillon. Pour palier l'incertitude des localisateurs GPS (Garmin 12 d'une précision nominal décimétrique), cette emprise a été portée à 62,5 m de côté par rasterisation du fichier vecteur puis filtrage au « maximum » avec une fenêtre 5*5.

2.2.3. Traitement des données satellitales

Le traitement des données satellitales, décrit ici, concerne les classifications supervisées. La méthode de classification dont les résultats sont présentés est celle du « maximum de vraisemblance ». Lorsque les parcelles échantillon sont suffisamment homogènes, ses performances sont supérieures à celles de la plupart des autres « classificateurs » (Eastman, 2001, p. 65).

Le nombre des canaux à utiliser pour les classifications est fonction du nombre de pixels par thème. La partition retenue comporte trois classes, mais deux autres partitions ont été étudiées. Elles comportaient chacune une classe de cinq parcelles échantillon de vingt-cinq pixels. Sachant qu'il faut dix fois plus de pixels (par thème) que de bandes spectrales utilisées pour la classification (Eastman, 2001, p. 60), avec cent vingt-cinq pixels (5 parcelles de 5*5 pixels de 12,5 m de côté), nous pouvions retenir les sept canaux natifs de Landsat plus quelques néo-canaux. Après une étude de décorrélation, ce sont les cinq canaux suivants qui ont été choisis pour les classifications : ETM+2, 3, 4, 5 et 7.

La qualité des résultats est appréciée, à l'issue des classifications, en comparant, pour l'ensemble des parcelles échantillon, leur affectation d'origine puis leur affectation après classification au sein d'une matrice d'erreurs ou de confusions (*cf. tableau 1*). En raison du grand nombre de parcelles échantillon, il a été possible d'éliminer celles qui posaient des problèmes lors des traitements [positionnement sujet à caution (forte EQM ou inadéquation entre la position renseignée sur la fiche et localisation dans le SIG), ou encore forte

hétérogénéité thématique et / ou radiométrique,...)]. Nous n'avons pas, pour autant, constitué deux sous échantillons, un pour l'initialisation des traitements et l'autre pour leur contrôle. Le résultat cartographique final (*cf. Planche hors-texte 2*) a été nettoyé avec un filtre médian 5*5 (une synthèse méthodologique est proposée en planche hors-texte, *cf. Planche hors-texte 3*).

Verticalement, ce sont les pertes par érosion (**ErrorO**, erreur d'omission) qui sont signifiées. Pour la classe 2, sur les 119 pixels reconnus sur le terrain comme relevant de ce thème, 106 ont été correctement cartographiés, mais 12 ont été cartographiés en classe 1. Cela signifie que l'érosion de ce thème entre le terrain et la cartographie est de 11 p.100. En ligne sont portés les gains par accumulation (**ErrorC**, erreur de commission). Sur les 127 pixels cartographiés en classe 2, 106 ont bien été vus comme tel sur le terrain, toujours sur la diagonale, mais 13 avait été identifié comme vérité terrain de la classe 1. La classe 2 a donc « capturé » 21 pixels (13+8) « étrangers », d'où une accumulation qui se traduit par une erreur de commission de 17 p.100. C'est le thème 2 qui souffre le plus de « confusion ». L'erreur globale est de l'ordre de 7 p.100. Le détail des catégories, et donc des classes à forte ou à faible confusion, sera détaillé dans la partie concernant la typologie des dégâts et leur répartition spatiale (*cf. 3.1*).

Tableau 1. Matrice de confusions

		Vérité terrain				
Classes		1	2	3	Total	ErrorC
Carto graphie	1	580	12	27	619	6,3 %
	2	13	106	8	127	16,5 %
	3	17	1	356	374	4,8 %
Total		610	119	391	1120	
ErrorO		4,9 %	10,9 %	9,0 %		7,0 %

Les résultats de la classification retenue sont satisfaisants (à la réserve près de l'indépendance de l'échantillon de contrôle). La qualité globale de la classification est de 88 p. 100, évaluée

par l'indice globale de Kappa qui, bien qu'un des plus sélectifs, est le plus utilisé (Hudson *et al.*, 1987 ; Rosenfield *et al.*, 1986). Un indice de qualité par classe, le *Kappa Index of Agreement* (KIA), donne les résultats suivants (**cf. tableau 2**) :

- La classe 1 est assez stable en érosion (89 p.100) et en accumulation (86 p.100) ;
- Avec 82 p.100, le KIA de la classe 2 indique une tendance à l'accumulation des pixels qui viennent d'autres thèmes, alors que l'érosion des pixels de vérité terrain, (88 p.100) reste également faible ;
- A l'inverse, la classe 3 est celle qui empiète le moins « cartographiquement » sur les autres (KIA de 93 p.100), mais ne retrouve pas tous les pixels de vérité terrain enquêtés comme classe 3 avec un KIA de 87 p.100.

Tableau 2. Qualité de la classification par classe

	Cartographie	Vérité terrain
Classe1	86.2%	89.0%
Classe2	81.5%	87.7%
Classe3	92.6%	86.6%

La qualité des classifications et donc de la cartographie obtenue est un préalable indispensable. Cependant, la seule qualité de représentation ne peut suffire à établir l'intérêt de la démarche et le recours à l'imagerie satellitale. Il faut encore s'assurer de la pertinence (et de l'intérêt) de la typologie réalisée et de son adéquation avec le comportement avien.

