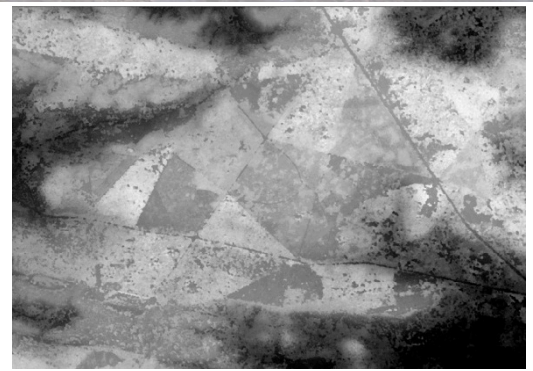




# Suivi de la dynamique temporelle du couvert forestier par analyse photogrammétrique

Carole MADIOU



SYSTEMES  
D'INFORMATIONS  
LOCALISÉES  
POUR  
L'AMÉNAGEMENT  
DES TERRITOIRES

**Commanditaires :** Sylvie DURRIEU (Irstea – UMR TETIS)

Frédéric GOSSELIN (Irstea - UR Ecosystèmes forestiers)

**Tuteur SILAT :** Catherine MAZZONI (SupAgro – UMR ITAP)

**Rapporteurs :** Jean-Pierre CHERY (AgroParisTech – UMR TETIS)

Sylvain LABBE (Irstea – UMR TETIS)

Septembre 2012



# LETTRE DE MISSION

Commanditaire	Tutrice	Auditeur
Sylvie DURRIEU Irstea UMR-TETIS ☎ : 04 67 54 87 32 <a href="mailto:Sylvie.durrieu@teledetection.fr">Sylvie.durrieu@teledetection.fr</a>	Catherine MAZZONI Montpellier SupAgro UMR-ITAP ☎ : 04 99 61 27 72 <a href="mailto:mazzoni@supagro.inra.fr">mazzoni@supagro.inra.fr</a>	Carole MADIOU Mastère spécialisé SILAT ☎ : 06 11 52 02 20 <a href="mailto:carole.madiou@wanadoo.fr">carole.madiou@wanadoo.fr</a>

## Organisme client

L'Irstea<sup>1</sup> est un institut français de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture. Il est associé au Cirad et à AgroParisTech au sein de l'Unité Mixte de Recherche TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale), à Montpellier, qui a pour mission de développer les activités de recherche, de formation et d'appui sur la maîtrise de l'information spatiale pour la connaissance et la gestion des milieux et des territoires.

## Contexte et objectifs de la mission

L'UMR TETIS associée au projet GNB<sup>2</sup> et au projet FORESEE<sup>3</sup> étudie la possibilité de suivre l'évolution de la structure de la végétation forestière par photogrammétrie.

Dans ce cadre, à compter du 2 avril et jusqu'au 28 septembre 2012, Carole MADIOU aura pour mission de mettre en place une méthode de production par photogrammétrie de séries temporelles de modèles numériques de surface et d'évaluer le potentiel de ces séries temporelles pour caractériser la dynamique de la croissance et de la structure des peuplements forestiers dans le contexte de (1) l'évaluation des indices de fertilité stationnelle en forêt (projet FORESEE) et (2) l'évaluation de l'impact sur la biodiversité de la dynamique des perturbations forestières (trouées). Pour ce faire des séries temporelles de photos stéréoscopiques sont acquises pour générer des séries temporelles de modèles numériques de surface. Ces séries seront analysées en relatif (suivi de l'évolution des altitudes données par les MNS) ou en absolu si un MNT suffisamment précis est disponible (suivi de l'évolution des hauteurs des peuplements forestiers). La qualité des mesures de l'évolution des hauteurs sera évaluée. Dans cette mission l'encadrement technique sera assuré via les compétences des acteurs des projets partenaires et celles des personnels de l'UMR TETIS mais également par des formations spécifiques en cas de besoins particuliers.

## Livrables

- Guide méthodologique pour calculer les MNS par photogrammétrie sur photographies acquises par caméra numérique, par chambres photogrammétriques récentes et anciennes.
- Projet GNB :
  - Création de séries temporelles sur un site d'étude à Fontainebleau (77), voire sur un 2<sup>e</sup> à Engins-Autrans (38) suivant le temps imparti.
  - Analyse de ces séries temporelles.
  - Qualification d'un certain nombre de produits dérivés pour les 2 sites.
- Projet FORESEE : selon l'évolution du projet et l'avancement des travaux dans le cadre du projet GNB, le travail pourra consister (1) en la simple mise à disposition du guide méthodologique assorti d'une évaluation de la précision des produits obtenus par photogrammétrie, (2) au transfert de compétences à un post-doctorant INRA, partenaire du projet et (3) au traitement de quelques couples stéréoscopiques en complément des traitements réalisés par l'IGN et l'INRA.
- Rapport présentant les travaux réalisés.

## Interlocuteurs

**Irstea Nogent-sur-Vernisson** : Frédéric Gosselin, Marion Gosselin, Hilaire Martin, Yoan Paillet. **Irstea Grenoble** : Thomas Cordonnier, Marc Fuhr, Vincent Breton. **FCBA** : Francis de Morogues. **INRA** : Laurent Saint André. **ONF** : Anne Jolly, Jean-Pierre Renaud, Jérôme Bock. **IGN** : Clément Mallet, Nicolas Papparditis. **ANDRA** : Sébastien Conil.

## Clauses de confidentialité

Aucune.

Signature commanditaire

Signature auditeur

<sup>1</sup> Irstea depuis le 01/01/2012, auparavant Cemagref.

<sup>2</sup> Projet GNB : Gestion, Naturalité et Biodiversité (<https://gnb.cemagref.fr/>).

<sup>3</sup> Projet FORESEE : Forest resource estimation for Energy, projet ANR BioEnergie (<http://www.fcba.fr/foresee/>).

## **SIGLES ET ABBREVIATIONS**

ANDRA : Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs

ATTOS : Acquisition, Télédétection, Traitement et Observations Spatiales

Cirad : Institut français de recherche agronomique au service du développement des pays du Sud et de l'outre-mer français

FCBA : Forêt, Cellulose, Bois-construction, Ameublement

FORESEE : Forest Resource Estimation for Energy

GCS : Geographic Coordonate System

GNB : Gestion, Naturalité et Biodiversité

IGN : Institut National de l'information Géographique et Forestière

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

Irstea : Institut national de Recherche en science et technologies pour l'environnement et l'agriculture (auparavant Cemagref)

Lidar : Light Detection And Ranging

LPS : Leica Photogrammetry Suite

MNC : Modèle Numérique de Canopées

MNS: Modèle Numérique de Surface

MNT: Modèle Numérique de Terrain

NTF : Nouvelle Triangulation de la France

ONF : Office National des Forêts

RN : Réserve Naturelle

SILAT : Systèmes d'Informations localisées pour l'Aménagement des territoires

TETIS : Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale

# TABLE DES MATIERES

<b>Lettre de mission .....</b>	<b>2</b>
<b>Sigles et abréviations .....</b>	<b>3</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>4</b>
<b>Table des illustrations .....</b>	<b>6</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>7</b>
I. Contexte de la mission .....	7
II. Objectif de la mission.....	7
III. Intérêt du projet et contraintes de réalisation.....	7
<b>Partie 1- Etat des connaissances .....</b>	<b>9</b>
I. Bibliographie .....	9
II. Expériences acquises.....	9
<b>Partie 2- Matériels et méthodes .....</b>	<b>10</b>
I. Gestion de projet .....	10
II. Données .....	10
II.1. Zone d'étude .....	10
II.2. Données en biodiversité.....	11
II.3. Télédétection.....	11
II.3.1. Photographies aériennes .....	11
II.3.2. Logiciels utilisés .....	11
II.4. Référentiels géographiques .....	12
II.5. Géoréférencement utilisé durant le projet .....	12
III. Méthodologie de création des Modèles Numériques de Surface .....	12
III.1. Méthodologie de création des Modèles Numériques de Surface bruts.....	12
III.1.1. Etapes de création des MNS sous ERDAS LPS 2011 .....	12
III.1.2. Paramètres d'orientation interne et paramètres de calcul des MNS des différents projets LPS ...	12
III.2. Méthode de correction des MNS.....	12
III.2.1. Approche commune aux années 1961, 2000 et 2003 .....	12
III.2.2. Correction particulière pour 1961.....	12
III.2.3. Corrections spécifiques à 1949.....	13
III.2.4. Comparaison entre les MNS obtenus avec l'ancienne version 9.2 d'ERDAS et ceux réalisés avec la nouvelle version 2011 ; le Scan 25 servant de référent .....	13
IV. Elaboration des règles de décision d'évolution de couverts forestiers.....	13
IV.1. Procédure .....	13
IV.2. Test des règles de décision sur 25 zones tampons.....	14

V. Traitement et analyse de l'évolution du couvert forestier sur des placettes GNB positionnées en zones gérées et non gérées .....	14
VI. Schéma synoptique de l'étude .....	15
<b>Partie 3- Résultats</b> .....	<b>16</b>
I. Evaluation des photographies de 1949 et comparaison de deux versions du logiciel ERDAS Imagine <sup>®</sup> et qualité des MNS.....	16
I.1. Résultats du traitement des photos aériennes de 1949.....	16
I.2. Comparaison entre les MNS obtenus avec l'ancienne version 9.2 d'ERDAS et ceux réalisés avec la nouvelle version 2011 ; le Scan 25 <sup>®</sup> servant de référent.....	16
I.3. Qualité des MNS des années 1961, 1987, 2000 et 2003.....	16
II. Elaboration des règles de décision d'évolution de couverts forestiers .....	17
II.1. Analyse de séries temporelles de MNS en relatifs pour l'établissement de règles de décisions pour la classification des évolutions de couverts forestiers.....	17
II.1.1. Types d'évolutions du couvert forestier des 31 zones tampons .....	17
II.1.2. Les méta-classes .....	17
II.2. Analyse spécifique de 6 situations représentatives des cas d'évolutions de couverts forestiers sur le site de Fontainebleau.....	18
II.3. Règles de décision d'évolution de couverts forestiers .....	19
III. Qualification d'un produit dérivé centré sur l'évolution du couvert forestier sur des placettes GNB positionnées en zones gérées et non gérées .....	22
<b>Partie 4- Discussion</b> .....	<b>24</b>
I. Qualité des MNS.....	24
II. Analyse de séries temporelles de MNS pour l'établissement des règles de décision relatives au suivi de l'évolution de couverts forestiers.....	24
III. Qualification d'un produit dérivé : évolution du couvert forestier sur des placettes GNB positionnées en zones gérées et non gérées .....	27
<b>Conclusion et perspectives</b> .....	<b>28</b>
<b>Remerciements</b> .....	<b>30</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>31</b>
<b>Table des annexes</b> .....	<b>34</b>

