



**HAL**  
open science

# Comparaison de protocoles de caractérisation des trouées de la canopée sur des séries temporelles de photos aériennes : application à la caractérisation du régime de perturbation

I. Piney

► **To cite this version:**

I. Piney. Comparaison de protocoles de caractérisation des trouées de la canopée sur des séries temporelles de photos aériennes : application à la caractérisation du régime de perturbation. Sciences de l'environnement. 2010. hal-02593416

**HAL Id: hal-02593416**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02593416>**

Submitted on 15 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PINEY Isabelle  
Année 2009 - 2010  
Rapport de stage de Master EA 2<sup>ème</sup> année  
Spécialité Biodiversité, Ecotoxicité, Écosystèmes  
Parcours « Conservation et Restauration de  
la Biodiversité »

**Comparaison de protocoles de caractérisation des trouées de la  
canopée sur des séries temporelles de photos aériennes :  
application à la caractérisation du régime de perturbation.**

Stage réalisé du 08 février au 06 août 2010, au CEMAGREF (Montpellier), sous la direction de :  
Mme DURRIEU Sylvie, chercheur au CEMAGREF, Montpellier.  
M. DEVIN Simon, enseignant-chercheur de l'Université Paul Verlaine de Metz.

Mémoire soutenu le 31 août 2010 devant le jury composé de :  
M. MULLER Serge, responsable de la formation  
Mme DURRIEU Sylvie, tuteur au sein du CEMAGREF  
Mme GOSELIN Marion, responsable du stage  
M. DEVIN Simon, tuteur universitaire



## Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Sylvie Durrieu, pour m'avoir acceptée en stage et accueillie au sein de la MTD. Son aide et ses conseils m'ont été précieux tout au long de ces six mois. Egalement intéressé par mon sujet de stage, Cédric Véga a été d'une aide précieuse, tant pour les questions théoriques que techniques.

Je souhaite également remercier l'équipe de Nogent-sur-Vernisson, toujours disponible pour répondre à mes interrogations, par mail ou par téléphone : Frédéric et Marion Gosselin, pour leur aide méthodologique et statistique, ainsi que Yoan Paillet, pour sa connaissance du terrain d'étude et son aide lors du traitement des données.

Merci aussi à tout le personnel de la MTD pour leur gentillesse et la chaleur de leur accueil.

Lors des recherches bibliographiques, Sylvie Blin-Sarah, documentaliste, a été un allié précieux pour m'apprendre à manipuler les outils documentaires à ma disposition ainsi que pour la recherche d'articles, je tiens à lui exprimer ici ma gratitude.

Je remercie également l'équipe d'informaticiens : Alain Clopes, Guy Roussin, Nicolas Moyroud, Pierre Malard pour leurs conseils techniques. Merci à Stéphane Dupuy et Thierry Tormos, pour m'avoir permis d'assister à leur cours sur le logiciel Definiens ; Roberto Meloni, également pour son aide avec Definiens et l'autorisation qu'il m'a donnée d'utiliser le *ruleset* qu'il a créé, me faisant ainsi gagner un temps précieux.

Merci également à Jean Negrel, qui a fortement contribué à mon adaptation rapide au sein de la MTD, pour sa bonne humeur, les pauses café et les « pauses geek ».

Je remercie aussi le Réseau Biodiv' de la MTD de m'avoir invitée à participer aux réunions, ce fut une expérience très enrichissante qui m'a permis de mieux connaître les sujets d'étude de la MTD et de rencontrer différents chercheurs aux sujets très divers, et toujours intéressants. Merci donc à Pierre-André Pissard, animateur du Réseau Biodiv', ainsi qu'à Jennifer Amsallem, Isabelle Chaffaut, Flavie Cernesson, Maguelonne Teisseire, et tous ceux que je n'ai pas mentionné et qui font partie de ce groupe de travail.

Mes remerciements vont aussi à toute l'équipe de la plateforme : Soizic, Nicolas, Julie, Clotilde, Elodie, Pauline, Elder, Antoine, David, Adrien, Lucas, et tous ceux que j'oublie, pour les bons moments passés ensemble, leur bonne humeur et la bonne ambiance de travail qu'ils ont contribué à créer.

Je n'oublie pas le groupe « Café de la Doc » du midi, avec qui j'ai eu des discussions aussi diverses qu'enrichissantes ; mais navrée, malgré vos efforts je ne me suis pas encore totalement convertie aux logiciels libres !

Enfin, je n'oublie pas mes parents, mes proches et mes amis pour leur soutien et leur présence tout au long de mes études, et plus particulièrement au cours de ce stage.

Un grand merci également à Jérôme, pour m'avoir soutenue, encouragée et aidée malgré la distance qui nous séparait.

# Sommaire

Remerciements	
Liste de tableaux	
Liste des figures	
Liste des annexes	
Liste des abréviations	
<b>Présentation de l'organisme d'accueil.....</b>	<b>A</b>
1. Le Cemagref.....	A
2. L'UMR « Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale » .....	A
3. L'UR Ecosystèmes forestiers – EFNO .....	B
<b>Prérequis.....</b>	<b>i</b>
<b>Contexte du stage .....</b>	<b>1</b>
1. Présentation du projet « Gestion forestière, Naturalité, Biodiversité » .....	1
2. Dispositif d'étude.....	2
<b>Objectifs du stage .....</b>	<b>3</b>
<b>Chapitre 1 : La cartographie des trouées forestières - Synthèse bibliographique .....</b>	<b>5</b>
1. Intérêt de la cartographie des trouées forestières.....	5
1.1. Rôle des trouées dans les écosystèmes forestiers .....	5
1.2. Notions de trouées : différents types.....	5
2. Différentes approches de cartographie des trouées.....	7
3. Avantages et inconvénients des deux types d'approches.....	10
4. Choix méthodologiques pour l'étude GNB.....	12
<b>Chapitre 2 : Photogrammétrie : principes de base.....</b>	<b>14</b>
1. Principes de base .....	14
2. Calcul de MNS.....	16
3. Orthorectification : de la photo aérienne à l'image superposable à un plan .....	16
<b>Chapitre 3 : Matériel et méthodes .....</b>	<b>18</b>
1. Zone d'étude, données et logiciels disponibles.....	18
1.1. Zone d'étude .....	18
1.2. Données à disposition .....	19
1.3. Logiciels utilisés .....	20
1.3.1. ArcGIS 9.2™ (©ESRI, 1998-2009).....	20
1.3.2. ERDAS Imagine 9.2™ (©Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC, 1991-2008).....	20

1.3.3.	Definiens eCognition Developer 7.0™ (d'après le site de l'UMR TETIS, fiche logiciel « Definiens », <a href="http://www.tetis.teledetection.fr">www.tetis.teledetection.fr</a> ).....	21
2.	Définition de la trouée arrêtée pour l'étude.....	22
3.	Traitement des données.....	22
3.1.	Préparation des données de base.....	22
3.1.1.	Préparation du projet LPS et mise en place des points de calage.....	22
3.1.2.	Génération et vérification du MNS.....	23
3.1.3.	Génération et vérification des orthophotos.....	24
3.1.4.	Génération d'un Modèle Numérique de Terrain grâce à des photos d'hiver.....	25
3.2.	Modèles numériques de Canopée.....	25
4.	Méthodes d'identification des trouées.....	26
4.1.	Analyse de séries temporelles de MNC sous ERDAS Imagine®.....	26
4.1.1.	Analyse des cartes annuelles des trouées potentielles.....	26
4.1.1.1.	Cartographie annuelle des trouées potentielles.....	26
4.1.1.2.	Combinaison des cartes.....	28
4.1.2.	Cartographie des trouées par analyse de l'évolution temporelle des hauteurs brutes ...	28
4.2.	Cartographie des trouées par analyse texturale et radiométrique sous Definiens®.....	30
4.3.	Analyse combinée de l'information radiométrique et texturale et du MNC sous Definiens®..	31
4.4.	Validation et comparaison des méthodes.....	31
4.4.1.	Validation des cartes de trouées par analyse visuelle et par comparaison aux relevés terrain.....	31
4.4.2.	Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes.....	32
4.4.2.1.	Matrices de confusion.....	32
4.4.2.2.	Comparaison des surfaces classées en trouées selon les différentes méthodes.....	32
	<b>Chapitre 4 : Résultats.....</b>	<b>34</b>
1.	Précision du MNT généré à partir de photos d'hiver.....	34
2.	Précision des MNC.....	35
3.	Les différentes cartes de trouées obtenues.....	36
3.1.	Cartographie des trouées par comparaison des MNC.....	36
3.2.	Cartographie par analyse texturale.....	36
3.3.	Cartographie par combinaison de l'analyse texturale et du MNC.....	36
4.	Comparaison des cartes de trouées obtenues par les différentes méthodes.....	37
4.1.	Matrices de confusion.....	37
4.2.	Classification à partir du MNC.....	39
4.3.	Classification orientée objet.....	40

4.4.	Classification orientée objet couplée au MNC .....	40
4.5.	Comparaison des surfaces classées selon les différentes méthodes.....	41
4.6.	Comparaison à une référence .....	41
<b>Chapitre 5 : Discussion.....</b>		<b>43</b>
1.	Définition de la trouée.....	43
2.	Apports méthodologiques .....	44
2.1.	Mise au point de protocole pour l'étude des hauteurs d'arbres en foret .....	44
2.2.	Test de plusieurs méthodes d'identification des trouées .....	44
2.3.	Validité du MNT réalisé à partir de photos d'hiver .....	44
3.	Validation terrain .....	45
4.	Avantages et inconvénients des méthodes utilisées - Problèmes rencontrés.....	46
4.1.	Temps de préparation et de traitement des données .....	46
4.2.	Différences de radiométrie sur les images.....	47
4.3.	Problèmes non résolus .....	47
<b>Chapitre 6 : Conclusion. ....</b>		<b>49</b>
1.	Validation de la méthode .....	49
2.	Transférabilité de la méthode : quelle possibilité d'application à d'autres massifs forestiers ? .....	49
<b>Liste des références bibliographiques .....</b>		<b>50</b>

## Résumé

Dans un contexte global d'intensification de l'exploitation des ressources forestières, il est important de connaître les impacts de cette exploitation sur la biodiversité. Dans ce but, le projet « Gestion forestière, Naturalité, Biodiversité », actuellement en cours en France, cherche à comprendre le lien entre biodiversité, exploitation des parcelles forestières et naturalité, en comparant des parcelles non exploitées à des parcelles exploitées et en mesurant un certain nombre de variables écologiques.

Afin d'apporter une dimension paysagère et temporelle à ce projet, l'étude des trouées à partir de photographies aériennes a été mise en place en 2010. Plusieurs méthodes d'identification des trouées ont été testées : analyse de modèles numériques de hauteurs, classification orientée objet et classification orientée objet couplée à un modèle numérique de hauteur ; dans le but de déterminer quelle méthode est la plus fiable.

Les résultats obtenus montrent que la classification orientée objet couplée à un modèle numérique de hauteurs donne des résultats prometteurs sur un massif forestier de plaine. Il faut désormais tester l'efficacité de cette approche sur d'autres massifs, en particulier en montagne.

**Mots-clés :** trouées, Modèle Numérique de Canopée, Modèle Numérique de Surface, Classification Orientée Objet.

## Abstract

Nowadays, exploitation of forest resources is increasing, and it is important to know how this exploitation affects biodiversity. To achieve this goal, the research project “Gestion forestière, Naturalité, Biodiversité” seeks to understand the link between biodiversity, forest harvesting and naturalness, by comparison between managed and unmanaged forest.

In order to provide a spatial and temporal dimension to this project, the study of forest gaps, based on aerial photography, was lead on 2010. Three methods for identify gaps were tested: analysis of digital elevation models, object-based image analysis, and object-based analysis in addition to digital elevation model ,in order to determine which method is the most reliable.

The results show that the object-based analysis combined with digital elevation model is giving interesting results on a plain forest. Now, this method must be tested on other types of forests, in particular on mountain forests.

**Keywords:** gaps, digital elevation model, canopy height profile, object-based image analysis.

## Liste de tableaux.

**Tableau I :** Différentes définitions des trouées.

**Tableau II :** Synthèse des différents types de photos aériennes utilisées par les différentes études.

**Tableau III :** Caractéristiques des photographies aériennes utilisées.

**Tableau IV :** Combinaison des types de couvert ayant servi à la création des arbres de décision pour les cartes « binaires ».

**Tableau V :** Combinaison des types de couvert ayant servi à la création des arbres de décision pour les cartes « par hauteurs ».

**Tableau VI :** Tailles et rayons des surfaces étudiées autour des placettes.

**Tableau VII :** Comparaison de la classification orientée objet par rapport au MNC

**Tableau VIII :** Comparaison de la classification orientée objet couplée au MNC par rapport au MNC.

**Tableau IX :** Comparaison des deux classifications orientées objets.

**Tableau X :** Surfaces moyennes classées selon les hauteurs.

**Tableau XI :** Proportion de surfaces classées selon le MNC, par parcelles, selon différentes tailles de zones tampons.

**Tableau XII :** Surfaces moyennes classées selon la classification orientée objet.

**Tableau XIII :** Proportion de surfaces classées selon la classification orientée objet, par parcelles, selon différentes tailles de zones tampons.

**Tableau XIV :** Surfaces moyennes classées selon la classification orientée objet couplée au MNC.

**Tableau XV :** Proportion de surfaces classées selon la classification orientée objet couplée au MNC, par parcelles, selon différentes tailles de zones tampons.

**Tableau XVI :** Comparaison des surfaces moyennes classées en trouées selon les différentes méthodes.

**Tableau XVII :** Comparaison des différentes méthodes de classification à la photo-interprétation manuelle.

## Liste des figures

- Figure 1 :** Processus d'orthorectification.
- Figure 2 :** Principe de la stéréoscopie.
- Figure 3 :** Interface graphique du Modeler d'ERDAS Imagine 9.2.
- Figure 4 :** Exemple de décalage entre la Bd Ortho® et l'orthophoto de 1987 réalisée à partir du MNS non corrigé.
- Figure 5 :** Absence de décalage entre la Bd Ortho® et l'orthophoto de 1987 réalisée à partir du MNS corrigé.
- Figure 6 :** Reconstruction du MNS après corrections.
- Figure 7 :** Comparaison des valeurs du MNT hiver et du MNT de l'IGN.
- Figure 8 :** Comparaison de valeurs ponctuelles du MNC et des mesures terrain.
- Figure 9 :** Comparaison des valeurs moyennes du MNC dans un buffer de 10 m et des mesures terrain.
- Figure 10 :** Comparaison des valeurs maximales du MNC dans un buffer de 10 m et des mesures terrain.

## Liste des annexes

- Annexe A :** Exemple de certificat de calibration d'une caméra métrique
- Annexe B :** Photographie aérienne avant et après orthorectification
- Annexe C :** Localisation des sites d'étude en Forêt Domaniale de Fontainebleau
- Annexe D :** Exemples d'arbres de décision utilisés dans le Knowledge Engineer
- Annexe E :** Exemple de segmentation réalisée avec Definiens
- Annexe F :** Exemple de classification réalisée avec Definiens
- Annexe G :** Modeller utilisé pour calculer le MNT à partir de photos d'hiver
- Annexe H :** Carte des types de trouées de 1961 à 2000, réalisée à partir des MNC avec élimination des petites trouées – Intersection des MNC
- Annexe I :** Carte des trouées par dates d'apparition de 1961 à 2000, réalisée à partir des MNC bruts – Intersection des MNC
- Annexe J :** Classification orientée objet réalisée sur l'orthophoto de 1961
- Annexe K :** Classification orientée objet couplée au MNC réalisée sur l'orthophoto et le MNC de 1961
- Annexe L :** Matrice de confusion : principe
- Annexe M :** Procédure suivie pour l'extraction des valeurs du MNT d'hiver et validation
- Annexe N :** Tutoriel : prise en main rapide de Leica Photogrammetry Suite

## Liste des abréviations

**MTD** : Maison de la TéléDétection en Languedoc – Roussillon.

**ONF** : Office National des Forêts.

**RNF** : Réserves Naturelles de France.

**SIG** : Système d'Information Géographique.

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain.

**MNS** : Modèle Numérique de Surface.

**MNC** : Modèle Numérique de Canopée.

**IGN** : Institut Géographique National.

**IFN** : Inventaire Forestier National.

**Lidar**: Light Detection And Ranging, télédétection par laser.

**IRC** : Infra-Rouge Couleur

**NB** : Noir et Blanc

# Présentation de l'organisme d'accueil

## 1. Le Cemagref.

Le Cemagref est un organisme de recherche spécialisé en sciences et technologies pour l'environnement, placé sous la double tutelle des ministères en charge de la recherche et de l'agriculture. Les approches scientifiques permettent d'étudier les écosystèmes complexes, l'eau, les territoires et la biodiversité et leurs interrelations avec les activités humaines. Elles visent à offrir des solutions concrètes aux questions environnementales et sont fondées sur un partenariat fort avec les industriels et les collectivités territoriales.

Les équipes pluridisciplinaires travaillent sur l'adaptation au changement global, associant les sciences expérimentales, les sciences économiques et sociales et la science informatique (modélisation, intégration de données) :

- Risques environnementaux : crues, inondations, avalanches, feux de forêt, pollutions diffuses
- Surveillance des milieux aquatiques continentaux, ressources en eau, usages de l'eau
- Technologies propres : écotechnologies, éco-évaluation, écotoxicologie, traitement et valorisation énergétique des déchets organiques.
- Aménagement du territoire
- Economie et sociologie de l'environnement : observatoire de la biodiversité, télédétection, trames verte et bleue.

## 2. L'UMR « Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale »

À Montpellier, le Cemagref a fondé, en partenariat avec AgroParisTech, et le Cirad une Unité Mixte de Recherche « Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale » (TETIS), rassemblant environ quatre-vingt chercheurs, enseignants-chercheurs et personnels administratifs et techniques, ainsi qu'une vingtaine de doctorants, autour des méthodes de maîtrise de l'information spatiale pour la gestion de l'environnement et le développement territorial. L'UMR TETIS est implantée à Montpellier (Maison de la Télédétection et site de Baillarguet) et Clermont-Ferrand (site du Cemagref). Les approches développées par les chercheurs de l'unité sont inscrites dans les champs disciplinaires de la télédétection (capteurs,

traitement de l'image et du signal), des systèmes d'information, de l'analyse spatiale, de la géographie, des sciences de l'environnement et du développement territorial.

Dans le domaine de l'information pour le développement territorial, l'UMR a notamment développé des compétences méthodologiques d'une part pour caractériser l'espace rural et péri-urbain en tant que support de ressources ou d'activités à partir d'images de télédétection et d'autre part pour la modélisation de la dynamique spatiale de systèmes territoriaux où interagissent des processus relatifs au fonctionnement du milieu physique, et aux activités anthropiques qui le transforment : couplages de modèles et systèmes d'information géographique, développement de modèles spatiaux. L'UMR mène également des recherches sur les modes de gouvernance et de concertation des acteurs autour du partage de l'information, et sur les conditions d'appropriation et de mobilisation de cette information.

Pour mener à bien ces recherches, des partenariats scientifiques et techniques sont tissés avec les agences spatiales nationales et européennes (CNES, ESA) et l'industrie spatiale de pointe (Thales, Spot Image, Astrium etc.)