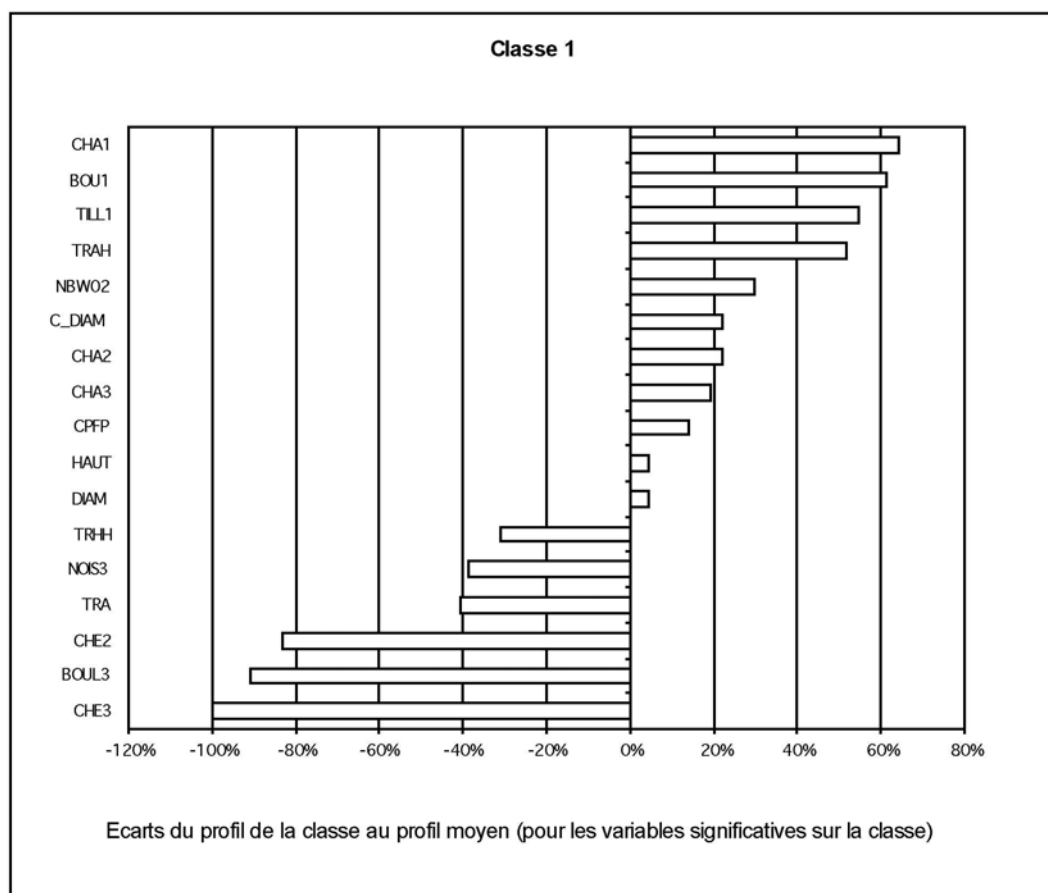
3. Analyse et discussion des résultats obtenus

Si l'on cherche à différencier les habitats forestiers en fonction de leur richesse avienne, une première approche consiste à découper le territoire d'étude en fonction de la structure et des essences présentes. D'après des études portant sur l'évolution de la richesse spécifique et sur la densité avienne (Muller, 1995), il existe plusieurs pics de richesse dans l'avifaune, toutes espèces confondues. Un premier pic s'observe lors des stades buissonnants. Il est suivi d'une

décroissance lors des stades intermédiaires, puis d'une reprise avec la maturité des peuplements. La richesse et la densité de l'avifaune sont souvent très fortes lors des coupes de régénération qui voient cohabiter, sur les mêmes parcelles, différents stades sylvatiques. Si la structure forestière semble être prépondérante dans la richesse avienne, la composition floristique ne paraît posséder qu'un caractère secondaire (Blondel, 1995), bien qu'elle comporte une influence certaine en terme d'alimentation (chenilles, baies, graines,...) ou d'habitat (cavités naturelles, embranchements,...). La typologie et la cartographie retenues dans cette analyse sont-elles en adéquation avec ces études sus-décrites ? Le plan d'échantillonnage et les données satellitales sont-ils appropriés ?