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

- **Table des figures**

Figure 1 - Diagramme de Gantt relatif à la mission. ....	10
Figure 2- Emprise de la zone d'étude: forêt de Fontainebleau.....	10
Figure 3 – Etapes pour définir les règles de décision d'évolution d'un couvert forestier.....	15
Figure 4 – Règles de décision de suivi d'évolution d'un couvert forestier.....	26

- **Table des graphiques**

Graphique 1- Comparaison des hauteurs issues des MNS élaborés par les versions 9.2 et 10 d'ERDAS Imagine® en référence au Scan25®.....	16
Graphique 2 - Erreur moyenne de chaque MNS / Scan25 en pourcentage.....	17
Graphique 3- Evolution du couvert par classe de hauteurs (point 0). ....	19
Graphique 4- Evolution du couvert au pas de 2,5 m (point 0). ....	19
Graphique 5- Cas de l'ouverture d'une trouée. ....	20
Graphique 6- Cas d'un comblement de trouée. ....	20
Graphique 7- Cas d'une absence d'évolution du couvert forestier.....	20
Graphique 8- Cas d'une trouée en voie de stabilisation.....	21
Graphique 9- Cas d'une trouée étendue. ....	21
Graphique 10- Cas d'une trouée profonde.....	21
Graphique 11 – Trouée superficielle de canopée. ....	22
Graphique 12 - Evolution d'un couvert forestier, sur une période donnée, ouverture de trouée étendue et profonde.....	22
Graphique 13 - Moyennes des évolutions des différentiels de fréquences, par période, sur les zones <u>non gérées</u> .....	23
Graphique 14 – Moyennes des évolutions des différentiels de fréquences, par période, sur les <u>zones gérées</u> . ....	23

- **Table des tableaux**

Tableau 1- Récapitulatif des données optiques à disposition. ....	11
Tableau 2- Liste des logiciels et outils utilisés durant mon projet. ....	11
Tableau 3- Critères de classement en trois méta-classes hauteur. ....	18
Tableau 4- Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 0).....	19
Tableau 5 – Ecart maximums pour les zones gérées et non gérées.....	23
Tableau 6 - Interprétation de l'évolution du couvert forestier par période. ....	23
Tableau 7 – Moyennes des différentiels de fréquences par période en zone <u>non gérée</u> .....	23
Tableau 8 - Moyennes des différentiels de fréquences par période en <u>zone gérée</u> . ....	23

# INTRODUCTION

## I. Contexte de la mission

La présente étude s'insère dans deux projets aux finalités différentes. Le premier intitulé Gestion Naturalité et Biodiversité (GNB) a pour but d'étudier le lien entre biodiversité, exploitation forestière et naturalité en comparant des parcelles exploitées à des parcelles non-exploitées. Le second FORESEE a pour finalité, dans le cadre de son objectif 4, d'évaluer la productivité de la ressource forestière à l'échelle du bassin d'approvisionnement par des mesures directes de croissance et l'utilisation d'indices de fertilité. Pour atteindre ces objectifs respectifs, plusieurs acteurs de ces deux projets ont manifesté le désir d'explorer la possibilité de suivre l'évolution de la structure de la végétation forestière par photogrammétrie. C'est dans cet environnement que s'inscrit ce projet.

L'étude est commanditée par l'Institut français de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea) et ses associés, le Cirad et AgroParisTech, regroupés au sein de l'Unité Mixte de Recherche TETIS (Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale) à la Maison de la Télédétection de Montpellier. La mission de cette unité est de développer les activités de recherche, de formation et d'appui sur la maîtrise de l'information spatiale pour la connaissance et la gestion des milieux et des territoires. C'est dans ce contexte que Sylvie DURRIEU, membre de l'équipe Acquisition, Télédétection, Traitement et Observations Spatiales (ATTOS), représente l'UMR TETIS.

## II. Objectif de la mission

Le commanditaire désire bénéficier d'une méthode de production par photogrammétrie de séries temporelles de Modèles Numériques de Surface (MNS) et de l'évaluation du potentiel de ces séries temporelles pour atteindre certains des objectifs des projets GNB et FORESEE. Le but est de caractériser la dynamique de la structure et la croissance des peuplements forestiers, dans le contexte d'une (1) d'une évaluation de l'impact de la dynamique des perturbations forestières (trouées) sur la biodiversité (projet GNB) et (2) de l'évaluation des indices de fertilité stationnelle en forêt (projet FORESEE).

## III. Intérêt du projet et contraintes de réalisation

A ce jour, deux techniques de télédétection sont plus particulièrement employées pour caractériser la dynamique de la structure de la végétation. Le Lidar (Light detection and ranging) est une technologie récente particulièrement intéressante, car elle permet d'accéder directement à des mesures en 3D sur la végétation. Cependant le coût d'acquisition des données reste élevé et il n'existe pas d'archives de données anciennes ni de couverture exhaustive du territoire national. La seconde technique est la photogrammétrie numérique basée sur l'analyse de photographies aériennes. Moins coûteuse, elle permet aussi, avec les banques de données photographiques, d'avoir des données qui remontent à plusieurs dizaines d'années. Cependant, la photogrammétrie ne donne accès qu'à la géométrie du sursol. Ainsi, pour obtenir la hauteur de la canopée et calculer un Modèle Numérique de Canopée (MNC), il est nécessaire de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) fiable et précis, à soustraire du MNS. Ainsi, dans le cas de la présente étude, le MNT doit être au minimum au pas de 5 m pour répondre aux exigences de précision. Or, peu de forêts sont cartographiées avec cette précision, d'où une difficulté. Si certaines études montrent qu'il est possible de

calculer un MNT de bonne résolution à partir de photos réalisées en hiver (TANAKA et NAKASHIZUKA, 1997), cette approche n'est utilisable que pour les feuillus.

Malgré cette difficulté, le principe à priori d'une entrée par la photogrammétrie semble bien en adéquation avec les contraintes d'analyse temporelle des projets GNB et FORESEE. Mais, au fil de l'étude, il s'est avéré que le parcours était semé d'embûches. En effet, les nombreuses recherches bibliographiques n'ont pas été aussi fructueuses qu'espérées car aucune publication n'aborde les MNC sans se référer à un MNT. En d'autres termes, faute de MNT suffisamment précis, le calcul des MNC pour l'analyse de la canopée est devenu impossible. Aussi, afin de répondre favorablement aux attentes des projets GNB et FORESEE, il a été nécessaire d'imaginer une méthode nouvelle, en y réfléchissant en équipe : plusieurs réunions téléphoniques avec Sylvie DURRIEU, Marion GOSSELIN et Frédéric GOSSELIN ont permis d'explorer différentes pistes de recherche. La réponse est fondée sur les Modèles Numériques de Surface (MNS) et l'analyse d'histogrammes (répartition des pixels d'une surface forestière donnée en classes de hauteurs) dont les différentiels sont calculés à partir de MNS référencés sur deux années différentes.

La partie amont de ce travail, focalisée sur la création et la qualification des MNS, contribue utilement au projet FORESEE en s'inscrivant plus particulièrement dans la tâche 4 - « Dynamique Forestière », dont l'objectif est d'évaluer la productivité de la ressource forestière à l'échelle du bassin d'approvisionnement par des mesures indirectes de croissance et l'utilisation d'indices de fertilité. En effet, malgré un temps important consacré au développement d'une nouvelle approche centrée sur la production de règles de décision de suivi d'évolution de couverts forestiers, un guide méthodologique de génération de MNS sous ERDAS LPS, est livrable.



## Partie 1- Etat des connaissances

### I. Bibliographie

Au regard de l'objectif principal de cette mission, les références bibliographiques à mobiliser relèvent des domaines de l'écologie, de la foresterie et de la télédétection. Mais comme l'espace dans ce rapport est limité à 22 pages la partie bibliographie est déplacée en annexe 1.

### II. Expériences acquises

La présente mission prolonge celle d'Isabelle PINEY (PINEY, 2010), dont les objectifs étaient (i) 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 (ii) de proposer une méthode d'analyse facilement transposable à d'autres sites. Pour atteindre ces objectifs trois approches différentes ont été testées, à savoir (i) l'analyse de hauteurs d'arbres (Modèles Numériques de Canopée ou MNC), (ii) la classification orientée objet, basée sur l'analyse de la radiométrie et de la texture des photographies aériennes orthorectifiées et (iii) l'analyse par classification orientée objet intégrant l'information radiométrique et texturale de l'image, ainsi que l'information sur les hauteurs d'arbres (MNC). Des résultats obtenus, il ressort un certain nombre de difficultés, dont l'emploi de comparaisons « pixels à pixels », de la classification orientée objet basée sur l'analyse de la radiométrie et de la texture des photographies aériennes orthorectifiées, ou encore du couplage entre la classification orientée objet et les informations contenues dans les orthophotographies (texture et radiométrie), ainsi que celles relatives à la hauteur des arbres. Les raisons évoquées dans le rapport sont multiples, ainsi page 41, « *La comparaison des surfaces moyennes classées en trouées selon les différentes méthodes pour différentes tailles de buffers montre que les différences sont fortes entre les méthodes pour une même taille de zone d'étude* ». Ou encore, page 42, « *Si l'on considère que la référence est la photointerprétation manuelle, alors aucune des trois méthodes testées ici ne produit de résultat satisfaisant* ». Enfin, page 46, « *La classification orientée objet, couplée ou non au MNC nécessite des temps de calculs extrêmement longs* ».

Au regard de ces difficultés et des finalités du projet GNB (Gestion, Naturalité et Biodiversité), animé par l'Irstea en partenariat avec l'Office National des Forêts (ONF) et les Réserves Naturelles de France (RN), l'évolution dans le temps du projet initial est recomposée.

C'est ainsi qu'avant de répondre concrètement aux attentes du commanditaire, le retraitement des supports photographiques et des MNS sous la nouvelle version d'ERDAS Imagine® est envisagé. En effet, cette version, à priori plus performante pour le traitement de la photogrammétrie numérique dans des milieux complexes comme la forêt, devrait apporter de nouveaux résultats plus aboutis que les précédents.

## Partie 2- Matériels et méthodes

### I. Gestion de projet

Seul le diagramme de Gantt (Figure 1) relatif à la mission figure dans cette partie. En effet, eu égard à l'espace réduit du rapport, les informations suivantes sont en annexe 13 : la production attendue, les écarts entre les objectifs de départ et les livrables et les différentes tâches réalisées lors du projet.