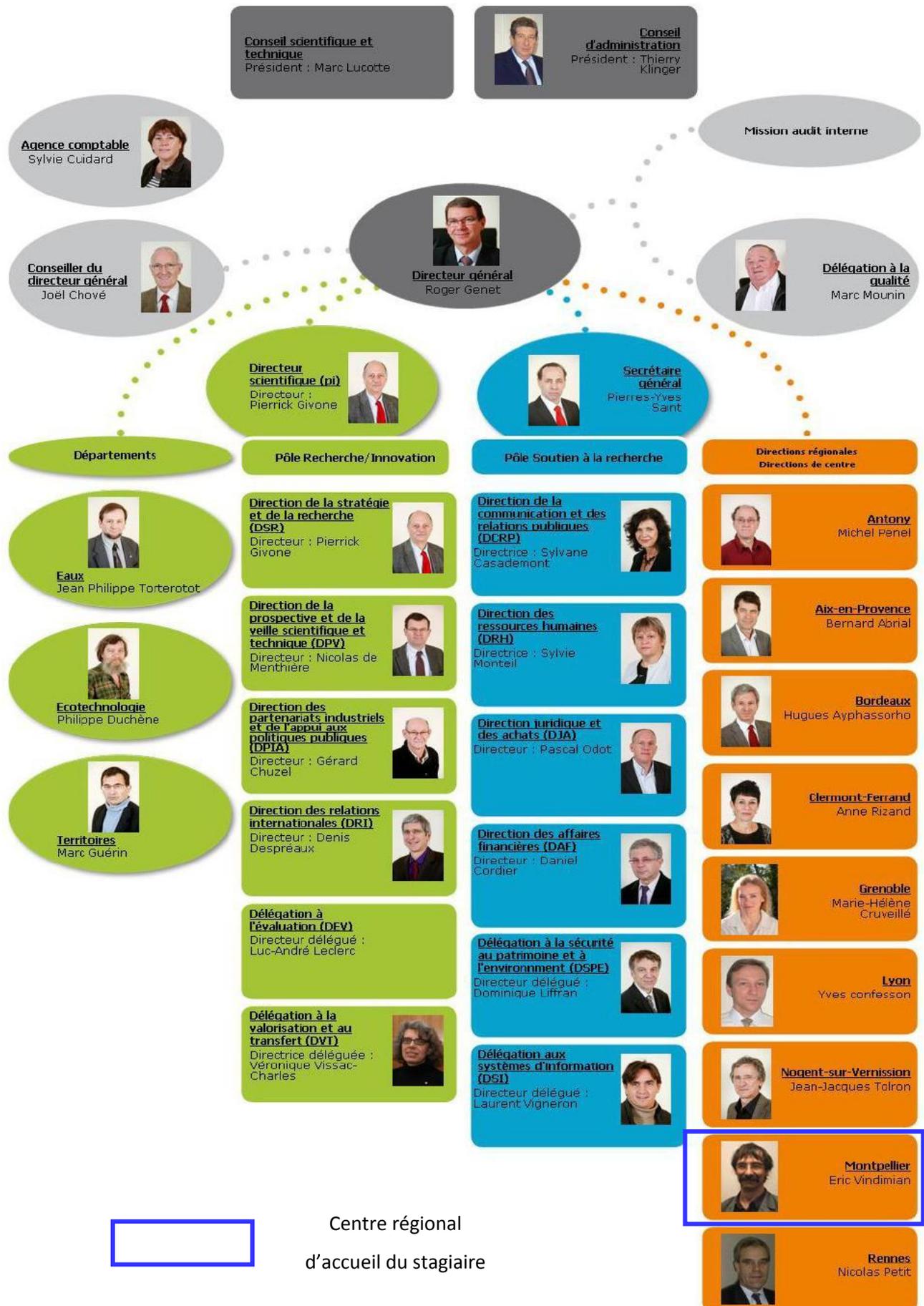
### **3. L'UR Ecosystèmes forestiers – EFNO**

L'unité EFNO travaille sur les thématiques de la biodiversité et de ses interactions avec une gestion durable et multifonctionnelle des forêts. L'équipe « Biodiversité » travaille plus particulièrement sur quatre problématiques qui sont :

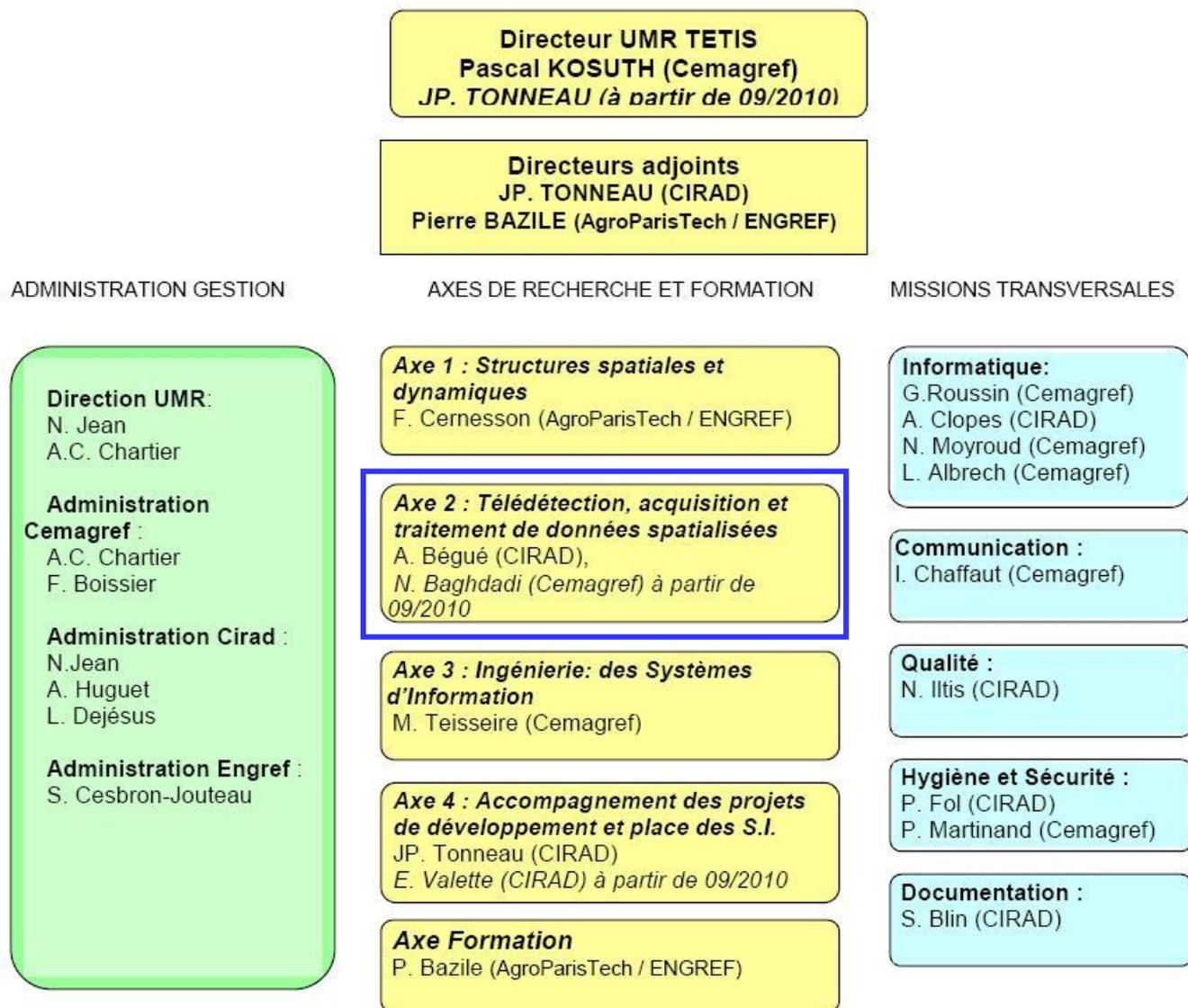
(1) Anticiper les conséquences sur la biodiversité de l'évolution de la gestion forestière, en particulier le changement d'essences, l'augmentation des volumes récoltés et le raccourcissement des cycles sylvicoles ; (2) comprendre l'influence du paysage actuel et passé sur la répartition et la dynamique de la biodiversité forestière, en relation avec la trame verte du Grenelle de l'environnement ; (3) développer des méthodes d'inventaires standardisées, destinées en particulier aux gestionnaires et aux suivis de biodiversité, et des méthodes d'analyse adaptées aux jeux de données de biodiversité ; (4) synthétiser et diffuser les connaissances scientifiques sur les pratiques de gestion favorables à la biodiversité.

(Sources : sites internet du Cemagref : [www.cemagref.fr](http://www.cemagref.fr) et de l'UMR TETIS : [www.tetis.teledetection.fr](http://www.tetis.teledetection.fr) )

## Organigramme général du Cemagref (organisme d'accueil) :



## Organigramme de l'UMR TETIS (lieu effectif d'accueil) :



Axe de recherche dont dépend le stagiaire

# Prérequis

## Modèles de hauteurs (figure a) :

**Modèle Numérique de Terrain (MNT).** Un MNT est un maillage géoréférencé fournissant l'altitude du sol au centre de chaque maille. Lorsque la grille est régulière, le MNT peut être enregistré dans un format raster (matriciel) et le pas de la grille, appelé résolution, est une de ses caractéristiques. La précision d'un MNT dépend à la fois de la taille de la maille et de l'erreur sur l'altitude à chaque nœud (Muraz et al, 1999). Ainsi, un MNT avec une maille de 50m sera moins précis qu'un MNT avec une maille de 10 ou même de 1m, mais pourra être suffisant pour beaucoup d'usages.

**Modèle Numérique de Surface (MNS).** Le MNS est un maillage géoréférencé fournissant l'altitude du sursol au centre de chaque maille, contrairement au MNT il ne fournit pas l'altitude du sol nu mais l'altitude de ce qui se trouve sur le sol. Ainsi en forêt on aura la hauteur des arbres, en ville celle des bâtiments, sur terrain nu celle du sol, etc.

**Modèle Numérique de Canopée (MNC).** En forêt, maillage géoréférencé obtenu par soustraction du MNT au MNS afin d'avoir uniquement la hauteur des arbres. Dans notre étude, il sert de base à l'étude des trouées car c'est à partir des différences de hauteur entre arbres que nous identifions celles-ci.

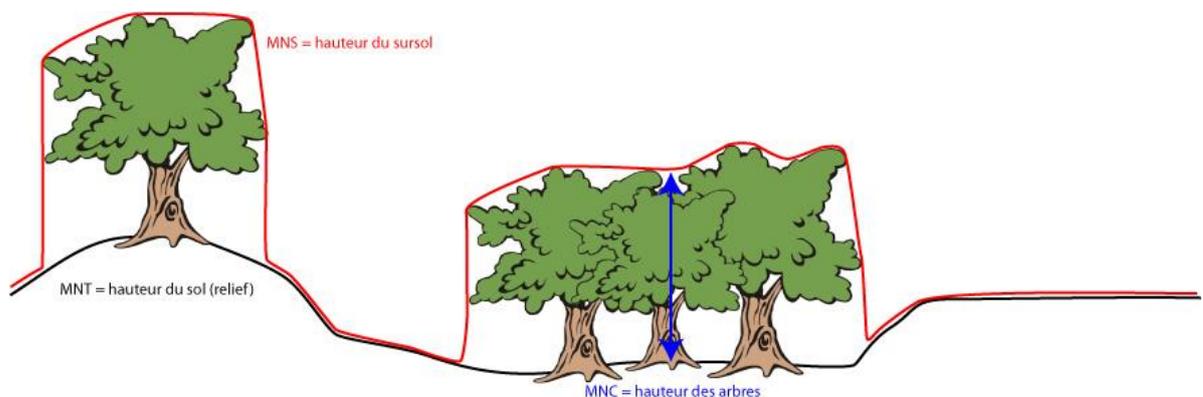


Figure a. Principe et différences entre les modèles de hauteurs.

**Pyramide :** Une pyramide est un empilement de copies de l'image à plus ou moins forte résolution. Avec les pyramides, une copie des données à résolution plus faible s'affiche rapidement lors du dessin du jeu de données dans son intégralité, dans un logiciel de SIG par exemple. Au fur et à mesure que l'on effectue un zoom avant, les niveaux dont la résolution est plus élevée sont dessinés ; la performance reste optimale car on dessine successivement des surfaces plus petites. Le fichier de pyramide porte le nom du jeu de données raster, mais peut se trouver dans un dossier différent (le chemin est indiqué dans le fichier auxiliaire). (Source : [www.portailsig.org](http://www.portailsig.org) )

### **Vocabulaire propre à la photographie aérienne – données nécessaires à l'orthorectification.**

**Orthophotographie :** une orthophotographie ou orthophoto est une image obtenue par traitement d'un cliché aérien numérique ou argentique dont la géométrie a été redressée de sorte que chaque point soit superposable à une carte plane qui lui correspond (Source : Wikipédia, <http://fr.wikipedia.org/wiki/Orthophotographie>). La correction peut être effectuée à partir d'un MNT ou d'un MNS, et la qualité de l'orthophoto dépendra de celle du MNS.

**Marques fiduciaires:** repères de fond de chambre situés aux quatre angles et/ou au milieu des quatre cotés du fond d'une chambre métrique et qui matérialisent, sur chaque cliché, le système de coordonnées image (voir figure b. L'intersection des lignes joignant les repères opposés détermine le centre du cliché ou point principal. Les coordonnées exactes de ces repères sont données sur le certificat de calibration. Ces informations sont indispensables lors de l'orthorectification d'une photographie (Boureau, 2008).

**Point principal :** il correspond au point milieu d'une projection centrale, c'est-à-dire le point déterminé par l'intersection d'une perpendiculaire au plan focal passant par le centre de projection. (Source : [http://www.unites.uqam.ca/dgeo/geo7630-2004/section2\\_4.pdf](http://www.unites.uqam.ca/dgeo/geo7630-2004/section2_4.pdf) ). Sur une photographie aérienne, il peut être déterminé par l'intersection des lignes joignant les marques fiduciaires, mais ses coordonnées précises sont données par le certificat de calibration.

**Point principal d'autocollimation :** il correspond à l'intersection du rayon principal (qui correspond à l'axe principal de l'optique théorique) et du plan focal. (Source : [http://www.unites.uqam.ca/dgeo/geo7630-2004/section2\\_4.pdf](http://www.unites.uqam.ca/dgeo/geo7630-2004/section2_4.pdf))

**Distorsions radiales :** des asymétries de lentilles ainsi qu'une légère déviation du rayon principal par rapport à la perpendiculaire qu'il devrait former avec le plan focal introduisent des distorsions radiales étalonnées en laboratoire et décrites dans le rapport d'étalonnage. (Source : [http://www.unites.ugam.ca/dgeo/geo7630-2004/section2\\_4.pdf](http://www.unites.ugam.ca/dgeo/geo7630-2004/section2_4.pdf)).



Figure b. Détail d'une marque fiduciaire sur une photographie aérienne de 1987.

**Vision binoculaire :** le cerveau interprète les images venant des deux yeux. Les images obtenues par l'œil gauche et l'œil droit sont légèrement différentes car le point d'observation est différent. Le cerveau interprète ces deux images et permet une perception tridimensionnelle de l'objet (d'après le site de l'université de Pierre et Marie Curie de Jussieu, <http://www.snv.jussieu.fr/vie/dossiers/2yeux/visionbin.html> ).

**Vision stéréoscopique :** ensemble des techniques mises en œuvre pour reproduire une perception du relief à partir de deux images planes. Elle est née pratiquement en même temps que la photographie et se base sur le fait que la perception humaine du relief se forme dans le cerveau lorsqu'il reconstitue une seule image à partir de la perception des deux images planes et différentes provenant de chaque œil. Il existe, pour réaliser ces images, aussi bien que pour les observer, une grande variété de moyens (source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Stéréoscopie> ).

**Photogrammétrie** : Discipline dont le but est la détermination des dimensions, positions et formes des objets au moyen de mesures faites sur des photographies aériennes, en la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents. Recopiant la vision stéréoscopique humaine, elle a longtemps exploité celle-là pour reconstituer le relief de la scène à partir de cette différence de points de vue. Actuellement, elle exploite de plus en plus les calculs de corrélation entre des images désormais numériques. Cette technique repose entièrement sur une modélisation rigoureuse de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D exacte de la réalité. (Sources : Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges, JG Boureau, éd. IFN ; [www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org)).

**Radiométrie** : mesure de l'intensité des rayonnements réfléchis ou émis par une surface.

## Contexte du stage

Alors que les ressources forestières sont largement exploitées par l'homme en France et dans le monde, il est important de connaître les impacts de cette exploitation sur la biodiversité. Dans ce but, le projet « Gestion forestière, Naturalité, Biodiversité » (GNB) mené par le Cemagref en partenariat avec l'Office National des Forêts et les Réserves Naturelles de France étudie le lien entre biodiversité, exploitation forestière et naturalité, en comparant la biodiversité de parcelles exploitées à celle de parcelles non exploitées (Réserves Biologiques Intégrales ou parties de Réserves Naturelles).

### 1. Présentation du projet « Gestion forestière, Naturalité, Biodiversité »

L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact de l'exploitation du bois sur la biodiversité forestière métropolitaine. Le projet présente une étude statistique et multi-taxonomique des pressions pesant sur la biodiversité, grâce à une comparaison entre peuplements exploités et peuplements en évolution naturelle. Il s'agit de déterminer ce qui explique le mieux les variations de biodiversité forestière entre des zones exploitées et non exploitées. Parmi les facteurs explicatifs probables, on peut distinguer :

- la naturalité « anthropique » : la perturbation induite par l'exploitation du bois qui modifie la biodiversité de manière plus ou moins forte et plus ou moins longue. Ce facteur vise à quantifier la capacité du système à revenir à son état initial (résilience) ;
- la naturalité « biologique et écologique » : la présence de micro-habitats typiques des stades matures de forêts non exploitées tels que le bois mort (qualité et quantité), les cavités... sont un facteur déterminant pour la biodiversité de nombreux cortèges d'espèces ;
- la structure et la composition du peuplement arboré : l'influence de la différence de structure et de composition du peuplement sur la biodiversité. Par exemple, plusieurs études en Scandinavie ont montré qu'un facteur déterminant des différences de biodiversité entre peuplements exploités et non exploités était la présence de tremble (*Populus tremula*) dans les peuplements naturels, alors que cette espèce est exclue par l'exploitation. C'est dans ce volet que l'approche « trouées » étudiée durant ce stage se situe.

Ainsi, ce projet émerge à la fois aux théories écologiques liées aux notions de perturbation (durée entre deux perturbations ; intensité de la perturbation, la perturbation étant la coupe forestière

ou une perturbation naturelle) et d'habitat (relation de la biodiversité aux caractéristiques dendrométriques), en interaction avec les traits d'histoire de vie des espèces.

Source : site internet du projet, [www.gnb.cemagref.fr](http://www.gnb.cemagref.fr).

## **2. Dispositif d'étude.**

Le dispositif d'étude comprend en 2010 les forêts de Fontainebleau (77), Auberive/Chalmessin (52), Ventron (88), Cîteaux et Combe Lavaux (21), Ballons Comtois (70) et Chizé (79), dans lesquelles 121 placettes tirées au sort sous contrainte stationnelle ont été équitablement réparties entre zones en réserve depuis au moins 20 ans et zones gérées pour la production de bois. Pour chaque placette, 7 groupes taxonomiques sont échantillonnés : plantes vasculaires, mousses, champignons, chauve-souris, oiseaux, coléoptères carabiques et saproxyliques. Ces données de biodiversité, identité et abondance des espèces en nombre d'individus, seront les variables à expliquer. Des paramètres écologiques sont relevés, qui seront testés comme variables explicatives : situation de la placette en réserve ou en zone exploitée, mais aussi d'autres variables écologiques, qui sont acquises :

- soit par un relevé écologique complet sur le terrain (description du peuplement), sur une surface de 0.1 à 0.5 ha centrée sur la placette
- soit par recherches dans les archives (historique de coupes, ancienneté de l'état boisé)
- soit par une analyse de photographies aériennes (paramètres écologiques caractérisant le paysage environnant la placette). Le travail réalisé pendant mon stage et présenté dans ce rapport porte plus précisément sur ce dernier point.

## Objectifs du stage

Le travail de ce stage s'inscrit dans la nouvelle dimension qui a été apportée au projet GNB, la dimension spatiale et temporelle, par le biais d'une étude diachronique des trouées. L'une des hypothèses à tester est en effet que la diversité biologique présente en un point de la forêt dépend en partie du régime de perturbation de la canopée dans le paysage environnant : dans notre cas, nous souhaitons étudier l'influence de trouées de grande taille (> 0,15 ha), d'origine sylvicole (coupes) ou naturelle (chablis et dégâts de tempêtes) en forêt de plaine. Pour cela, le développement de méthodes de caractérisation des trouées est un travail nécessaire, afin de voir quel protocole d'identification automatisée des trouées est le plus efficace. Le massif de Fontainebleau a été choisi comme zone d'étude pour ce travail exploratoire. Les informations recherchées sur chaque placette sont :

- la surface de trouées, ou le pourcentage de canopée en trouées, dans un buffer circulaire (plusieurs tailles seront envisagées, de 1 ha à 100 ha) autour de la placette.
- le pourcentage de la canopée ayant été en trouée par le passé (entre 1949 et 2003), toujours dans un buffer circulaire de 1 à 100 ha autour de la placette.
- une estimation de la taille de chaque trouée, de façon à pouvoir calculer les quantités précédentes avec un seuil minimal de surface (ex. surface de trouées de plus de x ha).

Les objectifs du stage étaient

- (1) d'évaluer la possibilité de reconstituer l'historique des trouées et d'obtenir ces informations par l'analyse d'une série temporelle de photographies aériennes, et
- (2) de proposer une méthode d'analyse facilement transposable aux autres sites. Pour cette étude, des photographies aériennes au format numérique acquises à différentes dates (1949, 1961, 1987, 2000 et 2003) ont été commandées auprès de l'IGN.

Nous allons d'abord présenter une synthèse bibliographique qui nous a permis de préciser les notions de trouées et d'identifier des pistes pour l'analyse de notre série temporelle de photographies aériennes. Puis nous présenterons les trois approches retenues pour l'analyse des photographies :

- une méthode basée sur l'analyse du modèle numérique de hauteur calculé par photogrammétrie (utilisation de couples de photographies avec recouvrement) ;

- une méthode de classification automatique basée sur les informations radiométriques et texturales des photographies numériques (sans stéréoscopie);
- une méthode de classification automatique basée à la fois sur les informations de l'image et sur le modèle numérique de hauteur.

Les différents protocoles seront ensuite comparés et nous tenterons de déterminer quel protocole semble le plus performant. Nous proposerons également une méthode reproductible à plus large échelle que celle de l'étude présentée ici.

# Chapitre 1 : La cartographie des trouées forestières - Synthèse bibliographique

## 1. Intérêt de la cartographie des trouées forestières

### 1.1. Rôle des trouées dans les écosystèmes forestiers

En forêt tempérée, les trouées formées par la mort d'un ou plusieurs arbres sont un mode de perturbation majeur, et permettent la régénération des essences forestières (Runkle 1982, Tanaka et Nakashizuka, 1997). La taille des trouées est un facteur crucial pour des essences ayant différents degrés de tolérance à l'ombre, déterminant ainsi la composition du peuplement en essences forestières : les espèces sciaphiles se plairont dans les petites trouées alors que les héliophiles se développeront dans les grandes trouées (Fujita et al., 2003). De plus, les trouées peuvent abriter une faune et une flore spécifiques (champignons et insectes saproxyliques, oiseaux se nourrissant des insectes, etc.), qui sont souvent exclues des peuplements gérés car le bois mort est généralement évacué.

Il est donc important de suivre ces perturbations, afin d'avoir une meilleure connaissance du fonctionnement des écosystèmes forestiers, et de la biodiversité qu'ils sont susceptibles d'abriter.