3.1. Pertinence de la typologie

Figure 2 : Profil typologique de la classe 1



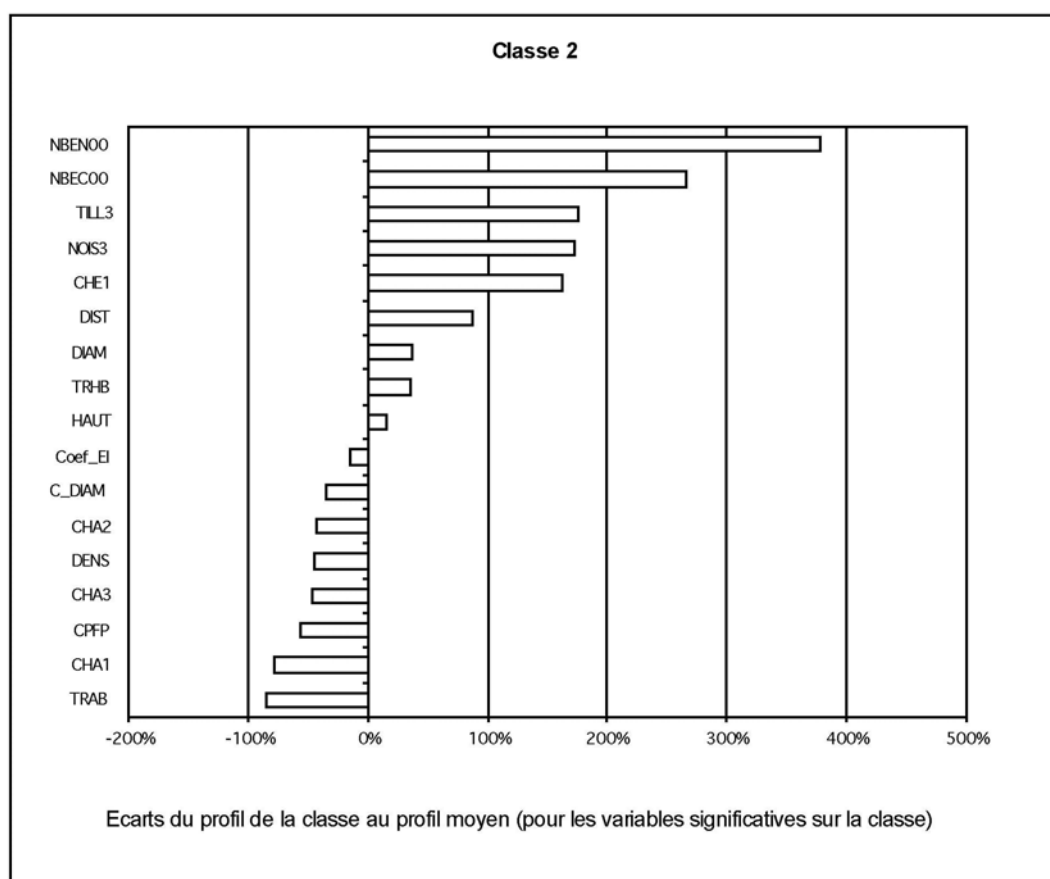
Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2). La valeur du profil de chaque variable correspond à la moyenne dans la classe moins la moyenne générale de cette variable le tout divisé par la moyenne générale de cette variable (exprimé en p. 100).

Pour décrire la typologie obtenue, deux sortes de variables sont représentées sur les figures n°2 à 4. Il s'agit, d'une part de variables stationnelles (en générales actives), comme TRAH (taux de recouvrement de la strate arborescente haute) ou C_DIAM (diamètre du brin de cépée le plus gros), et d'autre part de variables ayant trait aux données caractérisant les nichoirs (toujours traitée en variable illustratives), comme NBW02 (nombre d'œufs comptés en 2002 par nichoir). L'intérêt de cette étude conjointe est de permettre la description de l'habitat forestier par les variables sylvicoles les plus significatives pour chacune des classes, mais également de leur associer une série de paramètres relatifs à l'occupation des nichoirs pour amorcer la qualification typologique en terme de la richesse avienne.

La première classe (*cf. figure 2*) connaît une sur représentation (par rapport à un profil moyen, toutes classes confondues) qui concerne essentiellement le taux de recouvrement des essences de la strate arborescente haute [le charme, CHA1, le bouleau, BOU1, et le tilleul, TILL1 ont en moyenne, dans cette classe 1, des taux de recouvrement plus de 50 p.100 supérieur à ceux qu'ils ont toutes classes confondues (plus de 50 p.100 pour TILL1 et plus de 60 p.100 pour CHA1 et BOU1)]. Le taux de recouvrement de la strate arborescente haute (TRAH, plus de 15 m) y est élevé. Le sous étage y est majoritairement en charme (CHA2 et 3) avec des brins de cépée de fort diamètre (C_DIAM). Les variables nominales, traitées en illustratif (non représentées ici), indiquent une futaie adulte sur un taillis recépage ou vieillissant et une stratification horizontale significativement caractérisée par une répartition aléatoire des strates supérieures et l'absence de fortes trouées. Il s'agit donc manifestement d'un taillis sous futaie (TSF) de chêne qui est en attente de conversion ou, du moins, peu exploité. Le chêne de la strate haute n'est pas « sorti » statistiquement, car il a été sous évalué lors de l'enquête de terrain. Il est, en revanche, présent pour la classe des coupes de régénération. Cette première classe est associée à la variable NBW02 (nombre d'œufs comptés en 2002 par nichoir, var. quant. illustrative) qui indique que les pontes de mésanges

sont fortement associées en 2002 à ce TSF vieillissant. À l'inverse, sont sous représentées les essences des strates basses [surtout les petits chênes, CHE2 et 3 (en moyenne le CHE3 est absent avec -100 p.100)], ainsi que les parcelles ayant un fort taux de recouvrement des strates arbustives et herbacées hautes (TRA, TRHH). C'est donc une forêt dont le TSF est vieillissant, avec un couvert à fort recouvrement des strates hautes qui est décrite ici (*cf. figure 2*).

Figure 3 : Profil typologique de la classe 2



Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2).