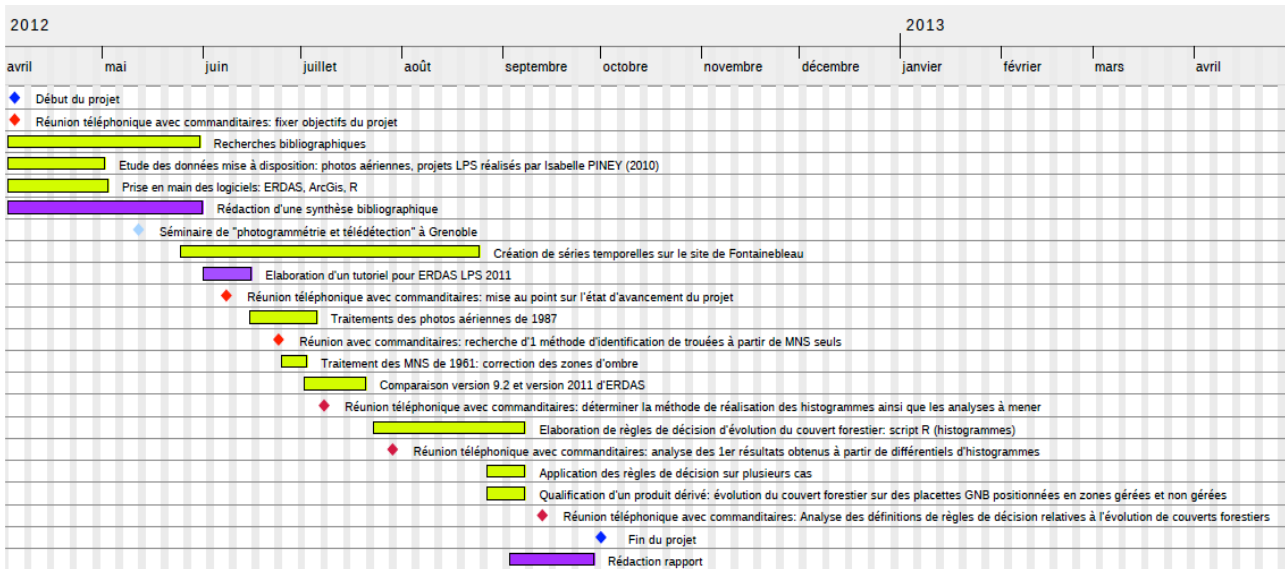


Figure 1 - Diagramme de Gantt relatif à la mission.

### II. Données

#### II.1. Zone d'étude

Au sein du projet GNB plusieurs sites comportent des relevés de biodiversité effectués depuis 2008, mais un seul a été retenu pour cette étude : la forêt domaniale de Fontainebleau (77) située en plaine.

Les limites de la zone d'étude ont été définies par rapport aux données à disposition et à l'emprise commune des MNS calculés. La superficie de cette zone est de 1921 ha (rectangle rose sur la Figure 2).

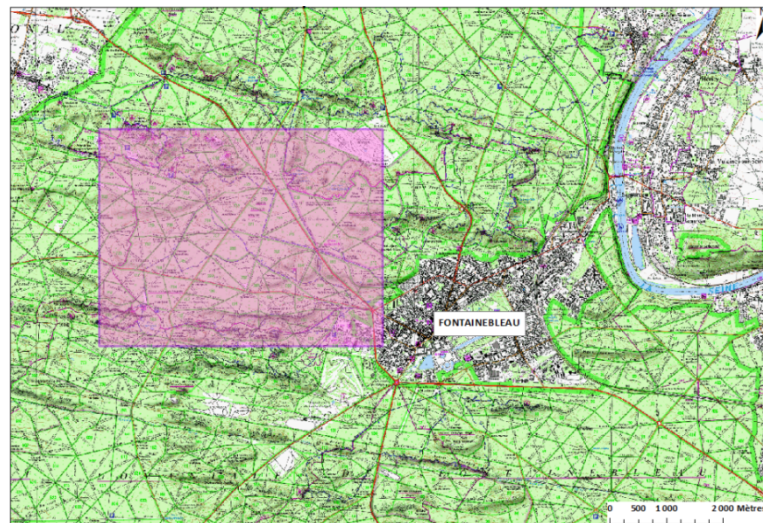


Figure 2- Emprise de la zone d'étude: forêt de Fontainebleau.

## II.2. Données en biodiversité

Les données en biodiversité ne sont pas directement prises en considération dans cette étude. Toutefois il est intéressant, dans le cadre de la problématique globale du projet GNB, de savoir qu'elles sont issues de relevés réalisés sur des placettes de deux types : les unes en forêts exploitées, les autres en réserves biologiques intégrales et de réserves naturelles soustraites à l'exploitation. Dans ce cadre des placettes sont tirées au sort selon un plan d'échantillonnage équitablement réparti entre zones en réserve depuis au moins 20 ans et zones gérées pour la production de bois (l'échantillonnage contrôle le type de station – sol et topographie). Des variables écologiques devaient être acquises par un relevé complet sur le terrain (description du peuplement), sur une surface de 0,1 à 0,5 ha centrée sur la placette. Mais, devant les difficultés à retrouver de l'information historique (cas de propriétés différentes, variabilité de la qualité de l'archivage), il a été décidé de collecter aussi les informations sur l'intensité de perturbation de la canopée par l'analyse de photographies aériennes. C'est sur ce dernier point que s'inscrit le présent travail.

NB : Pour information les relevés de terrain et piégeages effectués (GOSSELIN, 2006) figurent en annexe 2.

## II.3. Télédétection

### II.3.1. Photographies aériennes

Dans le Tableau 1 figurent les données optiques à disposition pour le projet.

Année	Fournisseur	Emulsion	Type
1949	IGN	Noir et blanc	Argentique
1961	IGN	Noir et blanc	Argentique
1987	IGN	Couleur	Argentique
2000 (hiver)	IGN	Noir et blanc	Argentique
2000 (été)	IFN	Infrarouge couleur	Argentique
2003	IGN	Couleur	Numérique

Tableau 1- Récapitulatif des données optiques à disposition.

### II.3.2. Logiciels utilisés

Les logiciels utilisés tout au long du projet, figurent dans le Tableau 2.

Nom du logiciel ou de l'outil	Version	Utilisation
ERDAS Imagine®	2011	Manipuler, exploiter et comprendre les données vecteurs et images dans le but de créer de l'information géographique.
ERDAS LPS® (Leica Photogrammetry Suite)	2011	Outil pour générer des MNT, élaboré à partir des orthophotographies...
ArcGis	10 (2010)	Créer, gérer et exploiter de l'information géographique. Faire des analyses spatiales, afficher des cartes....
R	2.14.0	Effectuer des calculs statistiques.

Tableau 2- Liste des logiciels et outils utilisés durant mon projet.

Au début de la mission, au regard des difficultés rencontrées sous ERDAS LPS®, il avait été question d'utiliser le logiciel « OpenSource » MicMac de l'IGN. Finalement, malgré les avantages de MicMac, notre choix s'est tourné vers ERDAS LPS. Toutefois, pour de plus ample informations une comparaison, faite par JOUANNE (2009), entre ERDAS LPS et MicMac est disponible en annexe 3. En dehors de la comparaison des fonctionnalités de ces deux logiciels le fait que des projets LPS avaient déjà été réalisés par Isabelle PINEY (2010) sur les mêmes années que celles qui figurent dans ce projet ont été un aspect déterminant pour le choix retenu. Par ailleurs la prise en main du logiciel requiert un temps de formation qui n'était pas compatible avec le temps de la mission. Enfin, nous voulions aussi comparer la version 9.2 avec la version 10 d'ERDAS LPS.

#### **II.4. Référentiels géographiques**

Les données topographiques utilisées durant le projet sont :

- Le Scan 25 (1 : 25 000) fournit par l'IGN au format numérique ;
- BD Ortho au format numérique.

#### **II.5. Géoréférencement utilisé durant le projet**

Le géo référencement retenu pour le projet est caractérisé ci-dessous :

- Projection : Lambert Conformal Conic ;
- Système de coordonnées : GSC NTF ;
- Sphéroïde : Clarke 1880 IGN.

### **III. Méthodologie de création des Modèles Numériques de Surface**

#### **III.1. Méthodologie de création des Modèles Numériques de Surface bruts**

##### **III.1.1. Etapes de création des MNS sous ERDAS LPS 2011**

Dans un premier temps, nous avons retraité, sous ERDAS LPS 2011, les projets LPS menés sous une version antérieure par Isabelle PINEY lors de son stage de fin de master 2. Mais, seuls ceux qui avaient à la fois les paramètres des caméras et les points de contrôle et de liaison sont pris en compte dans ce cadre de traitement, à savoir, les projets LPS pour les années 1961, 1987, 2000 et 2003. En résumé les phases principales de génération d'un MNS sous ERDAS LPS sont la prise en compte des formats des photographies aériennes, l'orientation interne avec les informations relatives au calibrage de la caméra, l'orientation externe avec la prise en compte des points de contrôle et de liaison puis, la triangulation pour assurer le géo-référencement du bloc d'images.

Pour l'année 1949, du fait de la mauvaise qualité des photos aériennes, le traitement est repris entièrement avec la nouvelle version d'ERDAS LPS.

##### **III.1.2. Paramètres d'orientation interne et paramètres de calcul des MNS des différents projets LPS**

Les paramètres des différents projets LPS pour l'orientation interne sont résumés dans le tableau en annexe 4. Les paramètres retenus pour générer les MNS se situent en annexe 5.

#### **III.2. Méthode de correction des MNS**

##### **III.2.1. Approche commune aux années 1961, 2000 et 2003**

Les MNS issus du processus photogrammétrique contiennent des artefacts qu'il faut corriger pour améliorer leur qualité. Pour cela, les étapes suivantes sont réalisées sous ERDAS Imagine :

- Identification des valeurs aberrantes grâce à un « model maker » (annexe 6 – figure B).
- Correction des valeurs aberrantes par la moyenne dans une fenêtre 5\*5 (annexe 6 – figure C).

##### **III.2.2. Correction particulière pour 1961**

Sur le MNS de 1961 des problèmes récurrents ont déjà été soulevés par PINEY (2010), à savoir :

- là où le peuplement est peu dense, la surface est interpolée au niveau du sol et cela même aux endroits où quelques arbres sont présents.
- là où le peuplement est dense, le corrélateur interpole par rapport aux niveaux des arbres situés sur des zones de trouées (vraisemblablement une prise en compte erronée des ombres portées).