### 1.2. Notions de trouées : différents types

Intuitivement, on définit une trouée comme étant un trou dans une forêt, une interruption du couvert forestier dans un paysage boisé. La trouée est également définie par des critères de forme, de surface, de pourcentage de couvert végétal, de hauteur de végétation (hauteur absolue ou relative), de dynamique de fermeture... à adapter à chaque contexte d'étude. Selon la dynamique de perturbation étudiée, on ne s'intéressera pas aux mêmes tailles de trouées : celles-ci seront très petites dans l'étude de la dynamique en forêt naturelle tropicale, où la chute d'un arbre définira une trouée ; les trouées seront de taille bien plus importante dans les études

portant sur les dynamiques de perturbation par le feu, les tempêtes ou encore les perturbations anthropiques (coupes de régénération).

Les définitions des trouées sont nombreuses, il existe quasiment autant de définitions que de programmes de recherches sur le sujet. On distingue ainsi les définitions tenant compte du peuplement adjacent de celles tenant compte de la dynamique temporelle, et les définitions prévues pour identifier les trouées à partir d'inventaires terrain de celles prévues pour l'identification à partir de données de télédétection.

Le tableau I présente les différentes définitions trouvées dans la littérature étudiée. Une des définitions les plus simples et qui peut s'appliquer à tous les types de forêts est celle proposée par Brokaw : « *un trou dans la forêt à travers tous les étages jusqu'à 2m au-dessus du sol* » (Brokaw, 1982), ou encore celle utilisée par Barden : « [une trouée est une] *ouverture dans la strate de la canopée formée par la mort d'un seul arbre, d'une partie d'un arbre, ou de plusieurs arbres dans un groupe* » (Barden, 1989). En 1992, Runkle donne sa propre définition de la trouée, reprenant en partie la définition de Barden : une trouée est « *formée par la mort (absence de la canopée) d'au moins la moitié d'un arbre* », avec une surface maximale de 10 arbres morts, ou un ratio « *hauteur de la canopée / diamètre de la trouée égal à 1* » (Runkle, 1992).

Cependant, ces définitions sont encore trop générales pour être précises, il manque des critères permettant de différencier une trouée d'une clairière, ou d'une route se situant en forêt par exemple. Une trouée est en effet définie également par une dimension temporelle : une trouée va se refermer après un certain temps, et laisser place à de nouveaux arbres, qui vont remplacer ceux qui sont tombés et ont permis la création de la trouée. Il a fallu poser des limites permettant de définir quand une trouée s'ouvre, mais aussi et surtout quand on considère qu'une trouée s'est refermée.

Ainsi, en 1997, une équipe de chercheurs japonais étudiant les trouées en forêt tempérée définit une trouée comme étant un endroit de la forêt où « *la canopée n'excède pas 15m de hauteur* » (Tanaka et Nakashizuka, 1997), ce critère de hauteur étant une façon de visualiser le temps mis par les arbres pour repousser après une perturbation. Cette méthode leur a permis de cartographier des trouées de grande taille (supérieures à 100 m<sup>2</sup>), nombreuses dans ces forêts perturbées essentiellement par les typhons. Faute de données temporelles précises,

Publication			Définition de la trouée			
Auteur(s)	Année	Titre	Citation	Hauteur	Surface	Précisions
<b>Brokaw</b>	<b>1982</b>	The Definition of Treefall Gap and Its Effect on Measures of Forest Dynamics	"trou dans la forêt à travers tous les étages jusqu'à 2m au dessus du sol"	2m et au-delà	NP	bords irréguliers en réalité, mais pour avoir une définition exploitable, on considère qu'ils sont verticaux
<b>Barden</b>	<b>1989</b>	Repeatability in Forest Gap Research: Studies in the Great Smoky Mountains	"ouverture dans la strate de la canopée formée par la mort d'un seul arbre, d'une partie d'un arbre, ou de plusieurs arbres dans un groupe"	NP	NP	
<b>Runkle</b>	<b>1992</b>	Guidelines and sample protocol for sampling forest gaps.	"formée par la mort (absence de la canopée) d'au moins la moitié d'un arbre."	NP	10 arbres, avec "un ratio hauteur de la canopée / diamètre de la trouée égal à 1"	
<b>Tanaka et Nakashizuka</b>	<b>1997</b>	Fifteen years of canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest, Japan	"gaps as areas without a canopy higher than 15m"	canopée inférieure à 15m	inférieure à 1 000 m <sup>2</sup>	
<b>Fujita et al</b>	<b>2003</b>	Long-Term Canopy Dynamics Analysed by Aerial Photographs in a Temperate Old-Growth Evergreen Broad-Leaved Forest	"gaps are areas where the canopy was no more than 15m from the ground"	canopée inférieure à 15m	(mini) 6,25 m <sup>2</sup>	
<b>Zeibig et al</b>	<b>2005</b>	Gap disturbance patterns of a Fagus sylvatica virgin forest remnant in the mountain vegetation belt of Slovenia	"trou créé par la chute d'un ou plusieurs arbres de la canopée"	1/2 de la hauteur moyenne de la canopée	(mini) 6m <sup>2</sup>	
<b>Vepakomma et al</b>	<b>2007</b>	Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal lidar data	"ouverture dans la canopée causée par la chute d'un seul ou d'un groupe d'arbres d'une certaine hauteur"	5 m : en-dessous c'est une trouée, au-dessus la canopée est fermée	NP	"la lisière de la trouée est définie comme la projection verticale de la canopée des arbres adjacents à la trouée"

Tableau I. Différentes définitions des trouées. NP = Non Précisé

ce critère de hauteur est souvent utilisé dans les études sur les trouées, car lorsqu'on connaît le rythme de croissance des arbres dans les forêts étudiées, il n'est pas difficile d'estimer l'âge des trouées connaissant la taille des arbres qui sont en train de la coloniser.

## **2. Différentes approches de cartographie des trouées**

Dans la littérature, on trouve deux grandes familles de méthodes utilisées pour cartographier les trouées : la cartographie par transects sur le terrain et à partir de données de télédétection. Selon la définition de la trouée qui sera retenue, la méthode de cartographie pourra varier.

### **2.1 Cartographie par transects sur le terrain**

Les approches permettant de caractériser des micro-habitats et basées sur des transects parcourus sur le terrain comportent des critères faciles à mesurer pour un opérateur terrestre, comme la hauteur des arbres, leur diamètre, la direction dans laquelle ils sont tombés, etc. On peut prendre en compte des éléments tels que l'âge des trouées, car en effectuant des inventaires régulièrement, on peut savoir depuis combien de temps les arbres sont tombés. De même, la mesure de la pente, de l'exposition, la caractérisation du sol et du peuplement adjacent (essences, hauteurs, diamètres), l'ouverture de la trouée ou encore la végétation en train de coloniser la trouée peuvent être notées lorsque l'on est sur le terrain. La taille des trouées est souvent mesurée approximativement, en considérant la trouée comme une ellipse, et en mesurant deux diamètres perpendiculaires (Runkle 1982, Zeibig et al. 2005).

### **2.2 Cartographie à partir de données de télédétection**

Une autre approche qui s'est développée avec l'évolution des technologies, aussi bien dans le domaine de l'acquisition de données images (photographies aériennes puis images satellitaires), que dans celui des traitements et de l'analyse de ces images (logiciels de plus en plus performants, augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs) est la cartographie à partir de données de télédétection.

Plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre : l'analyse d'images, qui prend en compte uniquement la radiométrie et la texture des images, et les méthodes d'analyse utilisant des

modèles numériques de hauteurs (Modèles Numériques de Surface et/ou de Canopée). Le tableau II présente une synthèse des différents types de photos aériennes utilisées par ces études.

### 2.2.1 Méthodes d'analyses d'images

L'analyse par photo-interprétation prenant en compte uniquement la radiométrie et la texture des images peut se faire en analysant visuellement les peuplements selon des transects ou des grilles de points tracés sur les images, comme celle utilisée par Fensham et al. (2002, 2007). Elle consiste, sur une photo recouverte d'une grille de points, à répartir les points de la grille en trois catégories : arbre, buisson ou sol. L'analyse peut également être automatisée, en utilisant des logiciels d'analyse d'images orientés objet, du type Définiens™. Ces logiciels permettent de classer l'image en différentes catégories et ainsi de déterminer quelles zones sont des trouées.

Dès 1983, Murtha mettait en évidence, dans son étude portant sur l'identification des dégâts dans des plantations de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb) par photo-interprétation, que l'échelle de la photo était importante pour une analyse précise. En effet, en comparant des photos à différentes échelles (1 : 1 000 et 1 : 4 000), il ressort que l'échelle la plus grande est la plus efficace pour dénombrer les arbres morts, défeuillés ou rougissant, alors que l'échelle la plus petite (1 : 4 000) ne permet d'identifier que les arbres morts. En 1984, une étude semblable analysait la mortalité dans des plantations d'épinette blanche (*Picea glauca* Moench) en Amérique du Nord (Morse et al., 1984). Une étude semblable menée par Zeibig, Diaci et Wagner (2005) se base à la fois sur un inventaire terrain et sur une analyse de photos aériennes de 1998 en noir et blanc, ayant une échelle de 1 : 17 500. La comparaison des deux protocoles avait pour but de voir si les photos aériennes permettaient une analyse suffisamment fine pour remplacer l'approche terrain, plus longue et plus coûteuse.

Publication			Photos utilisées		
Auteur(s)	Année	Titre	Année de prise de vue	Emulsion	Echelle
Tanaka et Nakashizuka	1997	Fifteen years of canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest, Japan	1976	NP	1:20 000
			1981	NP	1:16 000
			1986	NP	1:16 000
			1991	NP	1: 8 000
Fujita et al.	2003	Long-Term Canopy Dynamics Analysed by Aerial Photographs in a Temperate Old-Growth Evergreen Broad-Leaved Forest	1966	NP	1:20 000
			1983	NP	1:20 000
			1993	NP	1:20 000
			1998	NP	1:8 000
Fensham et al.	2002	Quantitative assessment of vegetation structural attributes from aerial photography	NP	NP	1:25 000
			NP	NP	1:40 000
Fensham et Fairfax	2007	Effect of photoscale, interpreter bias and land type on woody crown-cover estimates from aerial photography	2004	Couleur	1:25 000
			2004	Couleur	1:40 000
			2004	Couleur	1:50 000
			2004	Couleur	1:80 000
Zeibig et al.	2005	Gap disturbance patterns of a Fagus sylvatica virgin forest remnant in the mountain vegetation belt of Slovenia	1998	Noir et blanc	1:17 500
Murtha	1983	Some air-photo scale effects on Douglas-Fir damage type interpretation	1979	Infrarouge Couleur	1:1 000
			1979	Infrarouge Couleur	1: 4 000
Morse	1984	Plantation white spruce mortality : estimates based on aerial photography and analysis using a life-table format	1981	Couleur	1: 9 600
Publication			Données lidar		
Auteur(s)	Année	Titre	Année d'acquisition	Modèle de lidar	Altitude
Vepakomma et al	2007	Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal lidar data	1998	Optech ALTM1020	700 m
			2003	Optech ALTM2050	1000 m

Tableau II. Synthèse des types de photos aériennes utilisées par les différentes études. NP = Non Précisé.

Dans cette étude, une trouée était définie comme étant « *un trou créé par la chute d'un ou plusieurs arbres de la canopée* », et il était stipulé que la hauteur de la trouée était de « *la moitié de la hauteur moyenne de la canopée* », prenant ainsi en compte le peuplement adjacent et permettant d'être plus proche de la réalité du terrain. La surface minimale prise en compte dans l'étude de 2005 était de 6m<sup>2</sup>, mais l'étude a montré que par analyse des photos aériennes seules 13 trouées étaient identifiées sur les 49 inventoriées sur le terrain, les trouées d'une surface inférieures à 100 m<sup>2</sup> n'étant pas reconnues. Ces deux études montrent que l'échelle des photographies doit être choisie en fonction de la taille minimale des trouées que l'on cherche à identifier.

### **2.2.2 Méthodes d'analyses de hauteurs**

Les méthodes utilisant des modèles numériques de hauteur sont toujours assistées par ordinateur, pour le calcul de ces modèles en particulier. Il existe deux façons d'accéder aux hauteurs des arbres : par photogrammétrie, c'est-à-dire en extrayant l'information de couples de photographies permettant d'avoir le relief des objets, ou par mesures réalisées grâce au Lidar (Light Detection and Ranging ou laser terrestre aéroporté).

L'utilisation de couples de photographies aériennes permet d'obtenir des modèles numériques de surface, dont on dérive des modèles numériques de canopée par soustraction d'un modèle numérique de terrain. Ces modèles numériques de canopée donnent la hauteur des arbres en tout point de la zone d'étude. Cela permet de visualiser les endroits de la forêt où les arbres sont absents, ou moins hauts que le peuplement environnant, ce qui permet de délimiter les trouées plus précisément que depuis le sol. Ainsi, en prenant un seuil de hauteur au-dessous duquel on considère que l'on est en présence d'une trouée, et au-dessus duquel on considère que la trouée est refermée, on obtient une carte des trouées potentielles. Une trouée sera considérée comme étant une vraie trouée si elle se referme au cours du temps, dans le cas contraire ce sera une trouée permanente, et ne sera pas prise en compte pour l'étude. En croisant plusieurs cartes, on peut retracer la dynamique d'un peuplement forestier. En 1997, l'équipe de Tanaka et Nakashizuka analyse la dynamique forestière sur une période de quinze ans grâce à des photos aériennes, en générant des modèles numériques de canopée par photogrammétrie (Tanaka et Nakashizuka, 1977). En 2003, Fujita et ses collaborateurs ont pu suivre l'évolution des trouées sur une période de 32 ans en utilisant sensiblement la même méthode (Fujita et al, 2003).

L'utilisation de données acquises par Lidar aéroporté pour les applications forestières est assez récente (années 2000). Dans une étude basée sur l'analyse de MNC dérivés de données Lidar, Vepakomma et al. ont considéré une trouée comme étant une « *ouverture dans la canopée causée par la chute d'un seul ou d'un groupe d'arbres d'une certaine hauteur* », en prenant une hauteur-seuil de 5 m : au-dessus de ce seuil le peuplement est considéré comme fermé, au-dessous on est en présence d'une trouée (Vepakomma et al, 2007). La détection des trouées se fait toujours sur le principe d'une valeur-seuil, mais la génération des modèles numériques de canopée est basée sur l'interpolation des mesures lidar en tout point du MNC.

### **3. Avantages et inconvénients des deux types d'approches**

#### **3.1 Méthodes d'inventaires sur le terrain**

Les méthodes d'inventaire terrain des trouées sont assez simples à mettre en œuvre, mais elles sont longues. Elles consistent le plus souvent à parcourir des transects sur le terrain et à noter les endroits où les arbres sont tombés, afin de reporter ensuite ces mesures sur une carte et avoir une cartographie des trouées. Elles permettent de recueillir des informations impossibles à obtenir à partir de photos aériennes, comme par exemple la nature de la végétation en train de coloniser la trouée, les caractéristiques du sol...

Cependant, même si elles ne demandent pas de connaissances théoriques particulières, ces méthodes ne sont pas forcément très précises, car la taille des trouées est le plus souvent approximée par une ellipse, et il est parfois difficile pour l'opérateur de savoir quels arbres entrent ou non dans la trouée lorsqu'on a pris un seuil de hauteur pour différencier les peuplements des trouées. En revanche, elles permettent d'inventorier les trouées de faible taille qui sont plus difficilement détectées par analyse d'images. Cependant, la délimitation de la trouée est assez imprécise, du fait qu'il est difficile, sur le terrain, de déterminer si un arbre de taille moyenne entre dans la catégorie « trouée » ou dans le peuplement fermé. De plus, il n'est généralement possible de cartographier que de petites trouées, car au-delà d'une certaine surface, il est facile de prendre une trouée de grande taille pour plusieurs trouées de petite taille proches les unes des autres.

### 3.2 Analyse de photos aériennes

Différentes études utilisant les principes de la télédétection, automatisée ou non, ont été menées, en particulier en France, ce qui permet d'avoir un certain recul par rapport aux méthodes ainsi qu'un retour d'expérience. En 2001, une publication portant sur l'identification des différents types de châtaigneraies en France (Bonin, 2001) met en évidence les possibilités offertes par l'analyse des photos aériennes pour l'identification automatique d'objets, mais aussi les limites inhérentes aux photographies et à la méthode : problèmes d'ombres, choix des dates de prises de vues, difficultés d'identification fine des essences...

Ainsi, selon les caractéristiques utilisées pour définir la trouée, l'identification sur photos aériennes ne sera pas toujours possible. En effet, certaines informations ne sont pas contenues dans les images, ou sont difficiles à extraire, comme la nature du sol sous le peuplement forestier par exemple. Il faut donc d'une part choisir des critères pour définir les trouées potentiellement accessibles par télédétection, et d'autre part choisir les images contenant les informations nécessaires et les méthodes permettant d'extraire cette information.

Beaucoup d'auteurs s'accordent pour dire que la méthode à utiliser en télédétection dépendra du type et de la qualité des images disponibles, et, pour les méthodes automatisées, de la quantité de prétraitements nécessaires avant toute analyse de l'image à proprement parler (Boureau et Deshayes, 1999 ; Robbez-Masson et al., 2001). Le temps de traitement va dépendre de la taille des images, et donc de leur résolution et de la méthode de traitement choisie. Cependant le critère temps est de moins en moins un facteur limitant en raison de la puissance des ordinateurs disponibles à ce jour. Ainsi, alors qu'en 2001 il fallait jusqu'à 10h pour réaliser une classification orientée objet sur une zone de 10 ha (Bonin, 2001), aujourd'hui les progrès effectués dans le matériel sont tels qu'il faut environ 30 min pour réaliser une segmentation et une classification sur une zone de plusieurs dizaines d'hectares. Les temps de traitement sont certainement amenés à diminuer dans le futur grâce aux progrès faits au niveau de la puissance des processeurs.

Un autre problème propre aux images est la différence de radiométrie qu'il peut y avoir entre deux images de la même campagne, ou encore la présence d'un gradient de luminosité sur les images. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour résoudre ces problèmes, par exemple certaines méthodes empiriques ont fait leurs preuves pour corriger le gradient de brillance sur des images (Kennedy et al., 1997). En classant les pixels de l'image en différents niveaux de

brillance et en appliquant une correction adaptée à chaque niveau, les corrections se sont révélées plus performantes, plus précises, que des modèles de correction appliqués aux images entières non classées.

Avec l'essor des SIG ces dernières années, il est de plus en plus aisé de valoriser les photos aériennes orthorectifiées, qui servent de données de base pour remplir certaines missions de divers organismes (Muraz et al, 1999). De plus, les études de Murtha et Morse ont montré qu'une analyse manuelle des images donne de bons résultats (Murtha 1983, Morse, 1984), ce que les études postérieures plus automatisées (Boureau et Deshayes 1999, Bonin 2001) ont confirmé : l'analyse de peuplements forestiers par images aériennes (photographies aériennes ou images satellitales) offre des indications fiables pour un coût modéré, en comparaison des études ne comprenant que du terrain.

#### **4. Choix méthodologiques pour l'étude GNB.**

Dans un premier temps nous avons arrêté une définition de la trouée qui convienne à la problématique du projet GNB tout en permettant d'envisager une identification de ces trouées à partir des données de télédétection disponibles pour l'étude, avec les logiciels disponibles et dans le temps imparti. Une fois une définition de la trouée arrêtée, nous nous sommes penchés sur les méthodes d'analyse des images à utiliser.

Nous avons décidé de tester et comparer trois approches différentes :

- Analyse de hauteurs d'arbres (Modèles Numériques de Canopée ou MNC) ;
- Classification orientée objet, basée sur l'analyse de la radiométrie et de la texture des photographies aériennes orthorectifiées;
- Analyse par classification orientée objet intégrant l'information radiométrique et texturale de l'image et l'information sur les hauteurs d'arbres (MNC)

Parmi les approches proposées dans la littérature, celle présentée par Fujita et al. (2003) a servi de référence pour l'analyse de hauteurs d'arbres (MNC). La problématique de cette étude se rapprochait de la nôtre. Les caractéristiques de la forêt sont sensiblement les mêmes que celles des forêts en France, exception faites des essences typiquement asiatiques (*Castanopsis cuspidata*, Distyle à grappes *Distylium racemosum* et Chêne vert du Japon *Quercus acuta*) citées dans l'étude. Les principales étapes en sont :

- création d'un Modèle Numérique de Surface (MNS) par photogrammétrie à partir des photos aériennes numériques
- calcul d'un Modèle Numérique de Canopée (MNC) par différence entre le MNS et un Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour avoir la hauteur de la végétation en chaque point de la grille
- cartographie des trouées potentielles, par analyse des hauteurs des MNC
- suivi des trouées par comparaison des cartes obtenues à différentes dates.

Le Modèle Numérique de Terrain sera obtenu par photogrammétrie à partir des photos d'hiver de la zone d'étude. Cette méthode a déjà été appliquée avec succès par Tanaka et Nakashizuka (1997).

La classification orientée objet permet d'analyser automatiquement les orthophotographies obtenues par correction géométrique des photos numériques. La méthode développée dans le cadre de ce stage est basée sur un travail réalisé par Roberto Meloni, ingénieur d'étude du Cemagref basé à la Maison de la Télédétection, et qui visait à cartographier les zones de bocages à partir d'orthophotos en infra-rouge couleur (IRC). Les règles de classification ont été reprises et adaptées à notre cas d'étude.

Aucune publication concernant l'apport du couplage de l'information contenue dans les orthoimages (texture et radiométrie) et des informations sur la hauteur des arbres n'a pu être trouvée durant nos recherches. Un des objectifs du stage sera donc de voir si ce couplage améliore les résultats de la classification orientée objet.

Le but de notre étude est de voir si l'identification et le suivi des trouées peuvent se faire de manière automatique ou semi-automatique. Les résultats permettront de définir quel protocole est le plus efficace pour le suivi des trouées, et ainsi de définir un protocole applicable à différentes forêts en France, aussi bien en plaine qu'en montagne.

Ces différentes approches nécessitant de calculer des MNS et d'orthorectifier des images, les principes de base de la photogrammétrie vont tout d'abord être présentés.