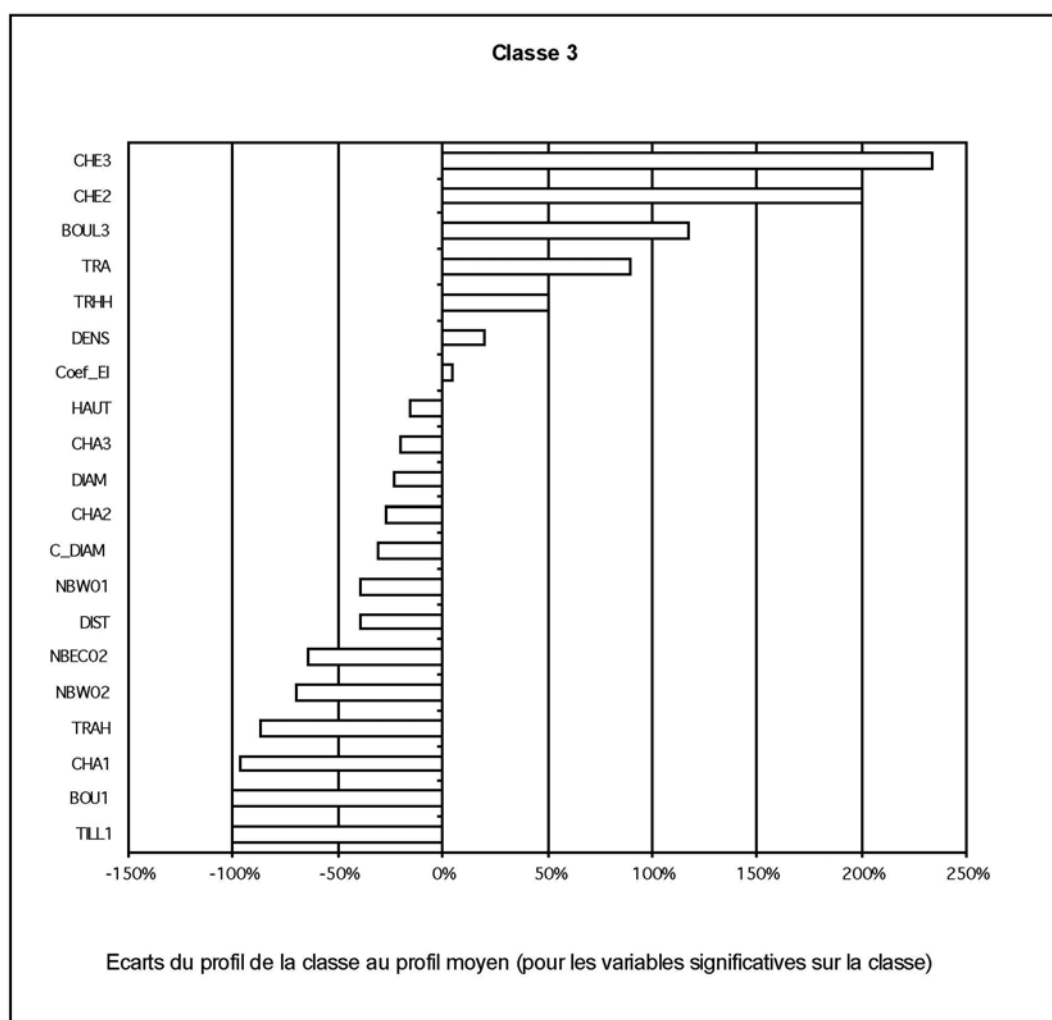
La deuxième classe (*cf. figure 3*) connaît une sur représentation qui concerne essentiellement le taux de recouvrement des essences de la strate arbustive (le noisetier, NOIS3, et le tilleul, TILL3 de 2 à 7 m, respectivement 173 et 175 p.100 plus élevés dans cette classe que lorsqu'ils sont calculés toutes classes confondues) qui sont en phase de reconquête sous l'essence « objectif » de la strate arborescente haute le chêne (CHE1, plus de 15 m). On y

rencontre, en effet, des arbres élancés (HAUT), de forts diamètres (DIAM) et espacés (DIST). Cette classe est celle des coupes de régénération, au stade de l'ensemencement, où le chêne est favorisé par le sylviculteur. À titre indicatif, cette deuxième classe est associée aux variables NBEC00 et NBEN00 [nombre d'œufs éclos et nombre d'envols comptés en 2000 par nichoir, var. quant. illustrative ? (dont la moyenne sur la classe 2 est trois à quatre fois supérieure à la moyenne générale, toutes classes confondues)] qui indiquent que les nichoirs situés dans les coupes décrites ici en 2000 ont eu une forte activité avienne. Du point de vue de la stratification horizontale, du fait des coupes, les trouées dans la strate arborescente sont fortes, laissant entrevoir un maillage de l'espace (var. nomin. illustrative non représentée). À l'inverse, sont sous représentées les charmes (CHA1, 2 et 3) qui ont été exploités et non préservés comme les chênes, ainsi que les parcelles ayant du taillis (rapport francs de pied – cépées, CPFP, ou encore les forts diamètres de cépée, C_DIAM) et la strate arborescente basse (par son taux de recouvrement, TRAB). C'est donc une forêt dont le TSF est en cours de conversion par coupes qui est décrite ici.