Aussi, une hypothèse peut être émise que le corrélateur ne trouve pas suffisamment de points homologues au niveau des zones d'ombre (photos aériennes trop lisses et sans texture). D'où parfois des interprétations erronées du MNS. Partant de cette hypothèse et pour la pallier, une correction des zones d'ombre repérées sur les photos aériennes est effectuée sur le MNS de 1961 : la valeur des pixels situés en zone d'ombre est remplacée par la valeur des pixels correspondants du MNT (l'hypothèse faite est que les zones d'ombres sont au niveau du sol). Ce traitement requiert un processus spécifique qui figure en annexe 7.

### **III.2.3. Corrections spécifiques à 1949**

- **Orientation externe** : RMSE triangulation sans correction des photos : 0,8086 ; RMSE triangulation avec correction des photos : 0,8086.
- **Résolution du MNS généré** : 1 m

Pour certains essais une correction est effectuée sur les photos aériennes de base, à savoir l'application de la fonction « focale médian » avec une fenêtre 3\*3 sur toutes les photos aériennes par l'intermédiaire d'un « Model maker » sous ERDAS Imagine.

### **III.2.4. Comparaison entre les MNS obtenus avec l'ancienne version 9.2 d'ERDAS et ceux réalisés avec la nouvelle version 2011 ; le Scan 25 servant de référent**

Les différents MNS obtenus antérieurement par ERDAS LPS (version 9.2) sont comparés avec ceux réalisés par la nouvelle version 2011. Les comparaisons sont faites en prenant les MNS sans correction des valeurs aberrantes pour les deux versions. Pour ce faire des points spécifiques (annexe 16) (au niveau des routes) sont positionnés sur les MNS et l'extraction de leurs valeurs est réalisée pour les différentes années (1961, 1987, 2000 et 2003). Puis, par différence entre les valeurs des points spécifiques des MNS produits avec la version 2011 d'ERDAS Imagine® et ceux produits avec la version 9.2 d'ERDAS Imagine®, les écarts sont calculés. Enfin, les valeurs des points spécifiques des différents MNS et de ceux du Scan 25® (utilisé comme référence) sont comparées afin de mesurer les écarts. A partir de ces résultats un classement des deux versions est obtenu tout en intégrant, à la marge, le rendu des orthophotographies.

## **IV. Elaboration des règles de décision d'évolution de couverts forestiers**

Dans le cadre du projet GNB l'évaluation de l'impact de la dynamique des perturbations forestières (trouées) sur la biodiversité est un des objectifs à atteindre. C'est à ce titre que nous avons construit des règles de décisions pour identifier les évolutions du couvert forestier telles que : absence d'évolution du couvert forestier, ouverture de trouée, trouée étendue, trouée profonde, trouée superficielle de canopée, comblement de trouée, trouée en voie de stabilisation.

### **IV.1. Procédure**

Pour établir des règles de décision d'évolution d'un couvert forestier une approche inductive en 6 étapes a été choisie :

- construire un MNS à partir de chaque orthophotographie selon la procédure décrite en III.1.
- chaque MNS des années 1961, 1987, 2000, 2003, à partir de quelques points positionnés sur zones où le sol est nu et dont l'altitude topographique est connue, est vérifié quant à sa précision des hauteurs calculées afin de les valider pour la suite du processus.
- analyse visuelle des séries d'orthophotographies (1961, 1987, 2000, 2003) pour sélectionner 31 sites (placettes circulaires de rayon 25 m soit 0,2 ha) représentatifs des différentes situations de création ou de comblement de

trouées sur une portion de la forêt de Fontainebleau (annexe 8). Une typologie des types d'évolutions est définie. Six sites, représentant la gamme des situations rencontrées sur ce massif, sont analysés pour construire les règles de décision d'évolution. Les 25 sites restants sont utilisés pour tester la validité des règles de décision.

- élaboration des règles de décision sur 6 sites :
  - à l'intérieur de chaque zone de 0,2 ha, les valeurs numériques du MNS (correspondant à la hauteur absolue de la canopée) alimentent un histogramme de la répartition de ces valeurs en classes de hauteurs (annexe 9). L'histogramme est réalisé sous le logiciel R à l'aide d'un script (annexe 19).
  - le calcul, pour chaque classe de hauteur, de la différence de nombre de pixels entre les histogrammes de deux MNS successifs permet de calculer un nouvel histogramme dénommé « histogramme différentiel d'évolution de couvert ».
  - l'analyse des « histogrammes différentiels d'évolution de couvert » doit permettre la définition des règles de décision concernant la création ou non de trouée ou du comblement.

L'évolution du couvert forestier est plus particulièrement analysée en prenant en considération les trouées avec leurs aspects spatiaux et temporels.

#### **IV.2. Test des règles de décision sur 25 zones tampons**

Les règles de décision ont ensuite été appliquées sur les 25 autres zones (annexe 22), afin de voir si elles permettent effectivement de détecter les différentes situations d'évolution de couverts forestiers telles qu'elles ont été analysées auparavant, par photo-interprétation visuelle des orthophotographies. Enfin, dans la mesure où les réponses étaient satisfaisantes sur la totalité des zones, les règles de décision définissant des types d'évolution de couverts forestiers ont été arrêtées. C'est ainsi qu'un recueil de données a été réalisé pour les trois périodes de référence que sont 1961-1987, 1987-2000 et 2000-2003. Les règles de décision caractérisant le couvert forestier devraient alors être transférables pour des analyses ultérieures de zones tampons.

### **V. Traitement et analyse de l'évolution du couvert forestier sur des placettes GNB positionnées en zones gérées et non gérées**

Autour de chaque point GNB géolocalisé sur les MNS des années 1961, 1987, 2000 et 2003 (annexe 10) une zone circulaire de 0,2 ha est définie, à l'intérieur de laquelle l'histogramme de répartition des classes de hauteur est calculé. De là, les différentiels, au sein de chaque classe de hauteur entre la fréquence de l'année  $n+1$  et celle de l'année  $n$  (année de référence de la période d'étude), sont calculés et les graphiques d'évolution du couvert forestier tracés. A la lumière des résultats et en relation avec les orthophotographies, chaque situation est analysée selon les règles de décision synthétisées dans la Figure 4. Ensuite, les évolutions du couvert forestier sur les zones gérées et non gérées sont comparées.

## VI. Schéma synoptique de l'étude

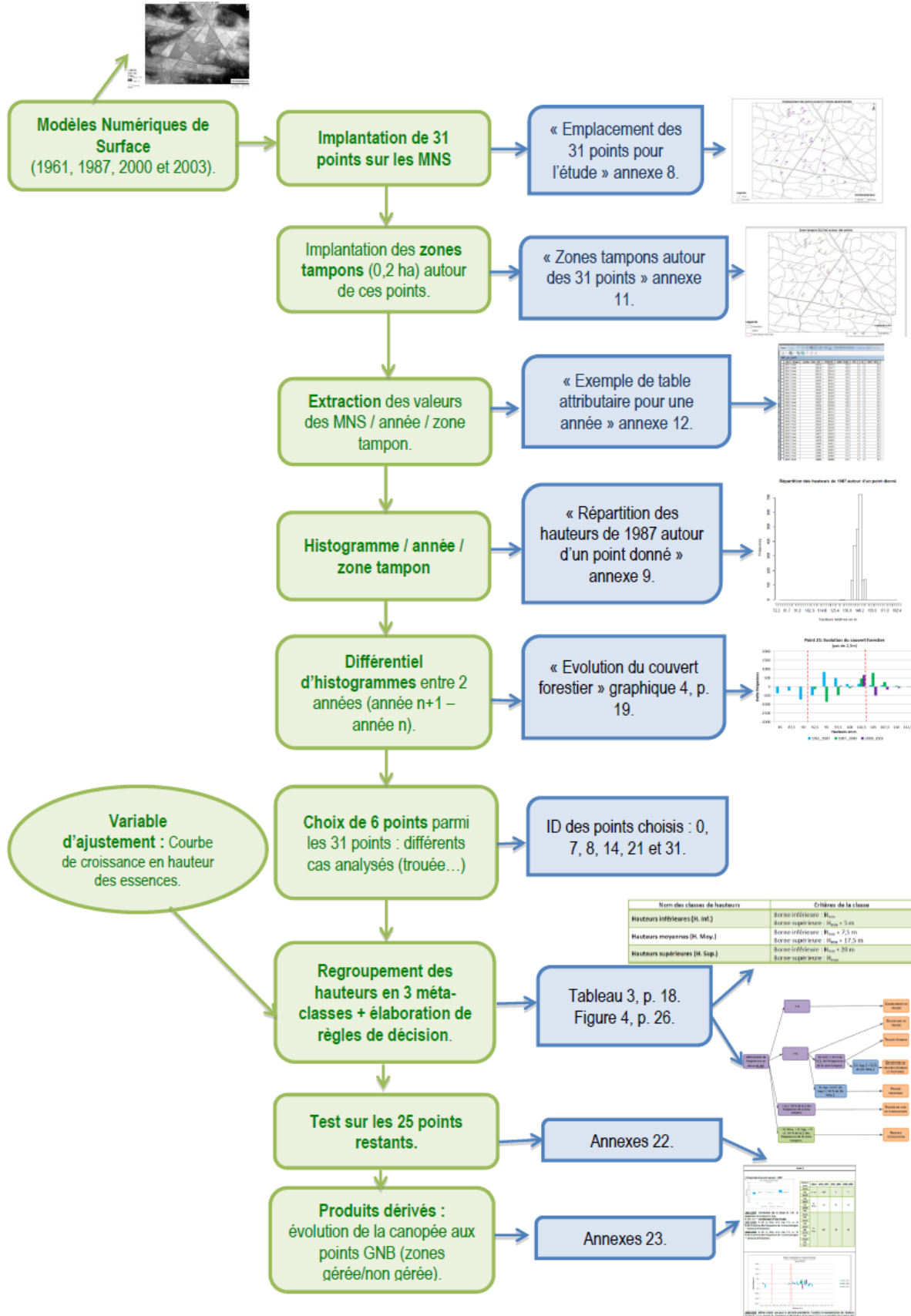


Figure 3 – Etapes pour définir les règles de décision d'évolution d'un couvert forestier.