## Chapitre 2 : Photogrammétrie : principes de base.

La photogrammétrie est une technique qui consiste à effectuer des mesures spatiales dans une scène, en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents pour reconstituer le relief des objets. Recopiant la vision stéréoscopique humaine, elle a longtemps exploité celle-ci pour reconstituer le relief de la scène à partir de cette différence de points de vue. Actuellement, elle exploite de plus en plus les calculs de corrélation entre des images désormais numériques. Cette technique repose entièrement sur une modélisation rigoureuse de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D exacte de la réalité (source : Wikipédia, [www.fr.wikipedia.org](http://www.fr.wikipedia.org)).

Cette technique peut être utilisée pour orthorectifier des images, mais aussi pour le calcul de Modèles Numériques de Surface.

### 1. Principes de base

Une photographie aérienne brute présente plusieurs types de déformations qui font qu'elle n'est pas directement superposable à une carte topographique. Ces déformations ont plusieurs origines :

- Déformations dues à la position de prise de vue. Lors de prises de vue aériennes, l'avion n'est jamais parfaitement droit, et présente trois principaux facteurs de déformation des images. Le roulis (R) est l'oscillation de l'avion par rapport à l'axe de vol (balancement vers la gauche ou la droite), tandis que le tangage (T) représente un mouvement le long d'un axe transversal (balancement vers l'avant ou l'arrière). Le lacet (L), représente un mouvement autour d'un axe vertical et traduit le fait que la trajectoire de l'avion n'est pas parfaitement rectiligne. Ces trois paramètres conduisent à une visée oblique, une variation de l'échelle sur la photographie (tangage et roulis) et une variation de l'orientation de la photographie (lacet).
- Distorsions dues au terrain : le sol n'est jamais parfaitement plat, que ce soit en l'absence de relief en raison de la rotondité de la terre, ou en présence de relief. La correction des distorsions causées par le relief implique de connaître les altitudes de chaque point, et donc de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) ou d'un Modèle Numérique de Surface (MNS) relatif à la zone considérée.

- Déformations liées à l'appareil photographique. Les défauts des lentilles des objectifs et de planéité du négatif introduisent des distorsions optiques. Les distorsions radiales peuvent être partiellement corrigées si l'on dispose de la fiche d'étalonnage de l'appareil. Lorsque l'acquisition des photographies aériennes est réalisée au moyen de caméras métriques, ces distorsions restent très faibles par rapport aux précédentes (d'après Muraz et al, 1999).

La modélisation de la géométrie des images et de leur acquisition comprend deux étapes :

- l'orientation interne, c'est-à-dire la prise en compte de la géométrie interne du capteur : distance focale, coordonnées du point principal, coordonnées des marques fiduciaires, distorsion radiale de l'objectif. Ces informations sont fournies sur le certificat de calibrage de la caméra (voir en annexe A).
- l'orientation externe, c'est-à-dire le calcul de la position exacte du centre de perspective de la photo (X, Y, Z) et des angles de roulis, tangage et lacet ( $\omega, \phi, \kappa$ )

En pratique, les images sont chargées dans un premier temps dans un logiciel d'orthorectification, et les paramètres d'orientation interne de la caméra sont entrés. Une fois cela fait, il faut placer des points afin de lier les images entre elles : les points de liaison ou *tie points*. Un *tie point* est un point localisable précisément sur au moins deux images ; ses coordonnées terrain n'ont pas besoin d'être connues. Contrairement aux points de calage « terrain », parfois longs à localiser sur l'image, les points de liaison s'identifient facilement. Il suffit en effet de localiser un même objet sur plusieurs photographies souvent acquises presque au même moment (d'après Muraz et al, 1999).

Une fois les points de liaison entre les images placés, il faut placer des points de calage « terrain », appelés points d'amer ou *Ground Control Points* (GCP). Ces points doivent être repérables sur le terrain ou sur une représentation cartographique du terrain et sur la photographie. On utilise souvent une intersection de routes, l'angle d'un bâtiment... Ces points de calage possèdent des coordonnées (X, Y, Z) et sont utilisés, avec les points de liaison, pour calculer l'orientation externe de la caméra.

Lorsque l'on connaît les paramètres d'orientation interne (fiches de calibration et calage des images grâce à leurs marques fiduciaires) et d'orientation externe (calculée grâce aux points de liaison et de contrôle), on dispose de toutes les informations nécessaires pour :

- soit calculer un MNS : pour un même point sur deux images, l'erreur de parallaxe permet d'estimer son altitude

- soit rectifier l'image à partir d'une élévation connue : on en déduit l'erreur de parallaxe qui sert à replacer le point de l'image au bon endroit.

## 2. Calcul de MNS

Les photographies d'une même campagne permettent de générer un MNS qui servira ensuite pour leur orthorectification. En effet, la vision d'un même point sur deux photos aériennes successives et donc sous deux angles différents permet de reconstituer la vision stéréoscopique et donc de déduire la hauteur de l'objet étudié, comme le montre la figure 2.

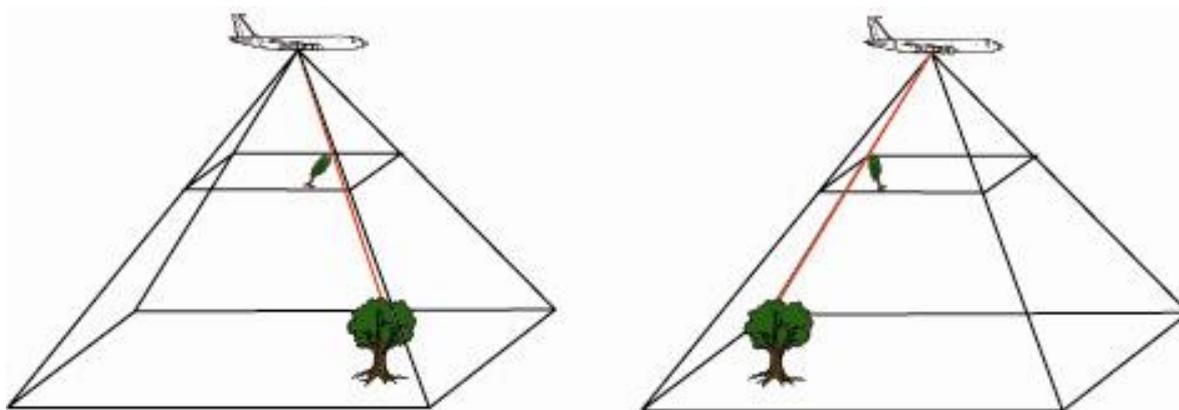


Figure 2. Principe de la stéréoscopie (d'après <http://seig.ensg.ign.fr> )

Connaissant les paramètres de l'orientation interne et externe d'un couple d'images, le calcul de l'altitude de points homologues, identifiés par la corrélation des images, peut alors se faire. Sur la base de ces points le logiciel est ensuite capable de générer par interpolation un MNS au format raster qui couvrira la zone commune aux deux images.

Dans notre étude les MNS calculés seront utilisés comme donnée de base, à la fois pour l'orthorectification des images et pour le calcul de Modèles Numériques de Canopée.

## 3. Orthorectification : de la photo aérienne à l'image superposable à un plan

L'orthorectification d'une photographie consiste à la recalculer spatialement pour la replacer dans une géométrie de projection choisie (dans notre cas, la projection utilisée est le Lambert 2 étendu) et la rendre ainsi superposable en tous points à une carte.

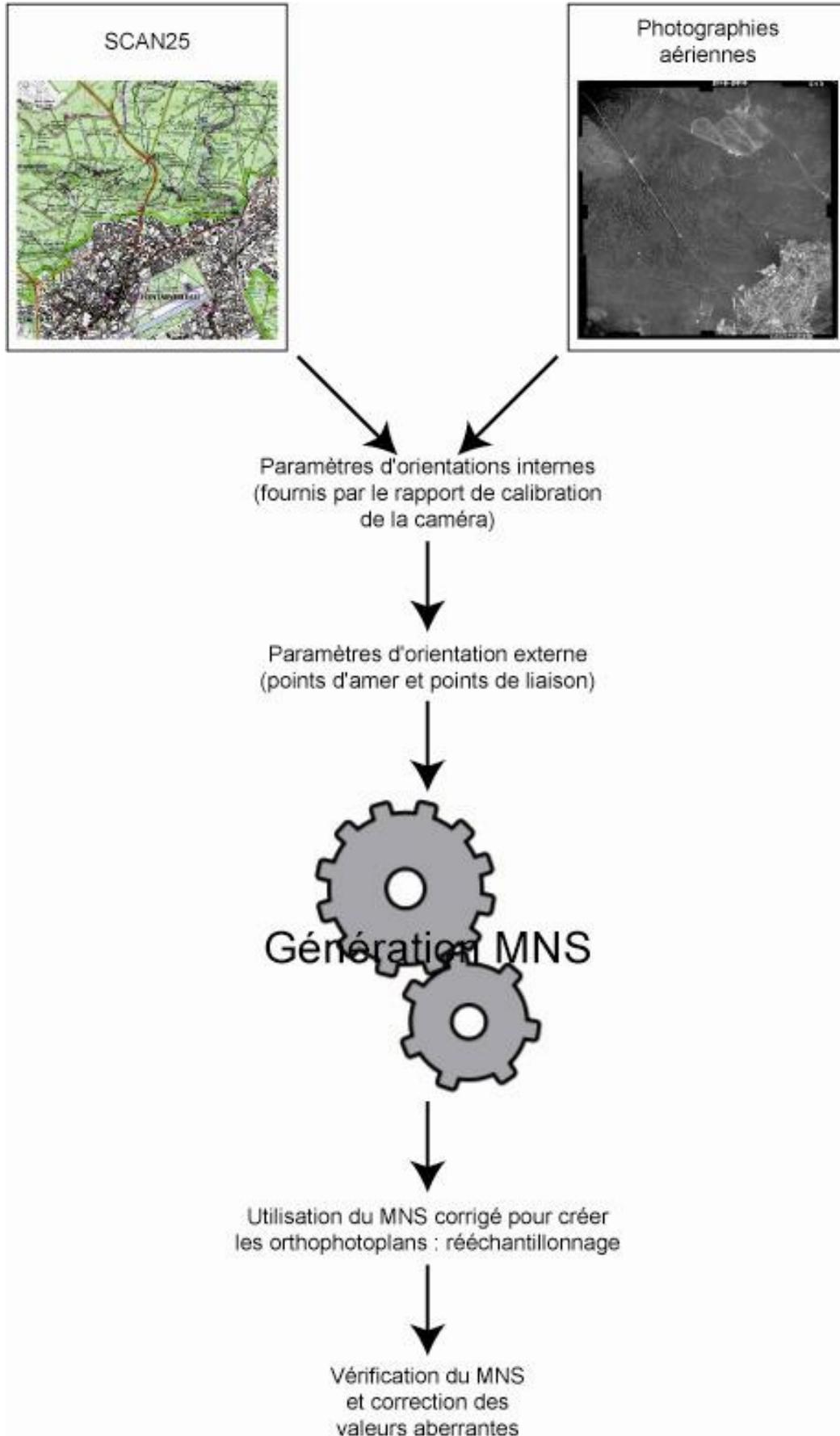


Figure 1. Processus d'orthorectification.

Les déformations dues au relief sont corrigées à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) ou d'un Modèle Numérique de Surface (MNS). Les valeurs radiométriques en chaque point de l'image corrigée sont calculées lors de la phase de ré-échantillonnage. Pour chaque point de cette image, l'altitude indiquée par le MNT ou le MNS permet de calculer l'erreur de parallaxe en utilisant le modèle décrivant la géométrie de l'acquisition. La position du point dans l'image d'origine est ainsi retrouvée et sa valeur radiométrique attribuée au pixel correspondant dans l'image corrigée.

Chaque pixel est alors localisé dans un référentiel cartographique. Les images sont désormais orthorectifiées et superposables à un plan. Les photographies orthorectifiées sont alors raccordables, permettant ainsi la réalisation d'une mosaïque. Le résultat pourra alors être utilisé au sein d'un Système d'Information Géographique (d'après Muraz et al, 1999).

On a besoin d'indications de hauteur pour orthorectifier des images, mais celles-ci peuvent être obtenues de plusieurs manières. L'orthorectification peut ainsi se faire soit à l'aide d'un MNT, soit à l'aide d'un MNS (plus précis car l'altitude correspond vraiment aux points de l'image), selon les données dont on dispose et la précision que l'on souhaite obtenir. Il est préférable d'utiliser un modèle numérique avec une résolution comparable à celle des images à rectifier.

## Chapitre 3 : Matériel et méthodes

Dans un premier temps, la zone d'étude sera décrite, puis une définition des trouées adaptée à la problématique sera présentée, et enfin les trois protocoles mis en place seront détaillés. L'analyse de photographies aériennes afin d'identifier les trouées et de réaliser un suivi temporel se fait en plusieurs étapes, un certain nombre de pré-traitements étant nécessaires pour produire les données qui seront ensuite analysées.

### 1. Zone d'étude, données et logiciels disponibles

#### 1.1. Zone d'étude

La zone d'étude est située en Forêt Domaniale de Fontainebleau (77), une carte de situation se trouve en annexe C. Dans le cadre du projet Gestion, Naturalité, Biodiversité (GNB), 29 placettes d'études ont été mises en place, en forêt exploitée et en Réserve Biologique Intégrale, sous contrôle stationnel. Les peuplements étudiés sont composés de chênes (*Quercus robur* L. et *Quercus petraea* Liebl.) et de hêtres (*Fagus sylvatica* L.).

Des suivis faunistiques et floristiques sont réalisés sur ces placettes depuis 2008. La particularité des RBI de Fontainebleau est qu'elles sont parmi les plus vieilles de France, car dès 1861 des parcelles étaient classées « réserves artistiques » par Napoléon III à la demande des peintres de Barbizon, qui trouvaient dans les vieux arbres de Fontainebleau l'inspiration pour leurs toiles. Ainsi, certaines des RBI du massif de Fontainebleau n'ont pas été exploitées par l'homme depuis au moins 150 ans, permettant à la partie de la biodiversité « native » sensible à l'exploitation forestière de se réinstaller ou de persister dans de meilleures conditions. La comparaison avec les parcelles exploitées n'en est que plus intéressante.

Les zones d'études de la dynamique des perturbations sont des zones circulaires centrées sur les placettes, car le suivi effectué depuis 2008 permet d'avoir une bonne connaissance de la biodiversité sur ces sites, et le but de ce volet de l'étude sera de voir s'il y a un lien entre la biodiversité et la présence de trouées aux alentours des placettes.

## 1.2. Données à disposition

Les données sur lesquelles a porté l'étude sont différentes campagnes de photographies aériennes commandées pour l'étude: 1949, 1961, 1987, 2000 (hiver), 2000 (été) et 2003, ainsi que les fiches de calibration associées aux photos. À l'exception de la campagne d'été de 2000 qui a été commandée à l'Inventaire Forestier National, toutes les photographies proviennent de l'IGN. Un récapitulatif des caractéristiques des photos est présenté dans le tableau III.

Campagne (année)	Fournisseur	Emulsion	Format
1949	IGN	NB	argentique
1961	IGN	NB	argentique
1987	IGN	Couleur	argentique
2000 (hiver)	IGN	NB	argentique
2000 (été)	IFN	IRC	argentique
2003	IGN	Couleur	numérique

**Tableau III. Caractéristiques des photographies aériennes utilisées.**  
**NB : noir et blanc, IRC : infrarouge couleur**

Les données de référence utilisées pour l'étude comprennent la Bd Ortho© (orthophotographies de la zone d'étude en format numérique), le Scan 25© (carte IGN au 1 : 25 000 sous format numérique), le Modèle Numérique de Terrain de la Forêt Domaniale de Fontainebleau de l'IGN (résolution : 50 m) ainsi que les relevés terrain réalisés pendant le stage et servant à la validation des MNC. Les relevés terrain consistent à mesurer la hauteur des arbres dominants à intervalles régulièrement répartis le long de transects définis à l'avance, et relever les coordonnées géographiques de chaque mesure à l'aide d'un GPS à chaque mesure afin de pouvoir les comparer aux MNC obtenus par traitement des données de télédétection. De plus, des points GPS seront pris dans les trouées visibles sur le terrain, ainsi que la hauteur des arbres s'y trouvant le cas échéant. Ces trouées sont des trouées ouvertes récemment, dont les arbres n'excèdent pas 10m de hauteur, car ce sont les plus facilement identifiables.

Ces données de référence seront utilisées pour orthorectifier nos photos aériennes, et pour vérifier la qualité de nos traitements.

### 1.3. Logiciels utilisés

Différents logiciels de cartographie et de traitement d'images ont été utilisés, voici un bref aperçu des possibilités de chacun.

#### 1.3.1. ArcGIS 9.2™ (©ESRI, 1998-2009)

ArcGIS™ est un logiciel de Système d'Information Géographique, qui est un outil informatique permettant la représentation et l'analyse de données spatiales et temporelles (source : Site d'ESRI France, [www.esrifrance.fr](http://www.esrifrance.fr)). Il permet donc de réaliser des cartes, mais aussi d'analyser des bases de données géolocalisées.

Il a été utilisé pour visualiser l'emplacement des parcelles dans le massif, générer les zones tampons (buffers) circulaires autour des placettes, délimitant ainsi des zones d'étude de 10 à 400 ha, réaliser des cartes de travail et calculer les surfaces de trouées autour de chaque placette.

#### 1.3.2. ERDAS Imagine 9.2™ (©Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC, 1991-2008)

ERDAS Imagine 9.2™ est un logiciel de traitement d'images et de télédétection.

Le module Leica Photogrammetry Suite 9.2™ (LPS) a permis de générer les MNS et d'orthorectifier les photos aériennes pour chaque campagne d'étude.

Le Modeler, présent dans la version de base du logiciel, est l'outil qui a été utilisé pour faire de nombreux traitements sur les images. Il se présente sous la forme d'une interface graphique où l'on dessine des « boîtes » dans lesquelles on entrera le chemin des fichiers à traiter, ainsi que les traitements et formules mathématiques à appliquer à ces fichiers, et les fichiers de sortie et leur emplacement. Pour personnaliser de façon plus poussée les paramètres, on peut aussi générer des scripts que l'on modifiera ensuite selon les besoins. Un exemple de traitement réalisé grâce au Modeler est visible sur la figure 3.

Le module Knowledge Engineer est un outil permettant de réaliser des classifications sur la base de systèmes de règles de décisions (type système expert). Il a été utilisé pour procéder à une analyse multi-temporelle sur plusieurs images, en classant les pixels selon les différentes valeurs qu'ils ont pris sur les images. L'interface est assez simple, et les règles de décision

sont exprimées sous la forme d'un arbre décisionnel (annexe D) composé des classes définies, des règles conduisant à ces classes (conditions que doivent vérifier les variables) et des variables de base (au format raster, vecteur ou scalaire).

### **1.3.3. Définiens eCognition Developer 7.0™ (d'après le site de l'UMR TETIS, fiche logiciel « Définiens », [www.tetis.teledetection.fr](http://www.tetis.teledetection.fr))**

Definiens™ est un logiciel d'analyse d'images spatiales et aériennes, qui met à la disposition de la géomatique un ensemble d'outils innovants pour l'automatisation des procédures d'analyse d'images spatiales et aériennes. La technologie eCognition est basée sur le concept selon lequel l'information sémantique nécessaire pour l'interprétation d'une image n'est pas représentée dans des pixels isolés mais plutôt dans des objets composés d'ensembles de pixels possédant une signification particulière ainsi que dans leurs relations mutuelles. Ce logiciel permet de faire de l'analyse texturale d'image, en se basant sur une segmentation de l'image, c'est-à-dire que l'image est découpée en polygones homogènes, puis on classe les polygones créés dans des catégories définies par l'utilisateur.

Les deux fonctions principales d'eCognition sont la segmentation et la classification :

la segmentation est une technique d'extraction d'objets à différentes échelles de résolution spatiale. Cette procédure a spécialement été développée pour les données à forte texture telles que l'imagerie radar ou à haute résolution. La classification dite " supervisée " est réalisée par logique floue et les objets sont classés en utilisant les techniques de " plus proche voisin " ainsi que des fonctions statistiques d'appartenance. Un exemple de segmentation et un exemple de classification sont visibles en annexes E et F.