Très différente, la troisième classe (*cf. figure 4*) présente une sur représentation caractérisée par les essences des strates basses et intermédiaires où le chêne domine (CHE3 et le bouleau BOU3, de 2 à 7 m, et CHE2, 7 à 15 m, taux de recouvrement, dans la classe 3, deux à trois fois supérieur à celui calculé dans la moyenne général). Les coupes ont eu lieu ici il y a déjà quelques dizaines d'années. Les semenciers de chêne ont été retirés. L'essence « objectif » est déjà au stade du gaulis, voire du perchis ; en terme de stratification horizontale, l'alignement des tiges est encore perceptible et il n'y a pas de trouées dans le couvert (var. nominales, non représentées ici). De même, les densités y sont fortes (DENS) et la pénétrabilité faible (avec des taux de recouvrement des strates herbacées hautes, TRHH, et arbustives, TRA, forts). À l'inverse, sont sous représentées les essences d'accompagnement comme les charmes (CHA1), bouleaux (BOU1), tilleuls (TILL1), toutes trois quasiment absente (-100p.100) de la

strate haute ainsi que les forts diamètres (DIAM) ou les gros brins de cépée (C_DIAM). De même, la sous représentation des variables aviennes est manifeste. Le nombre d'œufs comptés et éclos en 2002 (NBW02, NBEC02) ainsi qu'en 2001 (NBW01), affichés négativement, caractérisent un habitat défavorable pour la reproduction des mésanges. Ce sont d'ailleurs les muscardins qui sont significativement présents en 2001 et 2002 sur ce secteur (variables nominales, traitées en illustratif, non représentées ici). C'est donc une forêt dont le TSF est déjà converti par coupes qui est décrite ici.

Figure 4 : Profil typologique de la classe 3



Ne sont décrites que les variables significatives (dont la valeur test est supérieure à 2).

Les trois classes présentées correspondent, en terme de structures forestières, aux trois grands groupes sus mentionnés. Était-il possible d'affiner les classifications et quel pouvait en être

l'intérêt ? Les données satellitales à moyenne résolution ETM+ utilisées, étaient-elles pertinentes ?

3.2. Discussion

Deux autres partitions ont été évoquées. Il s'agit de partitions en quatre et sept classes. Les différenciations successives s'opèrent essentiellement, dans la hiérarchie des classifications, sur des critères d'essences et non plus sur des critères de structures. A titre d'exemple, dans la typologie en quatre classes, c'est l'ancienne classe 1 qui se scinde en deux sous classes. L'une, majoritaire (42 placettes sur 47), caractérise toujours le TSF, alors que l'autre isole maintenant les peuplements mixtes, minoritaires, où se regroupent tilleuls et pins sylvestres. Dans la mesure où, la typologie en trois classes n'a pas encore été exploitée et que les essences ne semblent être que des paramètres secondaires pour expliquer la répartition avienne (*cf.* début du chap. 3), qu'elle est la plus « robuste » au regard des aides en ligne du logiciel de traitement, c'est donc elle qu'il convient d'exploiter en priorité. Le recours à un partitionnement plus fin n'est envisagé que pour une phase ultérieure, fonction des premières analyses.

Cependant, la recherche d'un partitionnement plus fin se heurtera, sans doute, à la précocité temporelle des données satellitales par rapport au stade phénologique de la végétation forestière. En effet, comme cela a déjà été testé lors du suivi des dégâts des tempêtes de 1999 avec les mêmes données, mais pour la forêt de Fontainebleau (Godard, 2005, p.298), la date d'enregistrement du 1^{er} août 2000 est un peu précoce pour discriminer au mieux les différences phénologiques et donc structurelles de la végétation forestière. Une date plus tardive, où la sénescence différentielle des végétaux pourrait être plus marquée (2000 a été une année de précipitation abondante pendant la période végétative), serait préférable pour affiner les classifications. De même, bien qu'il y ait une assez bonne adéquation entre la résolution spatiale de ce capteur moyenne résolution et la taille des houppiers (Godard, 2005,

p.299), la rugosité de la canopée, qui est un bon indicateur de la composante structurelle de la végétation, gagnerait, sans doute, à être étudiée à l'aide d'un capteur à plus haute résolution comme le THR de SPOT5 et sa résolution en 5 ou 10 m (contre 25 m pour le capteur multispectral du ETM+ de Landsat).

La précision de la cartographie (*cf.* fin du 2.2.3.) est en partie liée à la qualité et à la quantité des échantillons. Ceux-ci compensent, probablement, par leur nombre et leur répartition l'inadéquation temporelle partielle des données satellitales évoquée précédemment. Cependant, la répartition des mille nichoirs n'était pas issue d'un tirage aléatoire. Leur représentativité n'est donc pas assurée. L'extraction d'un sous échantillon de 80 placettes d'entraînement a, certes, réintroduit un peu de hasard dans le processus de collecte mais il ne garantit pas l'indépendance du tirage et donc ne permet pas d'estimer les superficies de chaque classe par des méthodes probabilistes, comme nous avons déjà pu le pratiquer pour le suivi d'autres perturbations (Godard,soumis). On peut éventuellement proposer un ordre de grandeur fondé sur le décompte des pixels de chaque thème (60 p.100 pour la classe 1, 18 p.100 pour la classe 2 et 22 p.100 pour la classe 3), mais on sait que cette approche n'est pas fiable car, comme le faisait déjà remarquer J. Meyer-Roux dans une série d'articles publiés en 1981, « *Le problème de l'obtention d'une statistique par télédétection peut donc se ramener à l'estimation du "biais moyen" de la classification des pixels.* » (Meyer-Roux *et ali.*, 1981a, 1981b), mais celui-ci repose sur un échantillon aléatoire des points d'enquête !