## Partie 3- Résultats

### I. Evaluation des photographies de 1949 et comparaison de deux versions du logiciel ERDAS Imagine® et qualité des MNS

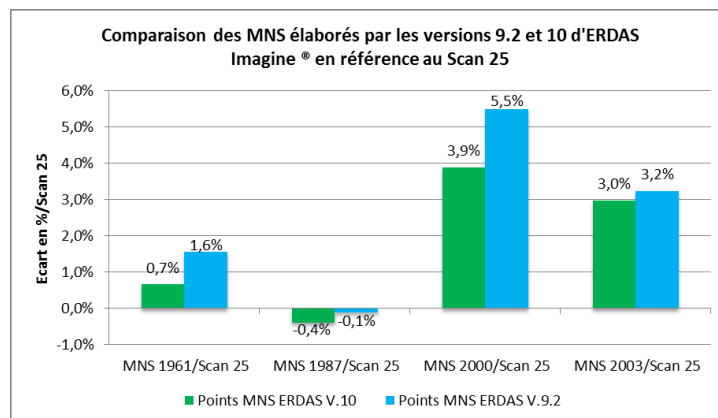
#### I.1. Résultats du traitement des photos aériennes de 1949

En annexe 14 figurent les 8 essais réalisés pour générer le MNS de 1949.

Les différents MNS obtenus (annexe 15), pour l'année 1949, suite à plusieurs essais, ne sont pas satisfaisants en raison de recouvrements imprécis ou de zones en coins de MNS sans valeur ou de l'absence de valeur sur de trop grandes zones. Les deux MNS qui paraissent être de meilleure qualité sont ceux générés avec l'algorithme de corrélation implémenté dans la dernière version de LPS. Les difficultés viennent certainement aussi du fait que le matériel photo dans les années 1947 à 1950 n'était pas bien calibré et que la qualité des lentilles induisait des déformations conséquentes.

#### I.2. Comparaison entre les MNS obtenus avec l'ancienne version 9.2 d'ERDAS et ceux réalisés avec la nouvelle version 2011 ; le Scan 25® servant de référent

- Sur les valeurs numériques générées



Graphique 1- Comparaison des hauteurs issues des MNS élaborés par les versions 9.2 et 10 d'ERDAS Imagine® en référence au Scan25®.

Pour la version ERDAS 2011 les valeurs des hauteurs s'écartent au maximum de 3,9 % de celles issues du Scan 25®. Quant aux écarts entre les deux versions, ils sont relativement proches, avec un maximum de 1,6 % sur le MNS de 2000 (Graphique 1).

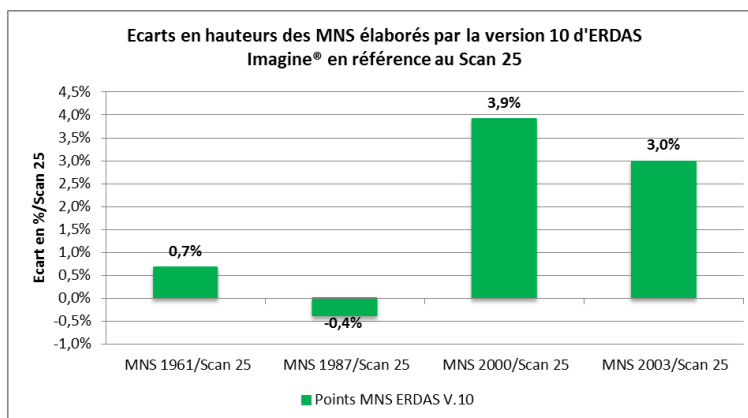
- Sur les orthophotographies

Les contrastes sont plus marqués sur la nouvelle version d'ERDAS Imagine®, ce qui induit une meilleure lecture. Mais toutefois en ajustant différemment le ré-échantillonnage radiométrique, voire le changement de dynamique, les écarts deviennent très faibles. En d'autres termes, les différences ne sont pas suffisamment importantes pour que cela devienne un critère de choix.

#### I.3. Qualité des MNS des années 1961, 1987, 2000 et 2003

A partir des résultats précédents il est possible de voir que les MNS élaborés avec la nouvelle version d'ERDAS Imagine®, pour les années 1961, 1987, 2000 et 2003 donnent des résultats qui sont dans une fourchette maximale de 3,9 % d'erreur sur les hauteurs, en prenant pour référence le Scan 25. Le Graphique 2 illustre les résultats.





Graphique 2 - Erreur moyenne de chaque MNS / Scan25 en pourcentage.

## II. Elaboration des règles de décision d'évolution de couverts forestiers

### II.1. Analyse de séries temporelles de MNS en relatifs pour l'établissement de règles de décisions pour la classification des évolutions de couverts forestiers

#### II.1.1. Types d'évolutions du couvert forestier des 31 zones tampons

Les types d'évolution observés sur la zone sont l'absence d'évolution du couvert forestier, l'ouverture de trouée, la trouée étendue, la trouée profonde, l'ouverture de trouée profonde, l'ouverture de trouée étendue, l'ouverture de trouée profonde et étendue, la trouée superficielle de canopée (c'est-à-dire l'éclaircie par la coupe des arbres les plus hauts en zone gérée), le comblement de trouée et la trouée en voie de stabilisation. En l'état ce ne sont que des constats d'évolutions de couverts forestiers qui sont illustrés sous la forme de graphiques, avec les hauteurs différentielles issues des MNS (années 1961, 1987, 2000 et 2003) réparties en classe au pas de 2,5 m.

#### II.1.2. Les méta-classes

Pour simplifier la lecture ou pour accentuer sur une période les phénomènes d'évolution sur un couvert forestier, il s'est avéré intéressant de regrouper des classes d'histogrammes en trois « méta-classes » de hauteurs (« H. Inf. » ; « H. Moy. » et « H. Sup. ») selon des critères qui prennent en compte la courbe de croissance en hauteur (PARDE, 1978 ; DUPLAT, 1996 ; NEBOUT, 2006 ; PINEY, 2010) (annexe 20) de l'espèce principale pour définir des bornes de classes qui marquent des ruptures de canopée significatives quand elles sont bien réparties autour du point de référence. Dans notre cas l'objectif étant de définir un concept les seuils établis l'ont été en utilisant la littérature relative aux hauteurs des chênes sessiles. Mais bien évidemment, ultérieurement, ces seuils seront à ajuster par « essai et erreur » avec des « aller et retour » entre le bureau d'études et le terrain.

Les limites retenues ici pour les méta-classes concernent la situation d'étude du chêne en forêt de Fontainebleau et figurent dans le Tableau 3 avec l'hypothèse qu'une étendue (différence entre borne supérieure et Inférieure) de 5 m pour la classe « H. Inf. » et de 10 m pour la classe « H. Moy. », marquent très probablement des ruptures de canopée significatives quand elles sont bien réparties autour du point de référence. Cette hypothèse, même si elle reste à confirmer ultérieurement, aura permis la **création de règles de décision** pour le suivi de l'évolution du couvert forestier (Figure 4).

Nom des méta-classes de hauteurs	Critères des méta-classes
Hauteurs inférieures (H. Inf.)	Borne inférieure : $H_{\min}$ Borne supérieure : $H_{\min} + 5$ m
Hauteurs moyennes (H. Moy.)	Borne inférieure : $H_{\min} + 7,5$ m Borne supérieure : $H_{\min} + 17,5$ m
Hauteurs supérieures (H. Sup.)	Borne inférieure : $H_{\min} + 20$ m Borne supérieure : $H_{\max}$
La borne inférieure $H_{\min}$ correspond à l'altitude topographique du sol.	

Tableau 3- Critères de classement en trois méta-classes hauteur.

## II.2. Analyse spécifique de 6 situations représentatives des cas d'évolutions de couverts forestiers sur le site de Fontainebleau

En raison de contrainte d'espace, seulement une situation représentative des cas d'évolutions de couverts forestiers, sur les six retenues (annexe 21), figure ci-après sous la forme de deux types de graphiques aux groupements de classes de hauteurs différentes. Le premier regroupe les différentiels de fréquences de hauteurs en trois méta-classes (« H. Inf. », « H. Moy. » et « H. Sup. ») et dans le second les différentiels de fréquences de hauteurs sont en classes séquencées au pas de 2,5 m. Pour la création des histogrammes le différentiel de fréquences est obtenu par différence entre l'année la plus récente et l'année la plus ancienne.

NB :

- dans le cas proposé ci-dessous, ainsi que les cinq autres qui figurent en annexe 21, la somme des fréquences de chaque zone tampon est égale à 1976 pixels plus ou moins 1 %.
- par mesure de simplification de l'écriture il est convenu que « H. Inf. » représente en réalité le  $\Delta$  fréquences de la classe « H. Inf. », il en est de même pour « H. Moy. » et « H. Sup. ». En ce qui concerne la valeur absolue du  $\Delta$  fréquences de la classe H. Inf. elle est notée | H. Inf. |, il en va de même pour | H. Moy. | et | H. Sup. |.

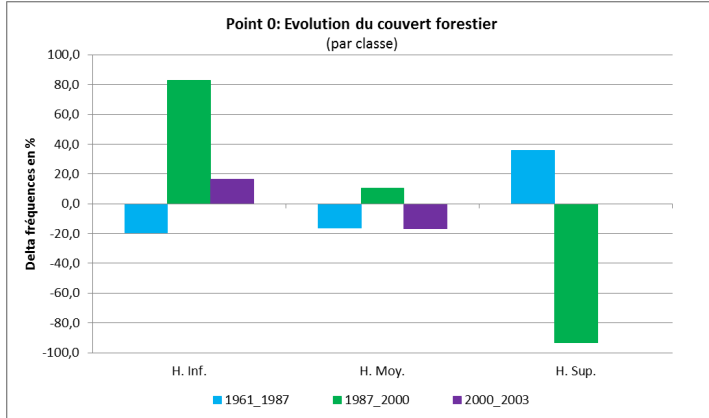
### • Situation : création de trouée (point 0)

L'analyse visuelle des orthophotographies permet de constater en ce point : (i) un **comblement de petites trouées** sur la période 1961-1987 ; (ii) l'apparition d'une **trouée profonde** (par exemple une coupe rase) et **étendue** (vaste surface) entre 1987-2000. (iii) la poursuite du phénomène durant la période 2000-2003, aboutissant à une trouée non refermée en 2003 qui peut être qualifiée **d'une trouée en voie de stabilisation**. Ces phénomènes se traduisent comme suit sur l'histogramme différentiel d'évolution du couvert forestier :

- Période 1961-1987 : pour la classe H. Inf. son  $\Delta$  fréquences = -387, c'est-à-dire  $< 0$ . Mais comme le  $\Delta$  fréquences de la classe H. Sup.  $> 0$ , (en d'autres termes une partie des pixels est passée de la classe H. Inf. à la classe H. Sup. (par croissance des arbres)) nous sommes en présence d'une période de **comblement d'une trouée**. Par ailleurs, le  $\Delta$  fréquences de la classe H. Inf. représente 19 % de la somme des fréquences de la zone tampon 0.
- Période 1987-2000 : pour la classe H. Inf. son  $\Delta$  fréquences = 1636, c'est-à-dire  $> 0$  et  $> 70$  % de la somme des fréquences de la zone tampon. De plus le  $\Delta$  fréquences de la classe H. Sup. = - 1838, c'est-à-dire  $< 0$ , ET | H. Sup. | 9,09 fois supérieur à | H. Moy. | ce qui signifie qu'une partie des pixels est passée directement de la

classe H. Sup. à la classe H. Inf. (par coupe des arbres) ; Nous sommes donc en présence d'une période de création d'une **trouée étendue et profonde**.