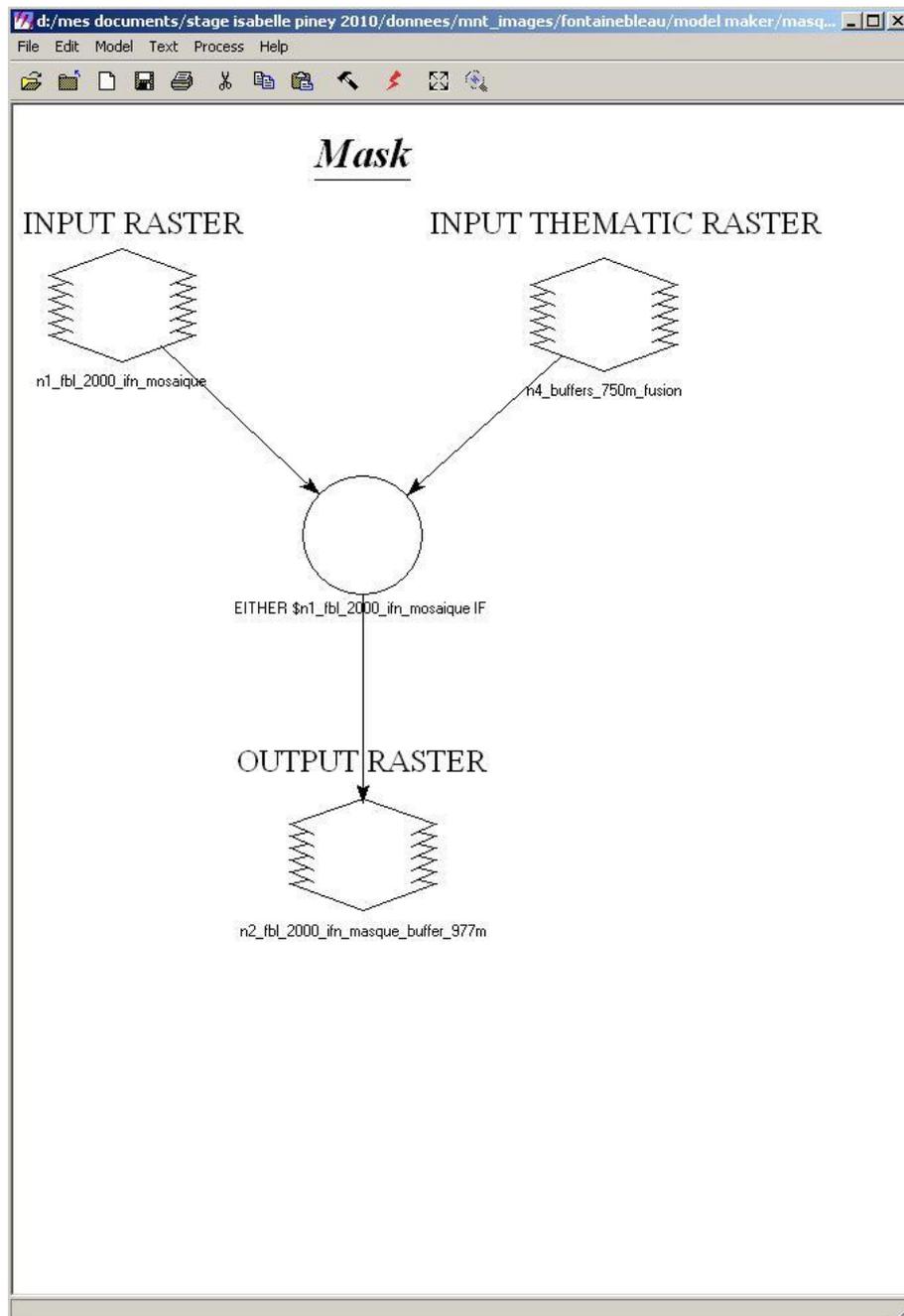


Figure 3. Interface graphique du Modeler d'ERDAS Imagine 9.2 : exemple de la création d'un masque à partir d'une orthophoto et d'un buffer circulaire.

## **2. Définition de la trouée arrêtée pour l'étude.**

Nous avons arrêté les caractéristiques de la trouée qui convenaient le mieux à notre étude. Ainsi, nous nous intéresserons aux trouées d'une surface minimale de 0,15 ha, d'une largeur supérieure à 10 m et d'une hauteur inférieure à 15 m, car sur le site d'étude la hauteur dominante (H0) des peuplements adultes est de l'ordre de 30 m.

Une largeur minimale a été arrêtée afin de différencier les petites routes et les chemins des trouées, et ainsi faciliter la reconnaissance et le suivi de ces dernières. Si la cartographie des trouées s'avère trop difficile, le projet GNB pourra travailler sur les données brutes de hauteurs (issues du MNC) comme variables explicatives. Il est probable que le seuil de hauteur à retenir pour définir une trouée dépendra du type de station forestière : on pourra envisager de définir différents seuils de hauteurs, stratifiés selon le type de station. Mais dans un premier temps, et à titre exploratoire dans ce rapport, nous avons retenu cette définition de base pour les trouées.

## **3. Traitement des données.**

### **3.1. Préparation des données de base**

Les données qui seront utilisées pour les analyses sont les Modèles Numériques de Canopée (MNC) obtenus par différences entre les Modèles Numériques de Surface (MNS) et le Modèle Numérique de Terrain (MNT) ainsi que les orthophotos.

Pour calculer les MNS et les orthophotographies, la suite logicielle Leica Photogrammetry Suite® (LPS) d'ERDAS® a été utilisée. Un Modèle Numérique de Terrain sera créé en parallèle grâce à des photos d'hiver de la zone d'étude (méthode présentée dans Tanaka et Nakashizuka, 1997).

#### **3.1.1. Préparation du projet LPS et mise en place des points de calage**

Les images sont chargées dans un projet LPS, et les paramètres d'orientation interne de la caméra sont entrés. Ces paramètres sont donnés par les certificats de calibration fournis en même temps que les photos. On place ensuite manuellement une dizaine de tie points par

couple d'images pour que le logiciel puisse générer automatiquement une ou plusieurs centaines de points sur le bloc, permettant ainsi de « rigidifier » le bloc en fixant les images les unes par rapport aux autres.

Une fois les points de liaison entre les images placés, il faut placer les points d'amer ou Ground Control Point (GCP). Dans notre cas, coordonnées (X,Y) ont été obtenues grâce à la Bd Ortho© de l'IGN, utilisée comme référence dans LPS®, et l'altitude a été obtenue par lecture du Scan 25© de l'IGN, en utilisant de préférence sur les carrefours cotés, facilement repérables en forêt sur les images et offrant une altitude plus précise que l'extrapolation à partir des courbes de niveau.

Les bâtiments n'ont pas été pris comme points de contrôle, car on ne connaît pas leur hauteur avec précision, et cela aurait engendré des biais dans l'estimation des hauteurs. Le nombre de GCP par bloc varie selon le nombre de photos composant le bloc, mais leur nombre varie entre une douzaine pour le bloc le plus petit (composé de trois images) à 45 pour le bloc le plus important (comprenant 12 images réparties sur deux lignes). Un GCP étant placé le plus souvent sur plusieurs photos, le nombre de GCP par image varie entre 4 et 8.

### 3.1.2. Génération et vérification du MNS

Afin d'avoir un résultat le plus précis possible, nous avons procédé en trois étapes :

- calcul du MNS ;
- identification puis correction des valeurs aberrantes du MNS ;
- validation du MNS corrigé obtenu, par comparaison avec le MNT et vérification de la qualité des orthophotos.

Calcul du MNS. Lorsque tous les points (GCP et points de liaison) sont placés sur le bloc d'images, le logiciel est capable de calculer les paramètres de l'orientation externe. Le MNS peut alors être calculé sur la zone recouverte par les images, à partir des informations entrées au préalable.

Identification et correction des valeurs aberrantes. Les MNS obtenus peuvent présenter des valeurs aberrantes en raison de problèmes de corrélation, souvent rencontrés sur des images de forêt. Pour les identifier, on utilise un Modeler qui va comparer chaque pixel à ses voisins proches dans une matrice de 5x5 pixels. Un pixel est considéré comme aberrant lorsque sa valeur est supérieure ou égale à la valeur maximale des pixels l'entourant + 5m, ou si sa valeur est inférieure ou égale à la valeur minimale des pixels autour - 5m. On ajoute ou on soustrait 5m à la valeur des pixels proches pour être sûr de ne pas considérer comme aberrant un pixel qui ne serait que la traduction numérique d'une brusque élévation ou déclivité du terrain ou un

changement dans la hauteur des arbres. On affecte ensuite une valeur nulle aux pixels considérés comme aberrants, ce qui permet une identification visuelle rapide et facilite la mise en œuvre des traitements de correction.

Une fois les valeurs aberrantes identifiées, on peut procéder à une correction. Pour cela, un Modeller a été créé afin de « gommer » ces valeurs en les remplaçant par la moyenne des pixels alentours ayant une valeur positive, dans une fenêtre de 7x7pixels. La procédure est itérée jusqu'à ce qu'il ne reste plus de pixels avec des valeurs nulles.

Validation du MNS corrigé obtenu. Le MNS corrigé obtenu est vérifié visuellement, par comparaison avec le MNT sur les zones de sol nu (carrefours, routes, ronds-points, etc.) pour vérifier les altitudes (Z). Le MNS permettant la création d'orthophotos, on vérifie également celles-ci par comparaison avec la Bd Ortho®, car un décalage entre les deux images peut traduire une erreur au niveau du MNS (figures 4 et 5).

### **3.1.3. Génération et vérification des orthophotos**

Une fois le MNS corrigé, on l'utilise pour orthorectifier les images, toujours sous ERDAS LPS. Un MNS est utilisé préférentiellement au MNT fourni par l'IGN, car nous pouvons générer un MNS avec un pas d'un mètre, ce qui est plus précis que le MNT dont le pas est de 50m. La qualité des orthophotos est vérifiée en les comparant avec la Bd Ortho© et le MNT qui servent de référence. Les routes et carrefours sont vérifiés sur la Bd Ortho© pour contrôler les coordonnées (X, Y). On cherche donc à voir les éventuels décalages entre les images. Par exemple si les routes ne se superposent pas, c'est que l'orthorectification n'a pas fonctionné correctement. On vérifie aussi l'absence de déformations des images sont également vérifiées, surtout sur les bords, car ce sont les endroits où elles sont le plus susceptibles d'être présentes.

Lorsque toutes les orthophotos sont réalisées pour une même année, on réalise une mosaïque avec les différentes images pour n'avoir à manipuler qu'une seule image, et ainsi faciliter les traitements ultérieurs.

### 3.1.4. Génération d'un Modèle Numérique de Terrain grâce à des photos d'hiver

Pour l'année 2000, nous avons à notre disposition deux campagnes de photographies aériennes : une campagne d'hiver réalisée par l'IGN en noir et blanc, et une campagne d'été réalisée par l'IFN en infrarouge couleur.

Sur les photographies d'hiver le sol est visible dans les peuplements feuillus, qui sont alors défeuillés. On a ainsi pu générer un Modèle Numérique de Terrain, donnant l'altitude du sol à une résolution de 1m, soit une résolution bien meilleure que celle du MNT fourni par l'IGN. Le MNT a été généré selon le même protocole que pour le MNS, et les images de la campagne d'hiver ont également été orthorectifiées.

Afin d'avoir un résultat le plus précis possible, les données du MNT généré par nos soins ont été comparées au MNT de l'IGN. Lorsque la valeur du MNS d'hiver s'éloigne trop du MNT de référence, ce qui est surtout le cas dans les parcelles de résineux, on la remplace par une valeur nulle. Ces valeurs nulles sont par la suite remplacées par celles du MNT de l'IGN (voir le Modeler utilisé en annexe G).

### 3.2. Modèles numériques de Canopée

Les Modèles Numériques de Canopée (MNC) ont été calculés par simple soustraction à partir des deux modèles précédents : MNS corrigé et MNT d'hiver amélioré.

$$\text{MNC} = \text{MNS} - \text{MNT}$$

En effet, nous n'étions intéressés que par la hauteur des arbres, afin de déterminer les trouées (qui se caractérisent par un seuil de hauteur ou par un différentiel de hauteur entre deux peuplements voisins).

Les MNC ont la même résolution que les MNT et MNS à partir desquels ils ont été calculés, soit 1 m dans notre cas.

Afin de valider la procédure de génération des MNC, les valeurs du MNC le plus récent ont été comparées aux hauteurs d'arbres mesurées sur le terrain. Pour le MNC le plus récent Les modèles numériques générés ont été vérifiés par une campagne de relevés terrain, afin de voir si la méthode utilisée pouvait être validée pour une utilisation à plus grande échelle.



Figure 4. Exemple de décalage entre la Bd Ortho (à droite) et l'orthophoto de 1987 réalisée avec le MNS non corrigé.

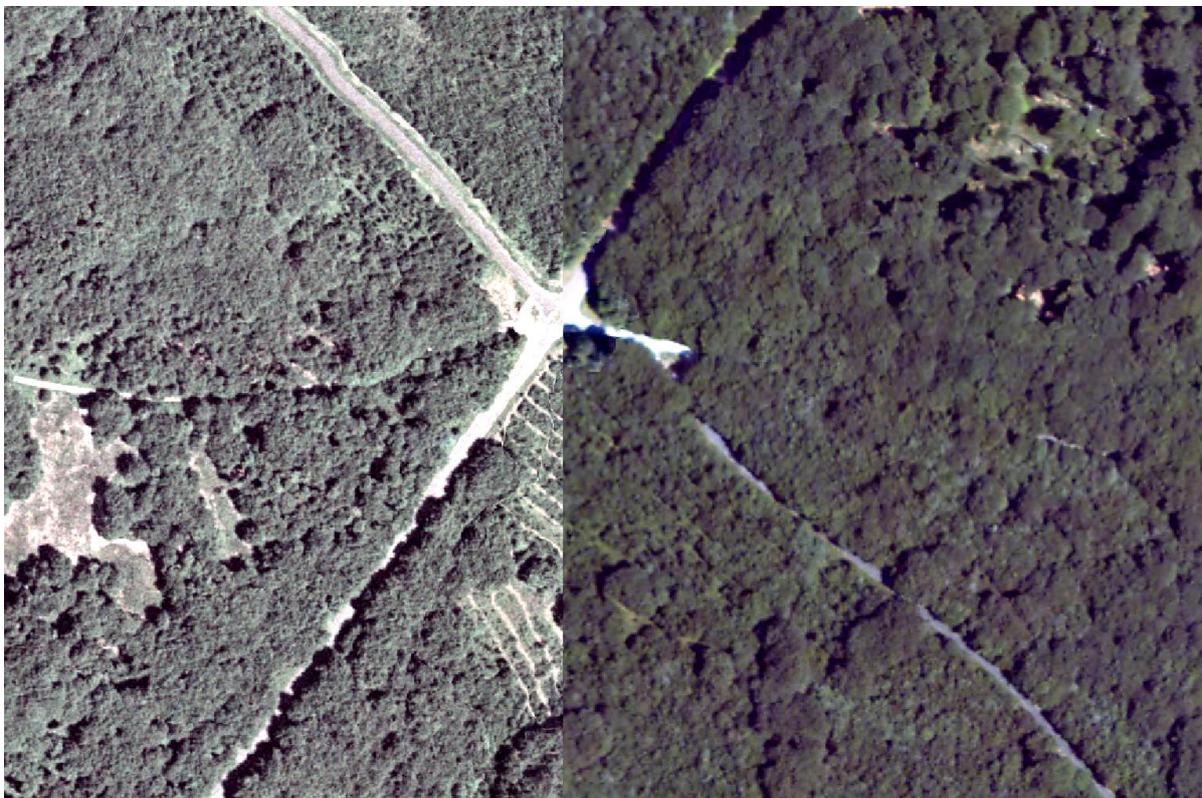


Figure 5. Absence de décalage entre la Bd Ortho (à droite) et l'ortho de 1987 créée à partir du MNS corrigé.

En juillet 2010, nous avons donc parcouru des transects en forêts de Fontainebleau en prenant deux types de mesures :

- la hauteur des arbres dominants à intervalles régulièrement répartis le long du transect, afin de voir la corrélation entre le MNC et la réalité ;
- les coordonnées GPS des trouées, ainsi que la hauteur des arbres s'y trouvant le cas échéant, afin de voir si la cartographie des trouées basées sur les MNC est juste.

## 4. Méthodes d'identification des trouées

### 4.1. Analyse de séries temporelles de MNC sous ERDAS Imagine<sup>®</sup>

Une fois que les MNC ont été calculés, il faut leur appliquer différents traitements afin de ne retenir que les trouées qui correspondent à nos critères. Nous avons procédé selon deux approches différentes :

- une cartographie annuelle des trouées potentielles suivie d'une analyse des cartes obtenues aux différentes années d'études
- une identification des trouées par analyse directe de l'évolution des hauteurs.

#### 4.1.1. Analyse des cartes annuelles des trouées potentielles

##### 4.1.1.1. Cartographie annuelle des trouées potentielles

#### **Seuillage des hauteurs – Obtention d'un MNC binaire.**

Un seuillage des hauteurs est tout d'abord effectué, ce qui permet d'obtenir une image en noir et blanc, codée en binaire, qui indique une valeur de 1 pour les zones où la hauteur est inférieure à 15m, et 0 pour les zones où la hauteur est supérieure à 15m. En d'autres termes, nous aurons deux valeurs : 1 = trouées potentielles, et 0 = arbres.

**Sélection des trouées en accord avec la définition.** Afin de ne conserver que les trouées potentielles qui correspondent à notre définition de la trouée, il a fallu traiter les images.

#### **Prise en compte du seuil de largeur.**

Pour éliminer les trouées d'une largeur inférieure au seuil de largeur choisi, des traitements morphologiques ont été réalisés sur les images binaires obtenues par seuillage. Tout d'abord une

érosion est réalisée, afin d'éliminer les éléments inférieurs à 10 m de large (soit 10 pixels sur nos images). Après l'érosion, nous effectuons une dilatation, ce qui va reformer artificiellement les grandes trouées qui auront été « rétrécies » sans recréer les petites trouées qui auront été « gommées » par l'érosion. Ensuite, à partir des trois images obtenues (seuillage de hauteurs original, image érodée et image dilatée), on procède à une reconstruction. Le but de la reconstruction est de créer une image dont les contours des trouées conservées seront plus proches de ceux de l'image de départ, car l'érosion et la dilation provoquent un lissage excessif du contour des trouées.

Pour cela, nous choisissons quelle valeur attribuer au pixel selon les valeurs prises par ce pixel dans les trois images de base (figure 6) :

- si le pixel a une valeur de 1 dans l'image érodée, il prendra également une valeur de 1 dans l'image reconstruite
- si le pixel a une valeur de 1 dans l'image originale et 1 dans l'image dilatée, il aura une valeur de 1 dans l'image reconstruite
- si le pixel a une valeur de 1 dans l'image originale et 0 dans l'image dilatée, il aura une valeur de 0 dans l'image reconstruite.

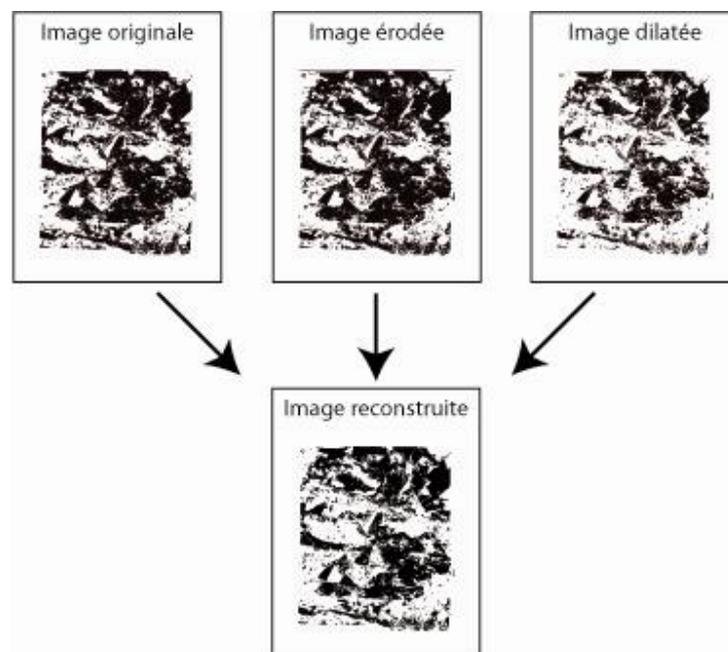


Figure 6. Reconstruction du MNS après corrections.

Les fonctions permettant ces différents traitements sont créées grâce au Modeler, et après des tests séparés, les traitements sont enchainés dans un Modeler unique, afin de faciliter la manipulation des données et de gagner du temps.

#### Prise en compte du seuil de surface.

Une fois l'image reconstruite générée, on supprime les trouées inférieures à 0,15 ha en enlevant les petits éléments de l'image grâce à la fonction « clump ».

L'image résultant de cette succession de traitements est une image « nettoyée », qui ne porte que les informations dont nous avons besoin, et qui va nous permettre d'effectuer un suivi des trouées au fil du temps.

#### **4.1.1.2. Combinaison des cartes**

Le suivi des trouées comportant une dimension temporelle, nous avons comparé les cartes de trouées potentielles obtenues à différentes dates afin de déterminer la dynamique des trouées. Ainsi, si un pixel est classé comme « trouée » en 1961 et comme « arbre » en 1987, on considère que la trouée s'est refermée entre ces deux dates. En paramétrant les différentes combinaisons possibles dans le Knowledge Engineer, on obtient un arbre de décision qui permet de combiner les cartes de façon à obtenir des cartes des types de trouées. Les classes sont nommées :

- Trouées permanentes, pour les zones classées « trouée » sur tous les MNC étudiés
- Forêt, pour les zones classées « arbres » sur tous les MNC
- Trouées potentielles, pour les zones classées « arbres » sur les MNC les plus anciens et « trouées » sur le plus récent
- Trouées réelles, pour les zones classées « trouées » sur les MNC anciens et « arbres » sur le plus récent.

Le tableau IV montre les combinaisons possibles ayant servi de base à la création des arbres de décision pour les cartes faites à partir des MNC « binaires ».

#### **4.1.2. Cartographie des trouées par analyse de l'évolution temporelle des hauteurs brutes**

Les MNC donnant la hauteur des arbres, des cartes sont également générées grâce à des arbres de décision utilisant directement les MNC. Les règles de décision prennent donc en compte les valeurs des hauteurs, et permettent de faire un classement en fonction de valeurs seuils : 5, 10 et 15 m. ces seuils permettent de distinguer les classes suivantes :

- Trouées permanentes, pour les pixels ayant une valeur inférieure à 5 m sur tous les MNC
- Forêt, pour les pixels supérieurs à 15 m sur tous les MNC
- Trouée refermée, pour les pixels dont la valeur était inférieure à 15m sur les MNC anciens, et supérieure à ce seuil sur les MNC récents
- Trouée ouverte : ce sont les pixels supérieurs à 15m sur les MNC anciens et dont la valeur devient inférieure à 15m sur un MNC plus récent. On peut affiner cette classe en précisant à quelle date la trouée s'est ouverte.
- Trouée en train de se refermer : les pixels sont inférieurs à 5 ou 10 m sur les MNC anciens, et sont situés entre 10 et 15 m sur le MNC le plus récent.