4. Conclusion

Malgré une date de prise de vues un peu précoce, l'imagerie satellitale moyenne résolution du capteur ETM+, associée à une campagne de terrain appropriée, a permis de dresser une cartographie des habitats forestiers en trois classes qui semble adaptée au suivi des populations de mésanges. Une partition de l'espace forestier, en trois stades nettement différents, qui vont de la conversion du TSF de charmes sous chênes à la futaie de chênes,

devrait permettre d'évaluer la répartition de l'avifaune et en particulier des mésanges suivies dans cette étude. Bien que cette classification soit essentiellement basée sur les structures forestières du couvert, la place des essences est prise en considération dans la différenciation typologique. La qualité de l'état des lieux ainsi dressé permet d'envisager une comparaison en « avant-après » la survenue d'une perturbation simulée.

Dans la mesure où cette étape cartographique vient de s'achever, il n'a pas encore été possible de tester s'il y avait une différence significative, en terme de diversité et d'abondance, pour les trois espèces de mésange suivies. En effet, est-ce que, comme cela est présenté dans une synthèse de l'ONF consacrée à l'oiseau et la forêt (Mortier, 1999), les mésanges charbonnières (*P. major*), bien que qualifiées d'ubiquistes, vont être plus fréquentes sur les stades intermédiaires du gaulis et perchis ? Qu'en est-il, d'ailleurs, pour les autres ? Cette typologie en trois classes permet-elle de retrouver, pour les trois espèces de mésanges étudiées en forêt de Larivour, une répartition proche de celle décrite, d'une manière plus générale, pour l'ensemble de l'avifaune au début du chapitre trois ? Cette première analyse à l'aide d'une classification d'imagerie satellitale et d'enquête de terrain le laisse penser. Cependant, seules des comparaisons réalisées sur des échantillons de nichoirs, autres que ceux utilisés pour initier les typologies, éventuellement plus nombreux, mais également tirés au hasard, permettront de répondre à ces questions de manière fiable et pertinente.

Remerciements

Que Francis Bertrand et l'IFEN pour les données Landsat, Gérard Balandras de l'ONF, les étudiants de Paris VI et tous ceux qui ont collaboré à la collecte des données de terrain : Mathieu Geier, Sami Limam, Joël White et Moïse Xavier trouvent ici la marque de notre gratitude et soient remerciés pour leur contribution à cette étude.

Bibliographie

- Blondel J. 1995. Biogéographie, approche écologique et évolutive. Masson, Col. Ecologie n°27, 297 pp.
- Boulinier T. and Danchin E. 1997. The use of conspecific reproductive success for breeding patch selection in territorial migratory species. *Evolutionary Ecology*, 11, 505-517.
- Danchin E. and Wagner R. H. 1997. The evolution of coloniality: the emergence of new perspectives. *Trends in Ecology and Evolution*, 12, 342-347.
- Danchin E., Boulinier T. and Massot M. 1998. Conspecific reproductive success and breeding habitat selection: implications for the evolution of coloniality. *Ecology* 79, 2415-2428.
- Dworzynska I. 2005. Les apports du SIG dans l'étude de l'avifaune forestière dans le cadre de la forêt domaniale de Larivour (Aube) : cas de la mésange bleue et charbonnière. Mémoire de maîtrise de l'Université de Paris 8, sous la direction d'A. Da Lage. 151 pp. + annexes.
- Eastman J.-R. 2001. *IDRISI Guide to GIS and Image Processing*. Volume 2. Worcester (MA), Clark Labs, 144 pp.
- Godard V. 2005. Typologie des paysages forestiers du sud du massif de Fontainebleau après la tempête de décembre 1999. *Revue Internationale de Géomatique*. Num. spé. Transformation des territoires ruraux, 15-3, 281-302.
- Godard V. (soumis). Réflexion sur le plan d'échantillonnage appliquée à la quantification des paysages. Exemples d'évaluation des dégâts tempétueux observés dans deux forêts françaises (Conches-Breteuil, Eure, et Fontainebleau, Seine-et-Marne). *L'espace géographique*, 19 p.
- Heywood V. H. and Watson R. T. 1995. (ed.). Global biodiversity assessment. Published for the United Nations Environment Programme (UNEP). Xii + 1140. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York.
- Hudson, W.D. and Ramm C.W. 1987. Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement, *Photogramm. Eng. Remote Sens.* Vol. 53, num. 4, April, 421-422.
- Lemel J. Y., Belichon S., Clobert J. and Hochberg, M. E. 1997. The evolution of dispersal in a two-patch system: some consequences of differences between migrants and residents. *Evolutionary Ecology*, 11, 613-629.
- McPeck M. A. and Holt R. D. 1992. The evolution of dispersal in spatially and temporally varying environments. *American Naturalist* 140, 1010-1027.
- Meyer-Roux J., Sigman R., Craig M. et Ozga M. 1981a. Estimation des superficies à l'aide des données LANDSAT et de l'enquête TER-UTI, *Cahiers de Statistique Agricole*, n° 5/6, septembre-octobre, 11-17.
- Meyer-Roux J., Sigman R., Craig M. et Ozga M., 1981b. Cartographie et statistique en télédétection, *Cahiers de Statistique Agricole*, n° 6/6, novembre-décembre, 9-14.
- Morineau A. et T. Alujat-Banet. 2000. *Analyse en composantes principales*, Montreuil, CISIA CERESTA, 150 pp.
- Mortier F. 1999. Les oiseaux dans la gestion durable des forêts publiques. In *L'oiseau et la forêt*, doc. ONF consultable sur <http://www.onf.fr/foret/dossier/oiseaux/oi02.htm>, 3 pp.
- Muller Y. 1995. Influence de la structure du peuplement forestier sur l'avifaune nicheuse. ONF Bull. Tech. n°28, 39-48.