- Période 2000-2003 : pour la classe H. Inf. son  $\Delta$  fréquences = 326, c'est-à-dire  $> 0$  ce qui signifie que des pixels de la classe H. Moy. sont passés en classe H. Inf. (par coupe). H. Inf. représente 16 % de la somme des fréquences de la zone tampon 0. Une **ouverture de trouée** est constatée sur cette période.

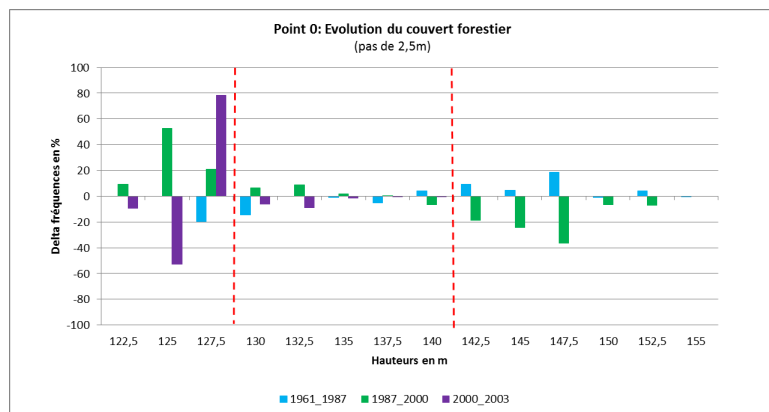


Graphique 3- Evolution du couvert par classe de hauteurs (point 0).

Hauteur en m	Classe	1961 - 1987	1987 - 2000	2000 - 2003
122,5	H. Inf.	-387	1636	326
125				
127,5				
130	H. Moy.	-318	202	-326
132,5				
135				
137,5				
140				
142,5	H. Sup.	706	-1838	0
145				
147,5				
150				
152,5				
155				

Tableau 4- Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 0).

Sur la période 1987-2000, il est à noter un creusement par rapport à la période 1961-1987 avec une valeur positive significative sur la classe 125 m (Graphique 4).

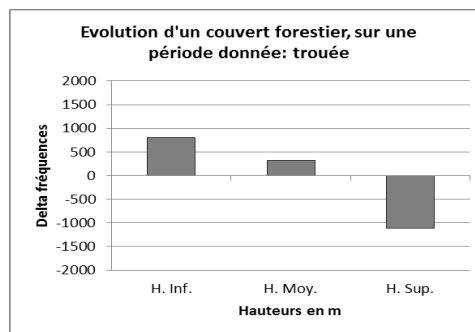


Graphique 4- Evolution du couvert au pas de 2,5 m (point 0).

### II.3. Règles de décision d'évolution de couverts forestiers

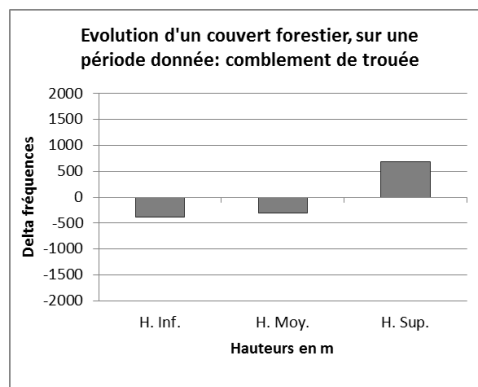
À la lumière des analyses réalisées et des résultats obtenus selon une méthode inductive, des clés d'interprétation généralisables sont proposées. Pour une bonne interprétation des graphiques il est nécessaire d'intégrer que la somme des trois « méta-classes » est toujours égale à zéro, puisque l'histogramme différentiel traduit le passage de pixels d'une classe de hauteur à une autre, le nombre total de pixels sur le disque de 0,2 ha restant toujours le même (1976 pixels +/- 1 %). La lecture des différents graphiques, proposés ci-dessous, permet de déceler sur un couvert forestier les types d'évolutions suivants :

- **Ouverture de trouée**, si le différentiel de fréquences, entre deux dates successives, de la classe « H. Inf. » est supérieur à 0 (Graphique 5).



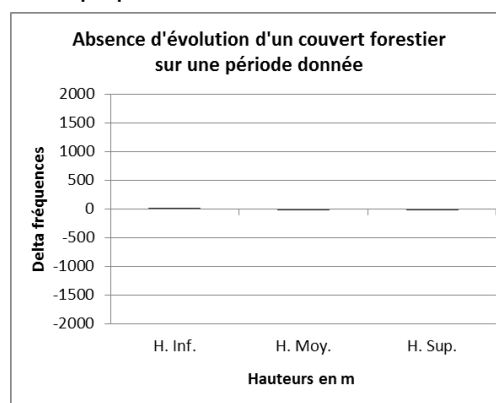
Graphique 5- Cas de l'ouverture d'une trouée.

- **Comblement d'une trouée (en général)**, le différentiel de fréquences de la classe « H. Inf. » est inférieur à 0. Mais aussi en particulier pour un **comblement de trouée superficielle** dans le cas où le différentiel de fréquences de la classe « H. Inf. » est égal à 0 +/- 5 % de la somme des fréquences de la zone tampon avec le différentiel de fréquences de la classe « H. Moy. » inférieur à 0 (Graphique 6).



Graphique 6- Cas d'un comblement de trouée.

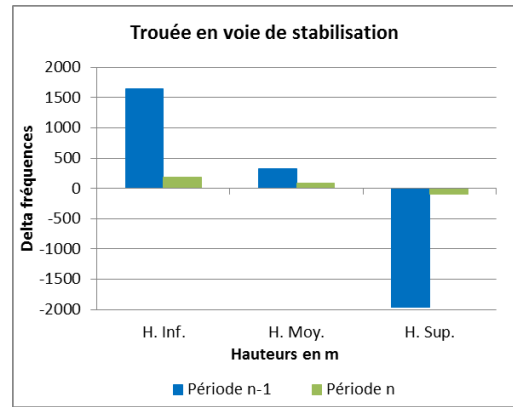
- **Absence d'évolution du couvert forestier**, si le différentiel de fréquences des classes « H. Inf. », « H. Moy. » ou « H. Sup. » ne diffère pas de plus ou moins 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon (Graphique 7).



Graphique 7- Cas d'une absence d'évolution du couvert forestier.

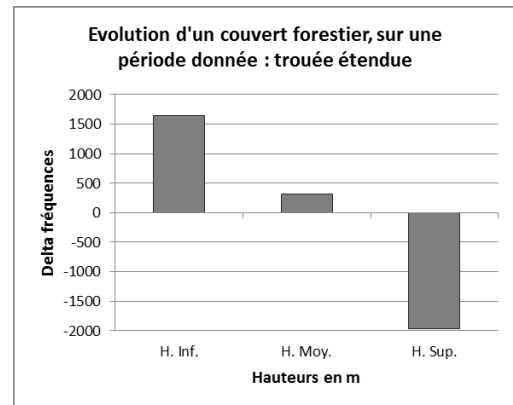
Il est aussi possible à l'intérieur de la méta-classe « ouverture d'une trouée » de faire une typologie des trouées.

- **Trouée en voie de stabilisation**, si le différentiel de fréquences de la classe « H. Inf. » de la période considérée a une valeur absolue qui ne diffère pas de plus ou moins 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon **ET** si durant la période précédente une trouée a été détectée (Graphique 8).



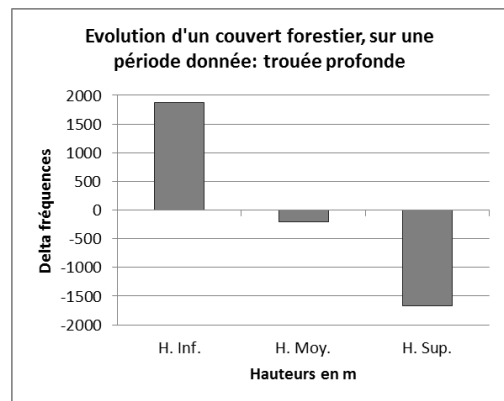
Graphique 8- Cas d'une trouée en voie de stabilisation.

- **Trouée étendue**, si le différentiel de fréquences de la classe « H. Inf. » est supérieur à 0 **ET** a une valeur absolue supérieur à 70 % de la somme des fréquences de la zone tampon (Graphique 9).



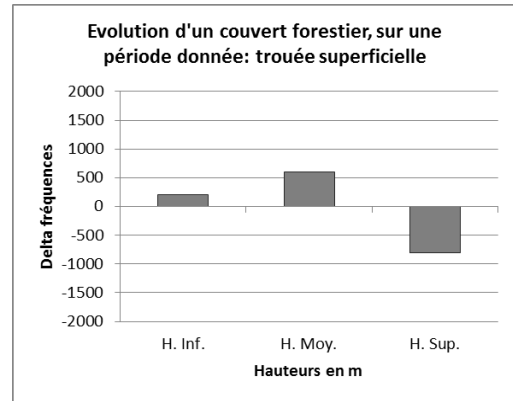
Graphique 9- Cas d'une trouée étendue.

- **Trouée profonde**, si le différentiel de fréquences de la classe « H. Inf. » est supérieur à 0 **ET** que le différentiel de fréquences de la classe « H. Sup. » est inférieur à 0 avec une valeur absolue supérieure à 50 % du différentiel de fréquences de la classe « H. Moy. » (Graphique 10).



Graphique 10- Cas d'une trouée profonde.