Le tableau V montre les combinaisons ayant servi de base pour les arbres de décisions des cartes de trouées faites en fonction des hauteurs.

**Type de couvert**

<b>1961</b>	sol nu	arbres	arbres	arbustes	arbustes	arbres	arbustes	arbres	arbustes	sol nu	sol nu	arbres	sol nu	arbustes	arbustes	sol nu	sol nu	arbustes
<b>1987</b>	sol nu	arbres	arbres	arbustes	sol nu	arbres	arbustes	arbustes	sol nu	sol nu	arbustes	sol nu	arbres	arbustes	arbustes	arbustes	sol nu	sol nu
<b>2000</b>	sol nu	arbres	sol nu	sol nu	sol nu	arbustes	arbustes	arbustes	arbustes	arbustes	arbustes	arbustes	arbres	arbustes	arbustes	arbustes	arbustes	arbustes
<b>Classe</b>	trouée permanente	foret	ouverte	ouverte	ouverte	ouverte	ouverte	ouverte	ouverte	se refermant	se refermant	se refermant	refermée	refermée	refermée	refermée	refermée	refermée

**Tableau III. Combinaison de types de couvert ayant servi à la création des arbres de décisions pour les cartes "binaires".**

**Hauteurs (m)**

<b>1961</b>	< 5	> 15	> 15	< 10	< 10	> 15	< 10	> 15	< 10	< 5	< 5	> 15	< 5	< 10	< 10	< 5	< 5	< 10
<b>1987</b>	< 5	> 15	> 15	> 15	< 5	> 15	< 10	< 10	< 5	< 5	< 10	< 5	> 15	> 15	< 10	< 10	< 5	< 5
<b>2000</b>	< 5	> 15	< 5	< 5	< 5	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	> 15	> 15	> 15	> 15	> 15	> 15
<b>Classe</b>	trouée permanente	foret	ouverte	se refermant	se refermant	se refermant	refermée	refermée	refermée	refermée	refermée	refermée						

**Tableau IV. Combinaison de types de couvert ayant servi à la création des arbres de décisions pour les cartes "par hauteurs".**

#### 4.2. Cartographie des trouées par analyse texturale et radiométrique sous Definiens®

Nous avons utilisé Definiens® pour analyser les orthophotos et séparer les arbres des trouées, grâce à une classification multiple. Cette classification permet d'identifier les zones avec un couvert continu haut (arbres) et les zones à couvert continu bas (trouées) ainsi que les zones à couvert discontinu (strates arbustives + arbres isolés). Toutefois, on peut noter que le logiciel est un peu moins performant pour cette dernière classe, car il a quelques difficultés à isoler les arbres présents au milieu des trouées, ceux-ci étant souvent trop petits (quelques pixels).

Nous avons repris les règles de classification développées par un chercheur de la Maison de la Télédétection (Roberto Meloni, comm.pers.) pour identifier les zones de bocage. Nous n'avons retenu que les définitions des classes relatives aux arbres, puis nous avons adapté les valeurs afin qu'elles correspondent à nos images. R. Meloni travaillant sur des images en infrarouge couleur tandis que les nôtres étaient en noir et blanc, nous avons adapté les règles de décisions et les différentes valeurs seuil utilisées pour classer l'image, comme le ratio vert/rouge du pixel, la texture ou encore la valeur moyenne du canal noir et blanc, afin qu'elles puissent s'adapter à nos images.

Une fois cette adaptation faite, en laissant le logiciel réaliser la segmentation de l'image puis la classification, nous obtenons une carte des peuplements forestiers. Une classe « trouées », définie comme étant l'inverse des classes arborées, a été créée afin de mettre en évidence les zones identifiées par le logiciel comme étant « sans végétation ».

Cette analyse étant longue et demandant la mobilisation de toute la puissance de calcul de l'ordinateur, elle a été réalisée uniquement sur une seule campagne et seulement sur la partie de l'image au voisinage des placettes (buffers circulaires de 400 ha, soit 1128m de rayon centrés sur les placettes). Après avoir testé le paramétrage des différents critères de la classification sur toutes les années d'étude, le choix s'est porté sur l'année 1961 car c'est l'image qui s'est révélée être la plus facile à paramétrer.

Nous disposerons donc d'un jeu de données complet (cartes des trouées pour les trois protocoles) pour l'année 1961.

### **4.3. Analyse combinée de l'information radiométrique et texturale et du MNC sous Definiens®**

Cette méthode a pour but de voir l'apport du MNC et donc des hauteurs dans la classification orientée objet. Elle permet d'évaluer la complémentarité des informations de l'image et du MNC.

Nous avons donc utilisé les orthophotos réalisées par nos soins ainsi que le MNC corrigé de l'année 1961. Des fonctions supplémentaires ont été ajoutées à la classification utilisée précédemment, prenant en compte la hauteur du MNC pour la classe « trouées », ainsi qu'un seuil de surface de 0,15 ha permettant de différencier les grandes des petites trouées.

Comme précédemment, l'analyse a été réalisée sur une image découpée ensuite selon un buffer de 1128 m de rayon autour des placettes.

### **4.4. Validation et comparaison des méthodes**

#### **4.4.1. Validation des cartes de trouées par analyse visuelle et par comparaison aux relevés terrain**

Les cartes de trouées obtenues grâce à la comparaison des MNC binaires ou bruts sont dans un premier temps vérifiées visuellement par comparaison avec les orthophotos, pour voir si les zones classées en trouées permanentes et en forêt correspondent bien à ce que l'on voit sur les images. Les hauteurs mesurées sur le terrain vont également être comparées aux valeurs correspondantes sur le MNC (extraction par point), ainsi qu'aux valeurs maximales et moyennes du MNC dans un buffer circulaire de 10 m de rayon autour du point (extraction par buffer circulaire). La comparaison des valeurs terrain à ces différentes valeurs du MNC est due à l'imprécision de la localisation des points terrain (précision du GPS), aux différentes définitions des hauteurs que l'on peut mesurer sur le MNC, ou encore à la précision du MNC.

## 4.4.2. Comparaison des résultats obtenus par les différentes méthodes

### 4.4.2.1. Matrices de confusion

Afin de comparer les différentes classifications entre elles, on calcule quelle superficie classée en trouée par la méthode d'analyse des MNC, carte choisie comme référence, est également classée en trouée par l'analyse orientée objet ainsi que par l'analyse orientée objet couplée au MNC. Les matrices de confusions ainsi générées permettent de calculer la concordance et la discordance entre les classifications, c'est-à-dire le pourcentage de surface classée « arbres » et « trouées » par les deux classifications. Plus la concordance est élevée et plus les résultats des deux classifications sont proches.

### 4.4.2.2. Comparaison des surfaces classées en trouées selon les différentes méthodes.

Afin de déterminer la précision de chacune des méthodes, on comparera la superficie classée en trouée par chacune des méthodes pour différentes tailles de buffers circulaires générés autour des placettes d'étude (voir tableau VI). Nous avons aussi procédé à la vectorisation des trouées sur les zones d'étude de 10 ha de façon manuelle, sur les parcelles présentant des trouées. Les surfaces classées comme « trouées » par un opérateur humain ont ensuite été comparées aux différentes méthodes de classification afin de voir les différences entre les classifications automatisées et une interprétation manuelle des images.

Surface étudiée (ha)	Rayon du buffer (m)
10	178
175	746
300	977
400	1128

Tableau V. Tailles et rayons des surfaces étudiées autour des placettes.

Afin de déterminer la précision de chacune des méthodes, on comparera la superficie classée en trouée, pour chaque valeur de buffer définie auparavant. Pour cela, les images classées sont « découpées » aux différentes tailles de buffers dans ArcMap® grâce à l'outil « Spatial Analyst » et sa fonction « *Extraction par masque* ». Puis les rasters créés sont vectorisés, toujours dans ArcMap®, avec la fonction « *Raster vers polygones* » de l'Outil de conversion. Une fois les

polygones de classification obtenus, il est facile d'en calculer la surface en m<sup>2</sup> afin de voir quelles sont les proportions de la zone d'étude classées en trouées par chaque méthode.

Ainsi, on pourra évaluer l'impact du choix de la méthode sur l'estimation du pourcentage de trouées au voisinage des placettes, qui sera une des variables explicatives dans les modèles statistiques utilisés pour établir un lien entre régime des perturbations et biodiversité.

## Chapitre 4 : Résultats

### 1. Précision du MNT généré à partir de photos d'hiver

Le MNT généré à partir des photos d'hiver de 2000 (non corrigé de ses valeurs aberrantes) a été comparé au MNT de l'IGN afin de voir si cette méthode d'obtention d'un MNT était applicable à notre cas. La figure 7 montre que les valeurs du MNT d'hiver correspondent bien à celles du MNT de l'IGN ( $R^2 = 0,9776$ ), l'écart moyen entre les deux MNT est de 2 m.

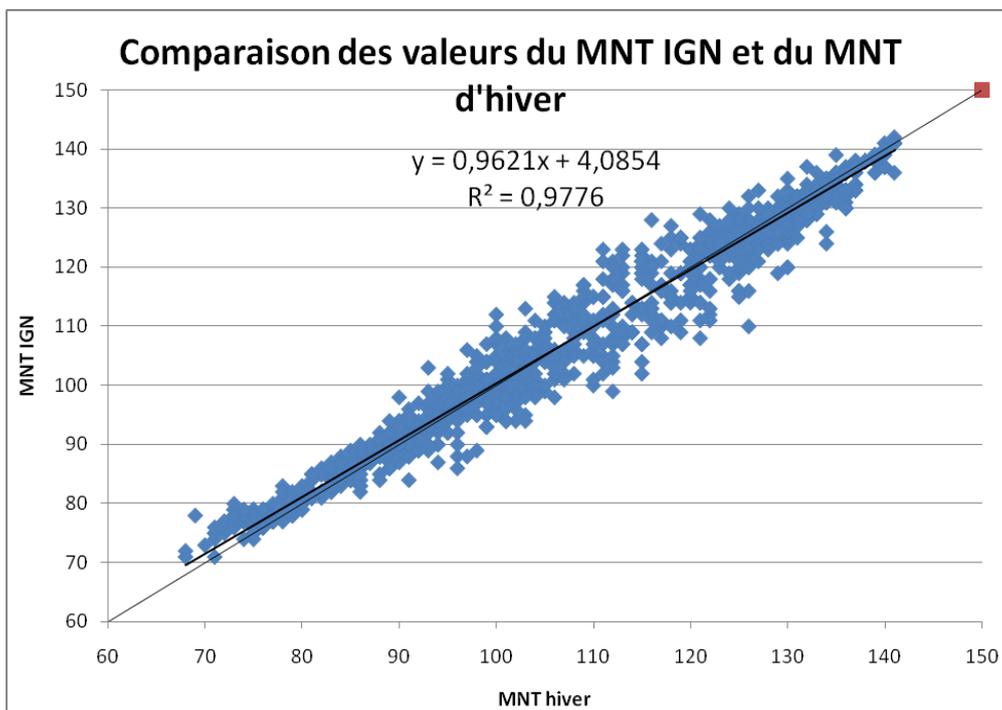


Figure 7. Comparaison des valeurs du MNT hiver et du MNT de l'IGN.

La génération d'un MNT à partir d'une série d'images prises en hiver en peuplements feuillus est donc fiable, et permet d'obtenir des MNT à une résolution d'1 m à peu de frais, puisqu'il suffit d'avoir des photos aériennes prises en hiver dans des peuplements feuillus pour pouvoir voir le sol.

## 2. Précision des MNC

La qualité des MNC dépendant directement de celle du MNT et du MNS ayant servi à sa création, si ceux-ci ne sont pas précis, les erreurs vont se cumuler tout au long du processus. Nous avons donc vérifié les valeurs du MNC de 2000 car c'est le MNC le plus récent que nous ayons pour faire des comparaisons avec des mesures prises en été 2010.

Après extraction des valeurs du MNC aux coordonnées des points GPS relevés sur le terrain, on a pu comparer les valeurs du MNC aux hauteurs mesurées. Nous avons également extrait les valeurs du MNC dans un buffer de 10 m autour des points GPS, et ainsi pu comparer les valeurs moyennes et maximales prises par le MNC dans les zones proches des coordonnées où nous avons pris des mesures.

En comparant les hauteurs mesurées sur le terrain avec les valeurs du MNC de 2000 correspondantes, on constate que les mesures ne correspondent pas exactement aux valeurs du MNC. En moyenne, l'écart entre la hauteur mesurée sur le terrain et la valeur maximale du MNC de 2000 calculée dans un buffer de 10 m de rayon autour des points est de 5,16 m (figure 8,  $R^2 = 0,3575$  lorsque la droite de régression ne passe pas par l'origine – droite verte); et de 5,44 m lorsqu'on compare la valeur moyenne du MNC à la valeur terrain (figure 9). Si on compare l'extraction du MNC aux points GPS des arbres mesurés avec les mesures terrain, comme le montre la figure 10, on constate que la régression donne quasiment le même résultat ( $R^2 = 0,3537$ ). On voit donc que quelle que soit la valeur du MNC que l'on compare à la mesure terrain, la corrélation n'est pas excellente.

Les écarts entre le MNC de 2000 et les mesures terrain de 2010 sont conséquents, et tendent à montrer que la méthode choisie ne permet pas d'estimer la hauteur des peuplements avec une bonne précision. Or, certaines études ont montré le contraire : la photogrammétrie permet d'estimer la hauteur des arbres avec une bonne précision.

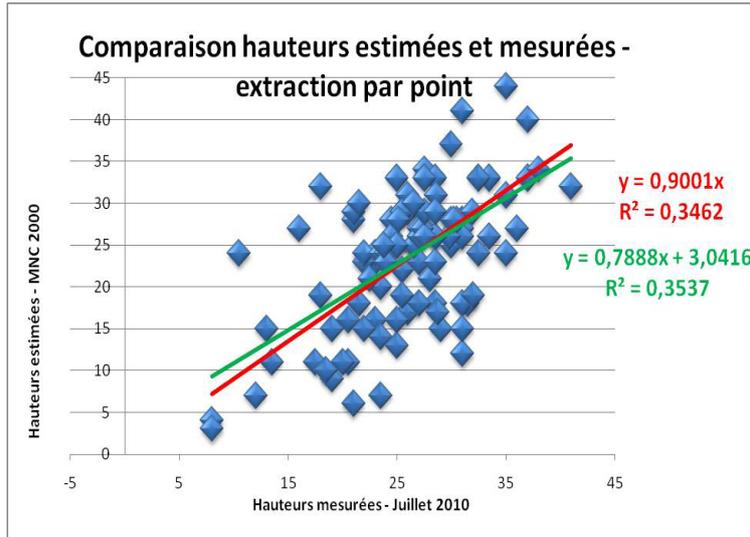


Figure 8. Comparaison de valeurs ponctuelles du MNC et des mesures terrain.

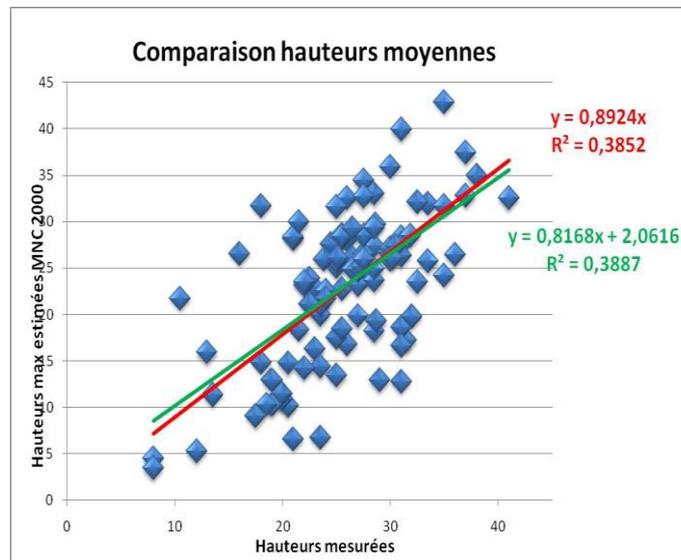


Figure 9. Comparaison des valeurs moyennes du MNC dans un buffer de 10 m et des mesures terrain.

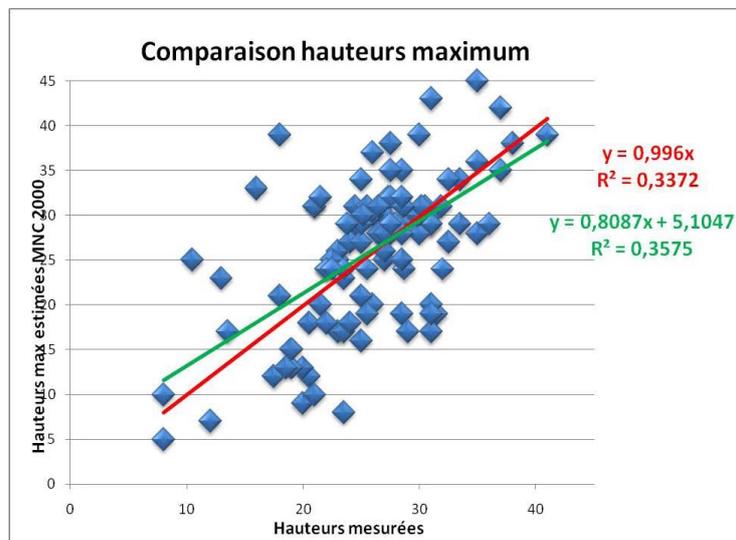


Figure 10. Comparaison des valeurs maximales du MNC dans un buffer de 10 m et des mesures terrain.

### **3. Les différentes cartes de trouées obtenues**

#### **3.1. Cartographie des trouées par comparaison des MNC**

La cartographie des trouées réalisée grâce au module Knowledge Engineer d'Erdas® a permis de mettre en évidence les zones de trouées du massif de Fontainebleau sur la zone commune à tous les MNC. Nous avons obtenu deux cartes :

- la carte réalisée par comparaison des MNC transformés (trouées/arbres) a donné des cartes des trouées classées en : trouée potentielle, réelle, refermée (annexe H)
- la carte réalisée par comparaison de l'évolution temporelle des MNC bruts a permis de connaître approximativement les années d'ouverture des trouées, puisque l'on compare des hauteurs (annexe I).

#### **3.2. Cartographie par analyse texturale**

La cartographie des trouées basée sur l'analyse de la texture des images réalisée avec Definiens® permet de mettre en évidence les zones de sol nu ou d'interruption du couvert forestier (annexe J). Cependant, cela ne permet pas de répondre avec précision à la question posée, car la hauteur de la canopée n'étant pas prise en compte, on ne sait pas si les zones classées comme trouées en sont réellement d'après notre définition. En effet, des peuplements fermés d'une hauteur inférieure à 15m seront classés comme « forêt ». On constate également que les zones urbaines appartiennent à la classe « trouées ».

#### **3.3. Cartographie par combinaison de l'analyse texturale et du MNC**

En couplant l'analyse texturale aux données de hauteurs du MNC, nous obtenons une classification répondant avec plus de précision à la définition arrêtée pour notre étude. Nous pouvons déterminer les zones de végétation où la hauteur est inférieure à 15 m et les classer en trouées (annexe K). Les cartes obtenues sont ensuite comparées aux cartes de trouées obtenues

avec Erdas, afin de voir si les deux méthodes sont aussi précises, si l'une est meilleure que l'autre, ou si elles sont complémentaires.

#### 4. Comparaison des cartes de trouées obtenues par les différentes méthodes.

##### 4.1. Matrices de confusion

Lorsque l'on compare les différentes classifications entre elles, on peut voir quelle superficie classée en trouée par analyse du MNC est également classée en trouée par l'analyse orientée objet ainsi que par l'analyse orientée objet couplée au MNC. Les matrices de confusions ainsi générées permettent de calculer la concordance et la discordance entre les classifications, c'est-à-dire le pourcentage de surface classée « arbres » et « trouées » par les deux classifications. Plus la concordance est élevée et plus les résultats des deux classifications sont proches. Le principe des matrices de confusion est présenté en annexe N.

Ainsi, la comparaison entre le MNC avec élimination des petites surfaces et l'analyse orientée objet présentent une concordance de seulement 55% (tableau VII), ce qui est assez faible, et montre bien que ces deux classifications ne donnent pas les mêmes résultats.

	Classification orientée objet				Concordance	Discordance
	% de surface classée	arbres	trouées	somme		
MNC avec élimination des surfaces < 0.15 ha	arbres	35.29	4.25	39.54	55.07	44.93
	trouées	40.69	19.77	60.46		
	somme	75.98	24.02	100.00		

Tableau VII. Comparaison de la classification orientée objet par rapport au MNC.

La comparaison entre le MNC avec élimination des petites surfaces et la classification orientée objet couplée au MNC (tableau VIII) donne une concordance de 88,79% et une discordance de 11,21%. Les surfaces classées « trouées » à la fois par Erdas et par Definiens sont donc les mêmes à presque 90%, ce qui semble encourageant.

	Classification orientée objet couplée au MNC						Concordance	Discordance
	% de surface classée	arbres	trouées < 0,15 ha	trouées > 0,15ha	somme			
MNC avec élimination des surfaces < 0.15ha	arbres	35.25	4.44	0.04	39.73	88.79	11.21	
	trouées	6.73	50.63	2.91	60.27			
	somme	41.98	55.07	2.96	100.00			

Tableau VIII. Comparaison de la classification orientée objet couplée au MNC par rapport au MNC.

La comparaison des deux classifications orientées objet montre que les classifications sont assez proches l'une de l'autre, avec une concordance de 64.5% entre les deux méthodes de classification (tableau IX).