GODARD (V.), DWORZYNSKA (I.), DREISS (A.), DANCHIN (É.) - 2006 - Caractérisation d'un habitat forestier tempéré par télédétection satellitale *Photo-Interprétation* (forme soumise)

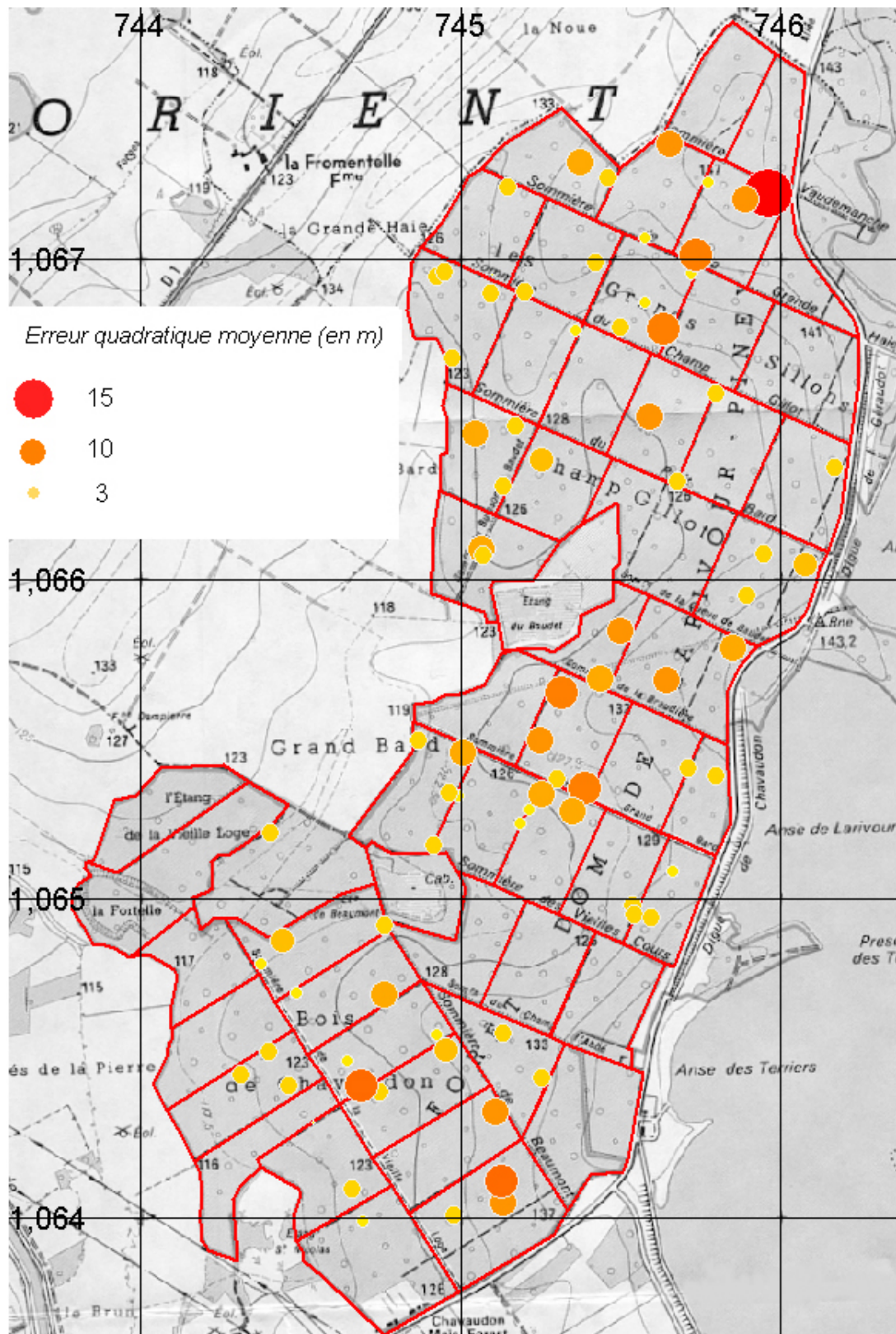
Nakache J.-P. et F. Confais. 2000. *Méthodes de classification. Avec illustrations SPAD et SAS*, Montreuil, CISIA CERESTA, 192 pp.

Rosenfield, G.H. and K. Fitzpatrick-Lins. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, vol. 52, num. 2, February, 223-227.