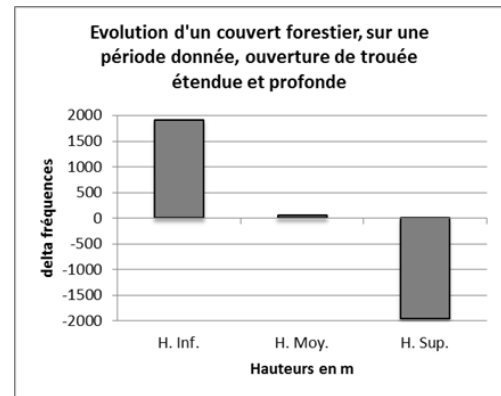
- **une trouée superficielle de canopée** c'est-à-dire une éclaircie par coupe des arbres les plus hauts, si le différentiel de fréquences de la classe « H. Inf. » est égal à 0 plus ou moins 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon et que le différentiel de fréquences de la classe « H. Moy. » est supérieur ou égal à 0 **ET** que le différentiel de fréquences de la classe « H. Sup. » est inférieur à 0 avec de plus le différentiel de fréquences de la classe « H. Moy. » supérieur ou égal à 50 % de la valeur absolue de la classe « H. Sup. » (Graphique 11)



Graphique 11 – Trouée superficielle de canopée.

Ces types de trouées ne s'excluent pas systématiquement l'une l'autre et une trouée peut présenter plusieurs caractéristiques.

- **Ouverture de trouée profonde et étendue**, si le différentiel de fréquences, entre deux dates successives, de la classe « H. Inf. » est supérieur à 0 **ET** a une valeur absolue supérieur à 70 % de la somme des fréquences de la zone tampon **ET** que le différentiel de fréquences de la classe « H. Sup. » est inférieur à 0 avec une valeur absolue supérieure à 50 % du différentiel de fréquences de la classe « H. Moy. » (Graphique 12).



Graphique 12 - Evolution d'un couvert forestier, sur une période donnée, ouverture de trouée étendue et profonde.

La Figure 4 résume les **règles de décision** traduisant l'évolution d'un couvert forestier. Ces règles de décision, dans le cadre de l'expérimentation, sont appliquées aux 25 « points tests » et le seront pour application aux points GNB.

A ce stade des résultats (annexe 22) il ressort que les règles de décision proposées apportent effectivement, sans faille, une interprétation de l'évolution du couvert conforme à celle issue de l'analyse visuelle des orthophotographies.

### III. Qualification d'un produit dérivé centré sur l'évolution du couvert forestier sur des placettes GNB positionnées en zones gérées et non gérées

Les séries temporelles centrées sur les points GNB, en zones gérées et non gérées du site de Fontainebleau, sont analysées point par point sur 0,2 ha autour des points. Mais face à l'hétérogénéité des résultats (annexe 24), les moyennes différentielles de fréquences sont calculées pour les lisser.

**Dans un premier temps**, ce sont les évolutions des surfaces (différentiels de pixels par zone tampon) sujettes à modification de couvert qui sont observées (annexe 24). De fait peu de différences constatées dans l'évolution des

surfaces concernées entre les deux milieux, puisque sur la période la plus longue 1967-1987, 8,4 % les séparent ou encore 6,5 % sur la période 2000-2003 et seulement 1,9 % pour la période 1987-2000. Mais par contre de forts écarts sont constatés entre les zones tampons sur une même période (Tableau 5).

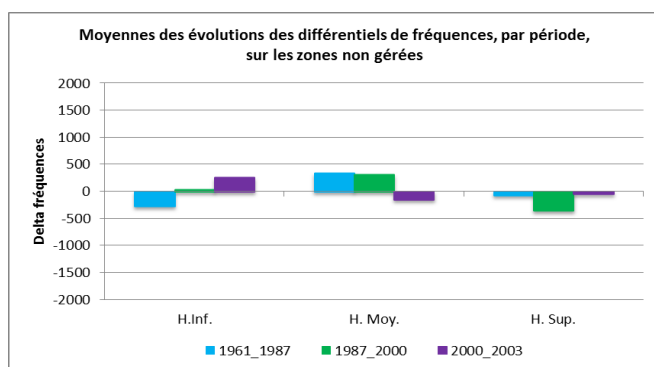
Périodes	Écarts maximums pour les zones gérées	Écarts maximums pour les zones non gérées
1961-1987	47,9 %	65 %
1987-2000	68,1 %	76,1 %
2000-2003	39 %	81,2 %

Tableau 5 – Écarts maximums pour les zones gérées et non gérées.

Dans un second temps, les évolutions moyennes, au sein de chaque période, des différentiels de fréquences par méta-classes de hauteurs, sur les deux zones (Tableau 6) sont analysées avec les règles de décision de suivi de l'évolution de couverts forestiers proposés en II.3.

Période	Zones non gérées Graphique 13 et Tableau 7	Zones gérées Graphique 14 et Tableau 8
1961-1987	H. Inf. < 0 → <b>comblement de trouée.</b>	H. Inf. < 0 → <b>comblement de trouée.</b>
1987-2000	H. Inf. > 0 → <b>amorce d'ouverture de trouée.</b>	H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → <b>absence d'évolution</b>
2000-2003	H. Inf. > 0 → <b>ouverture de trouée.</b>	H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → <b>absence d'évolution</b>

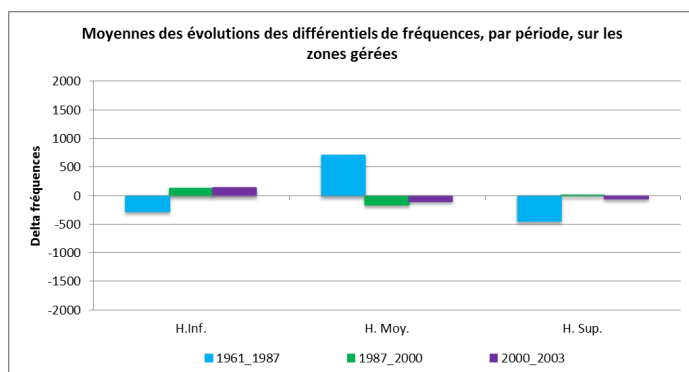
Tableau 6 - Interprétation de l'évolution du couvert forestier par période.



Graphique 13 - Moyennes des évolutions des différentiels de fréquences, par période, sur les zones non gérées.

Classe	1961-1987	1987-2000	2000-2003
H. Inf.	-271	40	255
H. Moy.	337	312	-148
H. Sup.	-66	-352	-44

Tableau 7 – Moyennes des différentiels de fréquences par période en zone non gérée.



Graphique 14 – Moyennes des évolutions des différentiels de fréquences, par période, sur les zones gérées.

Classe	1961-1987	1987-2000	2000-2003
H. Inf.	-272	136	141
H. Moy.	712	-155	-91
H. Sup.	-440	19	-51

Tableau 8 - Moyennes des différentiels de fréquences par période en zone gérée.

## Partie 4- Discussion

### I. Qualité des MNS

Après traitements il s'avère que les séries photographiques de 1949 ne peuvent abonder la banque de données utilisées pour établir des MNS sur une période de temps étendue. En effet, malgré huit essais avec des paramètres différents, il n'a pas été possible de générer des MNS de bonnes qualités. Cela avait déjà été le cas précédemment avec PINEY (2010). Faute d'informations précises sur le processus mis en œuvre pour requalifier les valeurs aberrantes il n'est pas aisé d'en tirer des conclusions. Finalement nous sommes privés des informations émanant des années 1949.

Par ailleurs, au regard des résultats obtenus en comparant les MNS élaborés par les versions 9.2 et 10 d'ERDAS Imagine®, il est constaté un léger avantage à la dernière version. En effet, les écarts de hauteurs constatés par rapport au Scan 25® sont moindres qu'avec la version 9.2, à savoir 3,9 %. C'est-à-dire que les MNS produits avec la version 10 d'ERDAS Imagine® n'auraient au maximum que 1,2 m d'incertitude pour les hauteurs supérieures, qui ne dépassent pas 30 m sur le site d'étude. Il est donc crédible de considérer que les MNS des années 1961, 1987, 2000 et 2003 sont des supports susceptibles de répondre aux attentes dictées par les exigences des phases suivantes, aux quelques points aberrants près.

Ainsi, la qualité des MNS ayant été jugée globalement satisfaisante, les séries temporelles de 31 points sur le site de la forêt de Fontainebleau ont dévoilé les évolutions de chacun des couverts forestiers ciblés. La qualité des résultats obtenus permet d'envisager la phase suivante d'élaboration de règles de décision relatives au suivi de l'évolution de couverts forestiers.

### II. Analyse de séries temporelles de MNS pour l'établissement des règles de décision relatives au suivi de l'évolution de couverts forestiers

Issue de l'approche inductive, la méthode d'interprétation des histogrammes différentiels, à partir de données extraites de MNS, répond aux attentes d'une lecture rapide de l'évolution de couverts forestiers entre deux dates. De plus le regroupement des différentiels de fréquences de hauteurs en trois méta-classes : « H. Inf. ; H. Moy. et H. Sup. » a l'avantage de pouvoir apporter une réponse facilement interprétable tout en étant suffisamment précise pour alimenter les analyses relatives à la dynamique temporelle du couvert forestier. L'approche plus fine, rendue possible avec l'affichage au pas de 2,5 m des classes de hauteurs, augmente la précision de lecture parfois nécessaire à l'analyse des évolutions en intra ou en inter classes. Deux exemples illustrent l'intérêt des deux types de classement de hauteurs. Le 1<sup>er</sup> exemple sur la zone du point 8 (annexe 21) permet de constater que les classes de hauteurs qui vont de 160 m à 165 m ont un différentiel de fréquences négatif et de façon encore plus prononcée pour la classe 162,5 m, alors qu'avec la représentation sous forme de classes regroupées (annexe 21) la seule information exploitable conduit à noter que « H. Sup. » est positif. Aussi, ces deux représentations paraissent contradictoires. Or ce n'est pas le cas, car les hauteurs positives qui vont de 152,5 à 157,5 m sont également dans la classe « H. Sup. » et doivent donc être prises en considération si une comparaison veut être menée. De fait le zoom sur les hauteurs situées entre 160 m à 165 m permet seulement de formuler l'hypothèse que ce sont très certainement des prélèvements de production pour les hauteurs comprises entre 160 m et 165 m, alors que celles qui vont de 152,5 m à 157,5 m sont plutôt la conséquence d'une