	% de surface classée	Classification orientée objet			Concordance	Discordance
		arbres	trouées	Somme		
Classification orientée objet couplée au MNC	arbres	41,42	0,61	42,03	64,51	35,49
	trouées < 0,15ha	33,68	21,32	55,00		
	trouées > 0,15ha	1,20	1,77	2,97		
	somme	76,30	23,70	100,00		

Tableau IX. Comparaison des deux classifications orientées objet.

Un test du khi2 a été réalisé afin de comparer les méthodes de classification deux à deux et voir si, pour un même point, les différences de classifications entre les méthodes sont significatives.

La comparaison du MNC et de la classification orientée objet donne une valeur du test du khi2 (réalisé sur 1300 points) égale à 0,046, ce qui est inférieur à la valeur-seuil de 0,05 et nous indique que la différence entre les deux méthodes de classifications est significative. Cependant, la valeur du test est à la limite de la significativité, la différence entre ces deux méthodes de classification est donc moins importante qu'entre les autres méthodes.

Lorsqu'on compare le MNC avec la classification orientée objet couplée au MNC, le test montre que la différence entre les deux classifications est significative ( $p$  - value < 0.0001). Il en est de même lorsqu'on compare les deux classifications orientées objet, avec et sans MNC ( $p$ -value < 0.0001).

<b>MNC seuillé par hauteurs avec élimination des petites surfaces</b>								
<b>% de surface classée</b>	<b>10</b>		<b>175 ha</b>		<b>300 ha</b>		<b>400 ha</b>	
<b>Parcelle</b>	<b>arbres</b>	<b>trouées</b>	<b>arbres</b>	<b>trouées</b>	<b>arbres</b>	<b>trouées</b>	<b>arbres</b>	<b>trouées</b>
<b>GFT13</b>	100.00	0.00	41.22	58.78	13.63	86.37	2.85	97.15
<b>GFT94</b>	98.02	1.98	20.98	79.02	87.56	12.44	14.69	85.31
<b>CB14</b>	69.22	30.78	0.00	100.00	0.00	100.00	2.27	97.73
<b>CB33</b>	28.67	71.33	0.16	99.84	0.24	99.76	1.24	98.76
<b>CB51</b>	64.49	35.51	13.80	86.20	0.00	100.00	0.00	100.00
<b>CB39</b>	46.84	53.16	32.69	67.31	29.05	70.95	22.01	77.99
<b>TL43</b>	100.00	0.00	75.00	25.00	45.88	54.12	40.20	59.80
<b>GFT124</b>	71.65	28.35	53.59	46.41	70.85	29.15	66.40	33.60
<b>GFT59</b>	94.95	5.05	77.14	22.86	77.37	22.63	74.02	25.98
<b>Fbleau-166</b>			0.00	100.00	12.61	87.39	25.68	74.32
<b>Fbleau-133</b>					0.00	100.00	2.50	97.50
<b>Fbleau-420</b>	52.86	47.14	17.92	82.08	12.35	87.65	0.00	100.00
<b>Fbleau-374</b>	94.26	5.74	20.03	79.97	14.56	85.44	2.73	97.27
<b>Fbleau-604</b>	85.14	14.86	35.52	64.48	27.07	72.93	15.11	84.89
<b>Fbleau-333</b>	76.61	23.39	50.59	49.41	40.19	59.81	37.76	62.24
<b>Fbleau-117</b>							0.00	100.00
<b>Fbleau-273</b>	47.49	52.51	52.78	47.22	44.89	55.11	38.83	61.17
<b>GFT-21</b>	100.00	0.00	72.04	27.96	34.62	65.38	34.60	65.40
<b>GFT-67</b>	94.73	5.27	37.51	62.49	36.15	63.85	23.49	76.51
<b>Fbleau-589</b>	71.88	28.12	84.15	15.85	70.50	29.50	63.11	36.89
<b>GFT-78</b>	94.41	5.59	75.23	24.77	68.61	31.39	63.65	36.35
<b>Fbleau-413</b>	20.06	79.94	43.54	56.46	35.64	64.36	33.10	66.90
<b>TL45</b>	99.57	0.43	59.77	40.23	53.68	46.32	54.01	45.99
<b>Moyenne</b>	<b>75.54</b>	<b>24.46</b>	<b>41.13</b>	<b>58.87</b>	<b>35.25</b>	<b>64.75</b>	<b>26.88</b>	<b>73.12</b>
<b>Médiane</b>	<b>80.88</b>	<b>19.12</b>	<b>41.22</b>	<b>58.78</b>	<b>35.13</b>	<b>64.87</b>	<b>23.49</b>	<b>76.51</b>

Tableau VII. Proportions de surfaces classées selon le MNC, par parcelles, selon différentes tailles de zones tampons.

#### 4.2. Classification à partir du MNC.

La classification à partir du MNC seul change selon la taille de la zone d'étude prise en compte autour des parcelles. Pour une zone tampon de 10 ha, le pourcentage moyen de trouées est de 25% et la médiane est de 19%, mais cette proportion change quand on prend une zone tampon plus importante (tableau X). Ainsi, pour 175 ha, les trouées représentent en moyenne 59% de la surface de la zone étudiée, et cette proportion augmente avec la taille de la zone tampon prise en compte : jusqu'à 73% de trouées pour une zone de 400 ha.

% de surface du buffer classée en :	10 ha		175 ha		300		400 ha	
	arbres	trouées	arbres	trouées	arbres	trouées	arbres	trouées
<b>Moyenne</b>	75.54	24.46	41.13	58.87	35.25	64.75	26.88	73.12
<b>Médiane</b>	80.88	19.12	41.22	58.78	35.13	64.87	23.49	76.51

**Tableau X. Surfaces moyennes classées selon les hauteurs.**

L'augmentation de la proportion de trouées dans les buffers semble assez logique, puisqu'en augmentant la taille de la zone d'étude, on a plus de chances de rencontrer des peuplements différents, et donc des trouées. Cette augmentation de la surface de trouées au sein des buffers est cependant dépendante de la zone étudiée, et varie selon les parcelles d'étude, comme le montre le tableau XI.

% de surface classée :	Classification orientée objet										
	10 ha			175 ha			300 ha			400 ha	
Parcelle	arbres	trouées	autre	arbres	trouées	autre	arbres	trouées	autre	arbres	trouées
<b>GFT13</b>	94.33	5.67	0.00	91.68	8.32	0.00	60.69	39.31	0.00	46.50	53.50
<b>GFT94</b>	90.73	9.27	0.00	87.42	12.58	0.00	96.59	3.41	0.00	40.71	59.29
<b>CB14</b>	61.52	38.48	0.00	73.63	26.37	0.00	13.12	4.17	82.70	46.51	53.49
<b>CB33</b>	75.29	24.71	0.00	67.37	32.63	0.00	68.68	30.47	0.85	65.65	34.35
<b>CB51</b>	63.79	36.21	0.00	76.79	23.21	0.00	75.31	24.69	0.00	75.93	24.07
<b>CB39</b>	62.59	37.41	0.00	67.87	32.13	0.00	69.60	30.40	0.00	67.69	32.31
<b>TL43</b>	97.43	2.57	0.00	83.33	16.67	0.00	78.36	21.64	0.00	78.91	21.09
<b>GFT124</b>	93.82	6.03	0.14	91.70	8.30	0.00	91.45	8.55	0.00	80.18	19.82
<b>GFT59</b>	87.48	12.52	0.00	94.01	5.99	0.00	93.01	6.99	0.00	87.52	12.48
<b>Fbleau-166</b>							6.27	0.26	93.47	31.94	68.06
<b>Fbleau-133</b>							0.00	0.00	100.00	16.81	83.19
<b>Fbleau-420</b>	92.74	7.26	0.00	54.55	45.45	0.00	39.33	60.67	0.00	25.87	74.13
<b>Fbleau-374</b>	83.50	16.16	0.34	45.22	54.78	0.00	33.08	66.92	0.00	16.29	83.71
<b>Fbleau-604</b>	97.99	2.01	0.00	83.54	16.46	0.00	80.80	19.20	0.00	73.97	26.03
<b>Fbleau-333</b>	94.84	5.16	0.00	84.87	14.85	0.28	70.00	21.88	8.12	73.90	26.10
<b>Fbleau-117</b>							0.00	0.00	0.00	14.75	85.25
<b>Fbleau-273</b>	90.97	9.03	0.00	89.79	10.21	0.00	83.85	10.88	5.27	79.00	21.00
<b>GFT-21</b>	91.92	7.94	0.14	91.76	8.24	0.00	89.92	10.08	0.00	73.94	26.06
<b>GFT-67</b>	95.43	4.57	0.00	94.78	5.22	0.00	92.58	7.42	0.00	91.62	8.38
<b>Fbleau-589</b>	98.72	1.28	0.00	95.48	4.52	0.00	94.49	5.51	0.00	85.37	14.63
<b>GFT-78</b>	85.33	14.67	0.00	91.80	8.20	0.00	92.28	7.72	0.00	89.76	10.24
<b>Fbleau-413</b>	69.74	30.26	0.00	79.94	20.06	0.00	75.56	24.44	0.00	72.42	27.58
<b>TL45</b>	97.86	2.14	0.00	87.77	12.23	0.00	82.06	17.94	0.00	78.50	21.50
<b>Moyenne</b>	<b>86.30</b>	<b>13.67</b>	<b>0.03</b>	<b>81.67</b>	<b>18.32</b>	<b>0.01</b>	<b>64.65</b>	<b>18.37</b>	<b>12.63</b>	<b>61.47</b>	<b>38.53</b>
<b>Médiane</b>	<b>91.45</b>	<b>8.48</b>	<b>0.00</b>	<b>86.15</b>	<b>13.71</b>	<b>0.00</b>	<b>75.56</b>	<b>10.88</b>	<b>0.00</b>	<b>73.90</b>	<b>26.10</b>

Tableau VIII. Proportions de surfaces classées selon la classification orientée objet, par parcelles, selon différentes tailles de zones tampons.

### 4.3. Classification orientée objet

Le pourcentage de trouées dans le buffer centré sur les placettes varie également selon la taille de la zone tampon prise en compte, allant en moyenne de 13% de la surface classée en trouées pour 10 ha étudiés à 38% de trouées pour une zone de 400 ha, pour des valeurs médianes respectivement de 8% et 26% de trouées (tableau XII).

Dans les buffers de grande taille (300 et 400 ha), ces valeurs sont quasiment les valeurs inverses de celles obtenues par une classification basée sur la hauteur. Les variations de classification dépendent ici aussi des parcelles étudiées, comme le montre le tableau XIII.

% de surface du buffer classée en :	10 ha			175 ha			300 ha			400 ha	
	arbres	trouées	autre	arbres	trouées	autre	arbres	trouées	autre	arbres	trouées
<b>Moyenne</b>	86.30	13.67	0.03	81.67	18.32	0.01	64.65	18.37	12.63	61.47	38.53
<b>Médiane</b>	91.45	8.48	0.00	86.15	13.71	0.00	75.56	10.88	0.00	73.90	26.10

Tableau VIII. Surfaces moyennes classées selon la classification orientée objet.

Les critères utilisés pour ces deux types de classification ne semblent donc pas donner les mêmes résultats, et la classification orientée objet semble montrer ses limites sur de grandes surfaces.

### 4.4. Classification orientée objet couplée au MNC

La classification orientée objet couplée au MNC permet d'évaluer la complémentarité entre l'information apportée par l'image seule et l'information de hauteur de canopée (tableau XIV).

% de surface du buffer classée en :	10 ha		175 ha			300 ha			400 ha		
	arbres	trouées < 0,15ha	arbres < 0,15ha	trouées < 0,15ha	trouées > 0,15ha	arbres < 0,15ha	trouées < 0,15ha	trouées < 0,15ha	arbres < 0,15ha	trouées < 0,15ha	trouées < 0,15ha
<b>Moyenne</b>	70.81	29.19	43.75	55.05	1.20	38.67	55.59	5.74	28.40	58.65	12.95
<b>Médiane</b>	81.30	18.70	44.34	54.85	1.01	42.79	53.51	0.00	22.80	56.36	3.57

Tableau IX. Surfaces moyennes classées selon la classification orientée objet couplée au MNC.

% de surface classée :	Classification orientée objet couplée au MNC										
	10 ha		175 ha			300 ha			400 ha		
Parcelle	Arbres	trouées < 0,15	Arbres	trouées < 0,15ha	trouées > 0,15ha	Arbres	trouées < 0,15ha	trouées < 0,15ha	arbres	trouées < 0,15ha	trouées < 0,15ha
<b>GFT13</b>	94.46	5.54	53.08	44.92	2.00	18.84	81.16	0.00	4.43	89.99	5.58
<b>GFT94</b>	93.57	6.43	28.74	70.47	0.79	90.67	9.33	0.00	21.48	60.40	18.12
<b>CB14</b>	56.36	43.64	0.00	99.82	0.18	1.82	59.12	39.05	12.20	34.15	53.66
<b>CB33</b>	27.39	72.61	0.40	97.18	2.43	1.05	97.95	1.00	3.19	86.50	10.31
<b>CB51</b>	50.89	49.11	21.43	76.38	2.19	0.00	100.00	0.00	0.00	96.46	3.54
<b>CB39</b>	37.99	62.01	33.41	65.39	1.20	30.68	69.32	0.00	22.80	73.63	3.57
<b>TL43</b>	82.13	17.87	33.33	66.67	0.00	46.79	53.21	0.00	42.34	56.36	1.30
<b>GFT124</b>	65.08	34.92	57.49	42.51	0.00	66.28	33.72	0.00	64.20	35.46	0.34
<b>GFT59</b>	84.13	15.87	70.06	28.90	1.03	75.70	24.30	0.00	72.13	27.61	0.26
<b>Fbleau-166</b>						0.00	23.96	76.04	0.00	58.14	41.86
<b>Fbleau-133</b>									8672.28	22609.86	67519.86
<b>Fbleau-420</b>	62.77	37.23	19.78	77.21	3.01	13.43	86.52	0.05	0.00	83.33	16.67
<b>Fbleau-374</b>	80.47	19.53	22.46	75.60	1.95	15.34	84.52	0.13	3.40	90.40	6.20
<b>Fbleau-604</b>	87.30	12.70	40.86	55.75	3.39	29.15	70.62	0.23	16.43	77.40	6.17
<b>Fbleau-333</b>	82.50	17.50	55.08	43.59	1.33	46.36	53.51	0.13	43.60	54.26	2.13
<b>Fbleau-117</b>									0.00	56.25	43.75
<b>Fbleau-273</b>	52.08	47.92	59.88	38.68	1.44	53.08	42.98	3.95	48.59	44.94	6.47
<b>GFT-21</b>	91.37	8.63	76.76	22.91	0.33	50.72	49.28	0.00	42.84	54.38	2.78
<b>GFT-67</b>	93.01	6.99	45.40	53.96	0.64	42.79	57.21	0.00	29.70	67.72	2.58
<b>Fbleau-589</b>	79.51	20.49	82.31	17.58	0.10	71.89	28.11	0.00	65.12	34.26	0.63
<b>GFT-78</b>	84.43	15.57	72.72	27.00	0.28	68.66	31.34	0.00	65.23	34.43	0.34
<b>Fbleau-413</b>	26.26	73.74	43.27	55.74	0.99	36.43	63.57	0.00	34.22	63.44	2.34
<b>TL45</b>	84.45	15.55	58.48	40.78	0.74	52.43	47.57	0.00	52.58	46.47	0.95
<b>Moyenne</b>	<b>70.81</b>	<b>29.19</b>	<b>43.75</b>	<b>55.05</b>	<b>1.20</b>	<b>38.67</b>	<b>55.59</b>	<b>5.74</b>	<b>405.08</b>	<b>1040.69</b>	<b>2945.63</b>
<b>Médiane</b>	<b>81.30</b>	<b>18.70</b>	<b>44.34</b>	<b>54.85</b>	<b>1.01</b>	<b>42.79</b>	<b>53.51</b>	<b>0.00</b>	<b>29.70</b>	<b>58.14</b>	<b>3.57</b>

Tableau XV. Proportions de surfaces classées selon la classification orientée objet couplée au MNC, par parcelles, selon différentes tailles de zones tampons.

On voit que les proportions sont plus proches des résultats obtenus à partir du MNC : pour une zone de 10 ha étudiée autour des placettes, la surface moyenne classée en trouées est de 29% avec cette classification, ce qui se rapproche des 25% obtenus à partir du MNC seul. Pour une zone d'étude de 400 ha, la surface moyenne classée en trouées (toutes superficies de trouées confondues) est de 71%, ce qui est très proches des 73% de la classification à partir du MNC. Comme précédemment, il y a des variations selon la zone étudiée (tableau XV).

L'intégration du MNC à l'approche orientée objet apporte donc des informations permettant de définir des classes de trouées plus proches de la définition que les classes obtenues uniquement à partir de la classification orientée objet.

#### 4.5. Comparaison des surfaces classées selon les différentes méthodes

La comparaison des surfaces moyennes classées en trouées selon les différentes méthodes pour les différentes tailles de buffers (tableau XVI) montre que les différences sont fortes entre les méthodes pour une même taille de zone d'étude. Par exemple, pour 10 ha étudiés, on constate que le MNC permet de classer en moyenne 25% de la zone en trouée, tandis que la classification orientée objet classe en moyenne en trouée 14% de la zone, et la classification orientée objet couplée au MNC classe 29% de la zone.

%	10 ha			175 ha			300 ha			400 ha		
	MNC	Classif. orientée objet	Classif. orientée objet + MNC	MNC	Classif. orientée objet	Classif. orientée objet + MNC	MNC	Classif. orientée objet	Classif. orientée objet + MNC	MNC	Classif. orientée objet	Classif. orientée objet + MNC
<b>Moyenne</b>	24.5	13.7	29.2	58.9	18.3	56.3	64.8	18.4	61.3	73.1	38.5	70.7
<b>Médiane</b>	19.1	8.5	18.7	58.8	13.7	55.9	64.9	10.9	53.5	76.5	26.1	60.8
<b>Ecart type</b>	25.1	12.6	22.1	26.9	13.8	24.4	27.3	18.0	43.6	24.5	25.5	36.3

Tableau XVI. Comparaison des surfaces moyennes classées selon les différentes méthodes.

#### 4.6. Comparaison à une référence

Le tableau XVII présente les résultats de la comparaison des pourcentages de trouées obtenus par cartographie automatique et par analyse visuelle pour un buffer de 0,15 ha. On voit que la classification orientée objet est celle qui présente en moyenne le moins de différences avec la

photo-interprétation manuelle, alors que les méthodes prenant en compte la hauteur montrent des différences moyennes importantes.

Ces différences étaient néanmoins prévisibles, puisque la photo-interprétation manuelle se base uniquement sur l'aspect des peuplements, car il est difficile d'estimer la hauteur à partir d'une seule orthophoto. .

La classification orientée objet couplée au MNC donne des résultats intéressants, car en plus de prendre en compte la texture de l'image comme le fait la classification orientée objet, elle utilise les valeurs du MNC pour identifier les zones qui nous intéressent. Le seuillage du MNC par hauteur, effectué sur une seule année, ne donne pas d'informations suffisantes pour répondre avec précision à la question posée. Cependant, les classifications effectuées par comparaison de plusieurs MNC donnent eux aussi des résultats prometteurs.

Il est cependant difficile de conclure en ce qui concerne la méthode la plus performante pour répondre à la problématique de l'étude, à savoir l'identification de trouées mesurant moins de 15 m de hauteur, d'une surface supérieure à 0,15 ha et de plus de 10 m de large, en l'absence d'une cartographie de référence fiable. Si l'on considère que la référence est la photointerprétation manuelle, alors aucune des trois méthodes testées ici ne produit de résultat satisfaisant.

Cela est peut-être dû au choix du seuil de hauteur de 15 m, et non aux protocoles d'analyse d'images en eux-mêmes.

	Photo- interprétation manuelle	MNC avec élimination surfaces < 0.15 ha		Classification orientée objet		Classification orientée objet + MNC	
	surfaces classées (m <sup>2</sup> )	surfaces classées (m <sup>2</sup> )	différence de surfaces classées en m <sup>2</sup> (valeur absolue)	surfaces classées (m <sup>2</sup> )	différence de surfaces classées en m <sup>2</sup> (valeur absolue)	surfaces classées (m <sup>2</sup> )	différence de surfaces classées en m <sup>2</sup> (valeur absolue)
<b>GFT13</b>	0,0000	0,0000	0,0000	5269,5532	5269,5532	5128,8388	5128,8388
<b>GFT94</b>	0,0000	712,4288	712,4288	3275,6682	3275,6682	2279,4839	2279,4839
<b>CB14</b>	27569,7041	22370,2646	5199,4395	28056,8101	487,1061	31770,3073	4200,6032
<b>CB33</b>	4486,1446	71242,8808	66756,7362	24638,7216	20152,5770	72516,0825	68029,9379
<b>CB51</b>	0,0000	34054,0970	34054,0970	34608,1465	34608,1465	47014,3560	47014,3560
<b>CB39</b>	0,0000	52719,7318	52719,7318	37029,2926	37029,2926	61403,5983	61403,5983
<b>TL43</b>	0,0000	0,0000	0,0000	1566,6239	1566,6239	10970,0164	10970,0164
<b>GFT124</b>	2910,1448	28069,6950	25159,5502	5981,6550	3071,5102	34477,1944	31567,0496
<b>GFT59</b>	0,0000	4987,0017	4987,0017	12390,5710	12390,5710	15671,4520	15671,4520
<b>Fbleau-420</b>	6642,0770	47020,3013	40378,2243	7263,4382	621,3611	37184,0816	30542,0046
<b>Fbleau-374</b>	2439,8994	2422,2579	17,6415	6836,1771	4396,2777	8263,1292	5823,2298
<b>Fbleau-604</b>	0,0000	14676,0334	14676,0334	1993,8850	1993,8850	12537,1616	12537,1616
<b>Fbleau-333</b>	0,0000	23225,1791	23225,1791	5127,1328	5127,1328	17381,0650	17381,0650
<b>Fbleau-273</b>	0,0000	52149,7887	52149,7887	8972,4824	8972,4824	47584,2270	47584,2270
<b>GFT-21</b>	0,0000	0,0000	0,0000	7833,1196	7833,1196	8548,0647	8548,0647
<b>GFT-67</b>	0,0000	5271,9732	5271,9732	4557,4514	4557,4514	6980,9195	6980,9195
<b>Fbleau-589</b>	0,0000	27927,2093	27927,2093	1281,7832	1281,7832	20372,8876	20372,8876
<b>GFT-78</b>	0,0000	5556,9447	5556,9447	14669,2967	14669,2967	15528,9843	15528,9843
<b>Fbleau-413</b>	23477,1264	78937,1119	55459,9855	29908,2748	6431,1483	72801,0180	49323,8916
<b>TL45</b>	0,0000	427,4573	427,4573	2136,3053	2136,3053	15528,9843	15528,9843

Tableau XII. Comparaison des surfaces classées en trouées selon les différentes méthodes de classification et selon la photo-interprétation manuelle. Surligné : les parcelles pour lesquelles une photointerprétation manuelle des zones en trouées a été faite.