Long abstract

Within the framework of a long-term study on the effects of storm disturbances (simulated by cuts!) on the diversity of the whole forest avifauna, we carried out an analysis of the forest structures using ground investigations and satellite imagery analysis. Approximately 80 sample plots, on a total of a little a more thousand, were the subject of a structural and floristic statement. The objective was to draw up a cartography of the forest structures to measure their impact on the distribution and the behavior of cavernicolous passerines (primarily of the great tits and the blue tits). A forest typology was analyzed around a sample of nestboxes, which were partly selected because of their good positioning accuracy by GPS. Our typology analysis resulted in a series of classifications on principal component analyses (ACP) based on structural and floristic characteristics. It made it possible to supervise the image processing from satellite ETM+ Landsat7. The partition, presented here, includes three classes primarily based on the forest structures. It is centered on the three stages (thicket-pole wood, cut of regeneration, coppice-with-standard of oak and charm) which are often retained to characterize the forest avian specific richness. Two other partitions are considered (four and seven classes), which provided an additional discrimination on the tree species. We evaluated the relevance of typology analysis for the study of cavernicolous passerines, *as well as the quality of the adequacy sample of ground - classification of the remote sensed data*. A critic analysis on satellite data was carried out as well on their check on the phenologic constraints and on the space resolution compared to structural diversity of these high forest in conversion.

Planche hors-texte 1 : Répartition de l'échantillon et précision de son positionnement en forêt de Larivour (Aube)



Sources : IGN 2817E, Lusigny-sur-Barse, 1996, 4ed. carroyage kilométrique Lambert 1

Planche hors-texte 2 : Les habitats forestiers en 2000 (forêt de Larivour, Aube). Partition en 3 classes de gestion

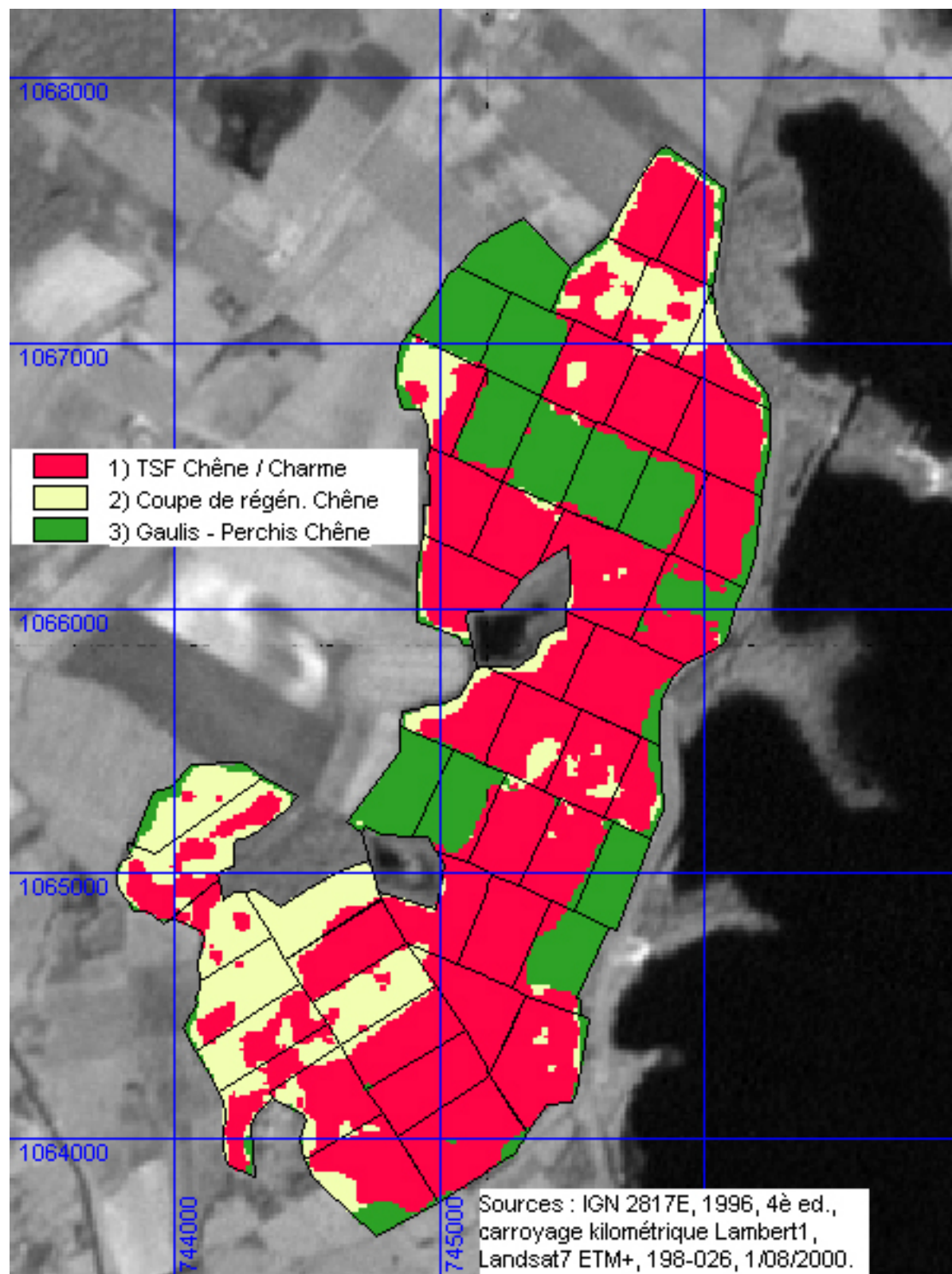


Planche hors-texte 3 : Synthèse méthodologique