# Chapitre 5 : Discussion

## 1. Définition de la trouée

La définition de la trouée arrêtée pour l'étude a posé certains problèmes au cours de ce travail.

Le choix d'un seuil de hauteur de 15 m : dans les peuplements étudiés, lorsque les arbres atteignent 10 à 12 m de hauteur, la canopée est souvent quasiment refermée, et il n'y a plus de trace d'une trouée ayant existé. De plus, il est délicat, de définir une zone en trouée ou en peuplement fermé pour les valeurs intermédiaires de hauteurs (12 – 18 m).

De plus, ce seuil peut varier au sein d'une même forêt selon les stations et les essences étudiées. Pour une même essence mais différentes classes de fertilité, la croissance des arbres ne sera pas la même, et donc la vitesse de fermeture de la trouée variera.

Enfin, dans les peuplements lâches présentant des arbres isolés, les logiciels ont souvent des difficultés à isoler les arbres et classent donc toute la parcelle en trouée.

Ce seuil de hauteur serait donc à revoir au cas par cas, en fonction du taux de croissance des arbres selon les forêts, ou serait à descendre de façon drastique si l'on veut avoir un seuil applicable à toute la France, par exemple en prenant 2 ou 5 m de hauteur maximale pour définir une trouée, comme cela a été fait dans d'autres études. Notre hypothèse de départ, à savoir que 15 m de hauteur (soit la moitié de la hauteur dominante pour les peuplements étudiés) était un seuil de hauteur convenable s'est donc révélée erronée.

La largeur minimale de 10 m, définie pour éviter de classer en « trouée permanentes » les routes forestières, n'a également pas permis la classification que nous aurions souhaité, car le massif de Fontainebleau est parcouru par de nombreuses routes dont la largeur est bien supérieure à 10 m : routes nationales (N6, N7, N152...), départementales (D116, D138, D409...) et même une autoroute (A6). Toutes ces routes ont donc été classées comme étant des trouées permanentes, ce qui n'est pas pertinent pour notre étude. Une solution à ce problème serait de se procurer les cartes des routes (produits Route120® ou Route500® chez l'IGN, par exemple) et de créer un masque afin d'éliminer l'emprise des routes de l'image à analyser.

## **2. Apports méthodologiques**

### **2.1. Mise au point de protocole pour l'étude des hauteurs d'arbres en forêt**

Ce stage a permis de tester plusieurs approches pour l'étude des hauteurs d'arbres en forêt, et la méthode d'identification de la trouée qui semble la plus efficace (classification orientée objet couplée au MNC) pourra donc être appliquée à d'autres massifs du projet. Il faudra néanmoins procéder à des ajustements, car la forêt de Fontainebleau est située en plaine, et nous n'avons pas encore testé les méthodes en zones de montagne, où la pente peut provoquer des erreurs d'appréciation des hauteurs d'arbres. Le protocole mis au point lors du stage est donc valable, en l'absence de tests et de validation en montagne, uniquement pour des zones de plaines ou à relief doux.

### **2.2. Test de plusieurs méthodes d'identification des trouées**

Les méthodes d'identification des trouées testées lors de ce stage ont permis de mettre en évidence les temps de traitements ou encore les durées de préparation des données préalables au travail d'analyse qui devront être pris en compte pour une utilisation à large échelle.

En effet, la classification orientée objet, couplée ou non au MNC, est une méthode intéressante mais nécessitant des temps de calculs extrêmement longs. Ce critère peut être un facteur important dans le cas où de grandes zones seraient à étudier, auquel cas un ordinateur plus puissant que celui dont nous disposons pour le stage pourrait s'avérer nécessaire.

### **2.3. Validité du MNT réalisé à partir de photos d'hiver**

La génération d'un MNT à partir de photos d'hiver est possible pour les sites dont les peuplements sont en majorité ou en totalité caducifoliés. Dans des zones de peuplements résineux l'acquisition de photos d'hiver ne permettra pas de voir le sol, à l'exception de certaines essences de résineux comme les mélèzes, qui perdent leurs feuilles en hiver. En zone de montagne ou dans les régions de plaines où les plantations résineuses sont nombreuses, cette

méthode semble donc compromise, et il faudra se procurer un MNT auprès d'autres sources, comme l'IGN par exemple. Cependant, le MNT de l'IGN a une résolution de 50 m, ce qui est insuffisant pour notre étude. D'autres résolutions existent, mais ces données coûtent cher. Une solution envisageable sur de petites zones serait de numériser les courbes de niveau afin de les utiliser comme référence.

### 3. Validation terrain

Lors de la récolte de données sur le terrain, nous avons rencontré plusieurs types de difficultés, dont il est bon de tenir compte. Tout d'abord, le MNC valide le plus récent que nous ayons étant celui de 2000, il y a un décalage de 10 ans entre les hauteurs estimées et les hauteurs mesurées, qui datent de 2010. Il faut donc tenir compte de la croissance des arbres, qui sur des arbres adultes n'est cependant pas aussi spectaculaire que sur de jeunes arbres. A titre d'exemple, les tables de croissance pour du chêne, dans une classe de fertilité « bonne », donnent une augmentation moyenne de la hauteur de 4,50 m entre 25 et 35ans, alors que la croissance est de 1,50 m entre 85 et 95 ans. On aura donc pu mesurer des arbres de plus de 15 m en 2010 qui ont été classés comme trouées en 2000 car ils mesuraient moins de 15 m.

Les relevés terrain ont été répartis sur deux jours, avec utilisation d'un GPS différent entre les deux journées de relevés. Le GPS utilisé le premier jour n'a pas fait preuve d'une précision suffisante, nous indiquant un décalage allant jusqu'à 80 m. Pour les transects 1, 5, 6, 10, 11 et 12 concernés, les données extraites du MNC pour évaluer sa qualité, basées sur les coordonnées GPS des points pris sur le terrain, peuvent ne pas correspondre aux points mesurés, ce qui expliquerait en partie la mauvaise corrélation entre le MNC de 2000 et les hauteurs mesurées.

Enfin, l'identification des trouées sur le terrain n'est pas une chose aisée, car le seuil de hauteur de 15 m est difficile à apprécier à l'œil nu, et des trouées anciennes en train de se fermer sont donc délicates à identifier. De même, les limites de trouées sont difficilement définissables, car si l'on voit bien les abords immédiats de la trouée, il peut y avoir des arbres inférieurs à 15m un peu en retrait, que l'on ne verra pas et donc que l'on n'inclura pas dans la trouée, alors qu'ils auraient dû en faire partie d'après notre définition.

## 4. Avantages et inconvénients des méthodes utilisées - Problèmes rencontrés

### 4.1. Temps de préparation et de traitement des données

La classification orientée objet, couplée ou non au MNC nécessite des temps de calculs extrêmement longs (cependant moins longs que si nous avions eu à réaliser une photointerprétation manuelle), en particulier pour la segmentation des images: de 30min pour les plus petites zones à 1h45min pour les zones les plus grandes. Ces temps étaient peut-être dûs à la configuration matérielle de l'ordinateur dont nous disposions, car le processeur était un simple coeur (Pentium® 4, CPU 3,00 Ghz – single core), mais la mémoire disponible était assez conséquente (RAM : 3, 25 Go, disque dur de stockage de données : 250 Go). Un processeur plus récent et plus puissant permettrait de réduire les temps de calcul. Un processeur double cœur (dual core) pourrait également permettre une diminution des temps de traitements en permettant de lancer plusieurs classifications en parallèle.

La classification d'après les MNC demande moins de puissance de calcul, mais la préparation des données nécessaire au calcul des MNS est longue et doit être faite de manière soignée afin d'obtenir de bons résultats par la suite. Ce temps est également nécessaire pour préparer les orthophotos utilisées dans l'approche orientée objet. En moyenne, pour réaliser les opérations nécessaires à l'obtention d'un MNC, il faut compter deux jours, mais cette durée varie selon le nombre de photos composant le bloc de données. Par exemple, pour un bloc comportant 3 images, la génération du MNS et l'orthorectification prendra une journée de travail (si l'on ne rencontre aucun imprévu), mais l'on pourra avoir besoin de 3 jours de travail pour un bloc comportant 12 images. Une fois le calage des blocs réalisés, les traitements postérieurs permettant de corriger le MNS puis d'en déduire le MNC ne prennent que peu de temps (entre une demi-heure et une heure), l'opération la plus longue étant la création de l'arbre de décisions dans le Knowledge Engineer d'Erdas® puis la génération des cartes de trouées (entre une heure et une demi-journée de travail selon le nombre de MNC pris en compte pour la carte).

La prise en compte des temps nécessaires à la préparation des données ou à la classification orientée objet est donc indispensable pour obtenir le meilleur compromis possible entre la qualité de l'analyse et le temps nécessaire pour l'obtenir.

## 4.2. Différences de radiométrie sur les images

Des différences de radiométrie des images orthorectifiées persistant sur les mosaïques créées, des problèmes se sont posés pour la classification orientée objet. Les paramètres de cette classification étant basés sur la couleur des pixels, les seuils définis pour une image n'étaient pas exactement les mêmes que pour l'image voisine, ce qui a conduit à des différences dans la classification à l'intérieur d'une même image. Ces différences sont plus ou moins nettes selon la que les variations entre deux images sont plus ou moins fortes.

Pour résoudre ce problème, une correction radiométrique pourrait être effectuée sur les images avant le mosaïquage, ce qui permettrait une homogénéisation des couleurs et donc de la classification orientée objet.

## 4.3. Problèmes non résolus

Nous nous sommes trouvés face à deux problèmes que nous n'avons pu résoudre au cours de ce stage : les campagnes de 1949 et de 2003 n'ont pas pu être orthorectifiées, pour des raisons différentes.

Pour la campagne de 1949, la plus ancienne dont nous disposons, un décalage avec la Bd Ortho® persistait malgré l'ajout de nombreux points de contrôle et différentes tentatives d'amélioration du projet (vérification des marques fiduciaires et des paramètres de la caméra). Les données sont donc inutilisables pour une comparaison avec les autres années, car sans superposition des MNC et des orthophotos, aucun traitement n'est possible. Christian Piedallu, ingénieur à l'INRA de Nancy ayant déjà travaillé avec des photos aériennes de ce type, nous a proposé une solution qu'il a déjà mise en application lors d'une étude précédente. Cette solution consiste à, d'une part, sur-échantillonner les GCP (30 au moins par photos, bien répartis, sauf dans les angles), et d'autre part, ne conserver que le centre des photos en jouant sur la partie redondante entre 2 photos voisines (ce qui revient à éliminer les angles qui sont les plus déformés). Cependant, il précise (C. Piedallu, comm.pers.) que « cette solution permet d'obtenir des erreurs acceptables bien que localement fortes (entre 10 et 40 mètres en moyenne). L'erreur provient en effet du matériel photo de l'époque qui n'était souvent pas calibré et plus déformant que le matériel actuel (le certificat de calibration est souvent quasi inexistant). » Cette solution n'a pas été mise

en application, car elle ne permettait pas d'avoir une orthophoto superposable aux autres campagnes, ce qui n'était pas intéressant pour notre étude.

La campagne de 2003 n'a pas pu être orthorectifiée, malgré des efforts répétés (amélioration du projet, placement de GCP supplémentaires...). Une explication possible est que les images fournies sont en format numérique (et pas en photos argentiques numérisées) et que les informations fournies par le certificat de calibration ne correspondaient pas exactement à ce dont avait besoin le logiciel pour procéder à une orthorectification. A ce jour, nous ne savons toujours pas précisément pourquoi ce projet ne donne pas les résultats espérés.

# Chapitre 6 : Conclusion.

## 1. Validation de la méthode

Les différentes méthodes testées ont permis de mettre au point un protocole pour l'analyse des trouées en forêt. Ce protocole pourra être suivi par de multiples opérateurs, car la façon de procéder est longue mais peu compliquée à mettre en œuvre en ce qui concerne la génération de MNC et d'orthophotos. A partir des photos aériennes, la génération d'un MNS, d'orthophotos et le calcul d'un MNC permettent donc de procéder à la cartographie des trouées, soit par analyse des hauteurs soit par classification orientée objet couplée au MNC.

La classification la plus efficace est celle obtenue par analyse d'image orientée objet couplée à un Modèle Numérique de Canopée. Néanmoins, celle-ci demande du temps car l'adaptation des règles de décision est une tâche longue et complexe, qui demande une bonne maîtrise du logiciel Definiens®. Cette maîtrise ne peut s'acquérir qu'après plusieurs semaines voire plusieurs mois de travail. De plus, l'analyse des images (basée sur la radiométrie et la texture) est longue. Cette méthode, bien que plus précise, n'est peut-être pas aussi simplement transférable que la photogrammétrie et l'étude des MNC.

La comparaison de MNC de différentes années permet d'obtenir des cartes de trouées classées par types ou par dates d'apparition relativement précises.

Toutes ces méthodes de classification nécessitent néanmoins une validation à partir de données terrain, afin de vérifier la corrélation entre les hauteurs estimées par les modèles et les hauteurs réelles.

## 2. Transférabilité de la méthode : quelle possibilité d'application à d'autres massifs forestiers ?

Cette méthode, testée sur un massif de plaine, est potentiellement transférable à d'autres zones d'études, mais cela doit être testé et vérifié, en particulier en zone de montagne, où la pente peut rendre délicate l'estimation des hauteurs. Des massifs de ce type (Ventron, A) font partie du projet GNB, et sont donc de nouvelles zones d'études potentielles pour tester ce protocole d'identification des trouées en forêt.

# Liste des références bibliographiques

## Ouvrages :

BOUREAU J. *Manuel d'interprétation des photographies aériennes infrarouges. Application aux milieux forestiers et naturels*. [s.l.] : Inventaire Forestier National, 2008. 267 p.

## Publications :

BARDEN. « Repeatability in Forest Gap Research: Studies in the Great Smoky Mountains ». *Ecology*, 1989, Vol. 70, n°3, p. 558-559.

BOLDUC P., LOWELL K., EDWARDS G. « Automated estimation of localized forest volume from large-scale aerial photographs and ancillary cartographic information in a Boreal forest ». *International Journal of Remote Sensing*, 1999, Vol. 20, n°18, p. 3611-3624.

BONIN. « Définition et identification d'objets sur une image à haute résolution spatiale. Application à la différenciation de types de châtaigneraies ». *Ingénieries - E A T*, Septembre 2001, n°27, p. 37-44.

BOUREAU, DESHAYES. « Méthodes d'inventaire et de cartographie des accrus forestiers ». *Ingénieries - E A T*, 1999, n° spécial Boisements naturels des espaces agricoles en déprise, p. 151-161.

BROKAW N.V.L. « The Definition of Treefall Gap and Its Effect on Measures of Forest Dynamics ». *Biotropica*, Juin 1982, Vol. 14, n°2, p. 158-160.

CALLAWAY R., DAVIS F. « Vegetation dynamics, fire, and the physical environment in coastal central California ». *Ecology*, 1993, Vol. 74, n°5, p. 1567-1578.

CARMEL Y., KADMON R. « Computerized classification of Mediterranean vegetation using panchromatic aerial photographs ». *Journal of Vegetation Science*, 1998, Vol. 9, n°3, p. 445-454.

DIRZO R., GARCIA M. « Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical area in southeast Mexico ». *Conservation Biology*, 1992, Vol. 6, n°1, p. 84-90.

FENSHAM R., FAIRFAX R. « Aerial photography for assessing vegetation change: A review of applications and the relevance of findings for Australian vegetation history ». *Australian Journal of Botany*, 2002, Vol. 50, n°4, p. 415-429.

FENSHAM R., FAIRFAX R., HOLMAN J., WHITEHEAD P. « Quantitative assessment of vegetation structural attributes from aerial photography ». *International Journal of Remote Sensing*, 2002, Vol. 23, n°11, p. 2293-2317.

FENSHAM R., FAIRFAX R. « Effect of photoscale, interpreter bias and land type on woody crown-cover estimates from aerial photography ». *Australian Journal of Botany*, 2007, Vol. 55, p. 457-463.

FUJITA T., ITAYA A., MIURA M., MANABE T., YAMA S. « Long-Term Canopy Dynamics Analysed by Aerial Photographs in a Temperate Old-Growth Evergreen Broad-Leaved Forest ». *Journal of Ecology*, Août 2003, Vol. 91, n°4, p. 668-693.

HALL F., BOTKIN D., STREBEL D., WOODS K., GOETZ S. « Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing ». *Ecology*, 1991, Vol. 72, n°2, p. 628-640.

HERWITZ S., SANDLER B., SLYE R. « Twenty-one years of crown area change in the Jasper Ridge Biological Preserve based on georeferenced multitemporal aerial photographs ». *International Journal of Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, n°1, p. 45-60.

JOHNSON A., EBERT S., MURRAY A. « Land cover change and its environmental significance in the Herbert River catchment, North-east Queensland ». *Australian Geographer*, 2000, Vol. 31, n°1, p. 75-86.

KADMON R., HARARI-KREMER R. « Studying long-term vegetation dynamics using digital processing of historical aerial photographs ». *Remote Sensing of Environment*, 1999, Vol. 68, n°2, p. 164-176.

KENNEDY R.E., COHEN W.B., TAKAO G. « Empirical methods to compensate for a view-angle-dependent brightness gradient in AVIRIS imagery ». *Remote Sensing of Environment*, Décembre 1997, Vol. 62, n°3, p. 277-291.

MORSE B., KULMAN H. « Plantation white spruce mortality: estimates based on aerial photography and analysis using a life-table format. ». *Canadian Journal of Forest Research*, 1984, Vol. 14, n°2, p. 195-200.

MURAZ, DURRIEU, LABBÉ, ANDRÉASSIAN, TANGARA. « Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG? ». *Ingénieries - E A T*, 1999, n°20, p. 39-58.

MURTHA P. « Some air-photo scale effects on Douglas-fir damage type interpretation. ». *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1983, Vol. 49, n°3, p. 327-335.

NULL W.S. « Photographic interpretation of canopy density - a different approach ». *Journal of Forestry*, 1969, Vol. 67, p. 175-177.

ROBBEZ-MASSON J., WASSENAAR T., ANDRIEUX P., BARET F. « Reconnaissance par télédétection rapprochée des vignes et analyse de leur structure spatiale à l'aide d'une analyse fréquentielle intra-parcellaire. Application au suivi des effets des pratiques culturales ». *Ingénieries - E A T*, 2001, Vol. 27, p. 44-55.

RUNKLE J. « Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America. ». *Ecology*, 1982, Vol. 63, n°5, p. 1533-1546.

RUNKLE J. *Guidelines and sample protocol for sampling forest gaps*. [s.l.] : Portland, Oregon: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station., 1992.

TANAKA, NAKASHIZUKA. « Fifteen years of canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest, Japan ». *Ecology*, Mars 1997, Vol. Vol.78, n°2, p. 9 pages (p.612).

TAYLOR J., BREWER T., BIRD A. « Monitoring landscape change in the National Parks of England and Wales using aerial photo interpretation and GIS ». *International Journal of Remote Sensing*, 2000, Vol. 21, n°13-14, p. 2737-2752.

TUELLER P., LENT P., STAGER R., JACOBSEN E., PLATOU K. « Rangeland vegetation changes measured from helicopter-borne 35-mm aerial photography ». *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1988, Vol. 54, n°5, p. 609-614.

VÉGA, ST-ONGE. « Mapping site index and age by linking a time series of canopy height models with growth curves ». *Forest Ecology and Management*, 2009, Vol. 257, n°3, p. 951-959.

VEPAKOMMA, ST-ONGE, KNEESHAW. « Spatially explicit characterization of boreal forest gap dynamics using multi-temporal lidar data ». *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 112, n°5, p. 2326-2340.

ZEIBIG, DIACI, WAGNER. « Gap disturbance patterns of a *Fagus sylvatica* virgin forest remnant in the mountain vegetation belt of Slovenia ». *For.Snow.Landsc.Res.*, 2005, Vol. 79, n°1, p. 69-80.

### **Documents électroniques :**

Le Cemagref : <http://www.cemagref.fr/le-cemagref>

L'UMR TETIS : <http://tetis.teledetection.fr/>

La MTD : <http://www.teledetection.fr>

CENTRE CANADIEN DE TÉLÉDÉTECTION. *Notions fondamentales de télédétection*. Disponible sur :  
< [http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals\\_f.pdf](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_f.pdf)

NIWA Y. *Creating orthorectified aerial photography without a camera calibration report*. ESRI Japan. Disponible sur : [http://support.erdas.com/focus3/files/Aerial\\_photo.pdf](http://support.erdas.com/focus3/files/Aerial_photo.pdf)