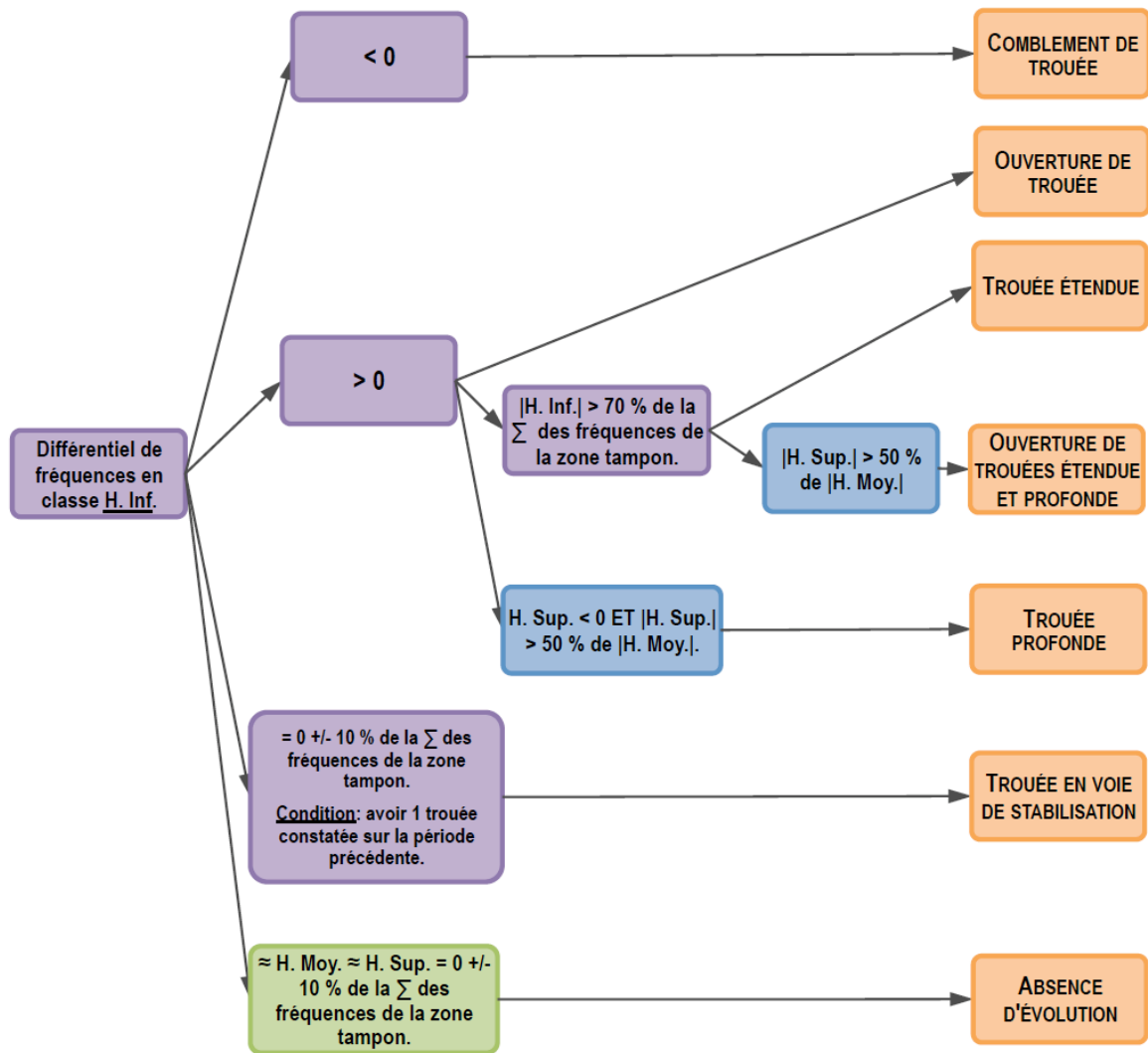


croissance. Mais cette suggestion reste à confirmer par des données de terrain, dans la mesure où des archives fiables sont consultables.

Par ailleurs, il est également intéressant de noter les évolutions sur la période 1987-2000 avec la classe 152,5 m négative et les classes 155 m et 157,5 m positives, alors que la lecture du graphique avec les classes regroupées n'apporte pas d'information, car la somme des valeurs des classes 155 m et 157,5 m s'annule. Cette évolution repérable avec un pas de 2,5 m peut permettre de formuler une hypothèse de croissance des arbres de la zone, sur la période considérée. Toutefois, comme précédemment, cela reste à confirmer par des données de terrain. Pour la période 2000-2003 les changements sont de moindres importances et plus difficiles à interpréter, par exemple avec les classes 152,5 m et 155 m. Nous atteignons peut-être ici les limites de l'analyse, car nous sommes tributaires de la qualité des MNS et la période de référence n'est pas assez longue. Le 2<sup>e</sup> exemple sur la zone du point 0 où durant la période 2000-2003 la classe 125 m devient négative et la classe 127,5 m positive (Graphique 4). Cet exemple permet de mettre l'accent sur le degré de précision en lecture qui peut laisser à penser qu'un processus de comblement s'engage. Mais cela est à confirmer par des données de terrain, car la période qui s'étale sur 3 années est relativement courte pour se prononcer.

La complémentarité des deux affichages devrait répondre à l'intérêt manifesté de pouvoir ultérieurement, à différentes échelles spatiales autour des points de référence GNB, identifier les évolutions de différents couverts forestiers. Mais également d'être capable de détecter et de différencier, à partir des hauteurs caractéristiques de rupture de canopée et de leurs variations dans le temps, des paysages en situation d'équilibre temporel et ceux qui sont plus instables.

Des résultats pourraient prêter à discussion, car la qualité des MNS initiaux, sans traitement supplémentaire, est parfois tout juste correcte (années 1961 et 1987) ou encore par le fait que les points injectés en termes de correctifs sur le MNS de 1961 le soient à partir du MNT réalisé lors des travaux d'Isabelle PINEY (2010) et dont les altitudes n'ont pas été certifiées. Mais également parce que les trouées superficielles, en zone gérée, peuvent ne pas toujours être discriminées avec certitude entre, « véritable trouée » et « coupe d'éclaircie » pratiquée par exemple pour donner de la vigueur aux arbres de tailles moyennes de sous étage. En zone gérée seule une information émanant du terrain peut confirmer l'une ou l'autre des situations, car en termes de différentiels de fréquences le résultat mathématique est identique. Par contre en zone non-gérée l'interprétation ne devrait pas poser trop de difficultés. De façon transitoire toutes les catégories sont conservées pour l'analyse des points GNB. En effet il sera ainsi possible, dans le cas où ces travaux se poursuivent, de croiser les analyses actuelles avec les informations émanant du terrain pour éventuellement réviser la définition des trouées superficielles. En attendant le résultat de travaux complémentaires et pour lever toutes équivoques, les règles de décision relatives à la définition de trouée superficielle (ouverture et comblement) ne seront pas affichées, à ce jour, dans la synthèse de la Figure 4.



NB :  $|H. Inf. |$  ,  $|H. Moy. |$  et  $|H. Sup. |$  sont les valeurs absolues des différentiels de fréquences.

Figure 4 – Règles de décision de suivi d'évolution d'un couvert forestier.

Enfin il est à noter que la tolérance minimale rencontrée sur la définition des règles de décision d'évolution de couverts forestiers est de +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon. Aussi, pour rester dans le même intervalle de tolérances, les règles de décision de la Figure 4 ne valent que si l'altitude du terrain ne varie pas de +/- 5 m au sein de la zone tampon de 50 m de diamètre. Cette restriction n'est peut-être que provisoire mais dans l'état actuel des travaux un doute subsiste dans la mesure où les différences d'altitude du sol nu étudié sont dans cet intervalle. De plus il est nécessaire, sur chaque zone tampon, d'avoir au moins une section sans arbre, même minimale (255 pixels = surface maximale du houppier d'un chêne sessile (NEBOUT, 2006) (annexe 25)), identifiable sur au moins une des années de référence des périodes étudiées. En effet, pour être capable de différencier la classe « H. Inf. » de la classe « H. Moy. » en l'absence de MNT, il est impératif d'obtenir d'une autre façon la hauteur minimale du sol nu.

### **III. Qualification d'un produit dérivé : évolution du couvert forestier sur des placettes GNB positionnées en zones gérées et non gérées**

Les évolutions, des différentiels de fréquences calculés, sont conformes aux observations visuelles menées sur les orthophotographies.

L'analyse des séries temporelles centrées sur les points GNB en zones gérées et non gérées du site de Fontainebleau montre une extrême hétérogénéité au sein de chaque type de gestion et pour chacune de leurs zones tampons. Dans ce cas de figure, à savoir la rencontrer d'une forte hétérogénéité des différentiels de fréquences, il semble que les limites d'analyses soient atteintes. Toutefois, sur les points GNB situés en parcelles exploitées, la valeur négative de « H. Sup. » permet d'émettre une hypothèse crédible, à savoir que c'est l'illustration de coupes de production. De même que la valeur positive de « H. Moy. » donne à penser que le suivi en terme de gestion de production est bien effectif sur les parcelles exploitées (très simplement : les arbres croissent). Par contre, sur les parcelles non-exploitées, faute d'informations complémentaires, il ne peut qu'être constaté, sur la période 1987-2000, la valeur négative de « H. Moy. » (peut-être l'effet d'une tempête ?). Mais cette analyse ne vaut que pour des zones tampons de 0,2 ha. Il serait intéressant ultérieurement, en changeant d'échelle autour des points GNB, de voir si la taille et les répartitions des trouées sont différentes du constat actuel.

Sur le site de la forêt d'Engins-Autrans (38) dans le Parc Naturel Régional du Vercors, faute de temps, aucune série temporelle n'a pu être traitée. Or cette situation en zone de montagne était pourtant intéressante pour affiner la démarche initiée durant cette mission.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le guide méthodologique réalisé pour une prise en main spécifique du logiciel ERDAS LPS en vue de générer des MNS de couverts forestiers rend cette tâche plus abordable pour un non spécialiste. Par ailleurs, la traduction de l'évolution d'un couvert forestier, qui s'appuie sur les règles de décision élaborées à partir de différentiels d'histogrammes de fréquences regroupés, en classes de hauteurs au pas de 2,5 m ou en trois méta-classes (« H. Inf. », « H. Moy. » et « H. Sup. »), devrait également répondre à l'attente du commanditaire. D'autant que la transposition de l'approche sur d'autres types de peuplements est aisée, car chacune des méta-classes peut être ajustée (étendue et bornes) selon les critères de croissance de l'essence principale du peuplement étudié. C'est-à-dire qu'en fonction du nombre d'années entre deux acquisitions de photographies et de la croissance en hauteur de l'espèce dominante les bornes peuvent être déplacées à souhait. Par ailleurs, n'ayant pas en 2010 et 2012 réussi à analyser en profondeur le processus de traitement des points aberrants sur les MNS, l'éventualité, à la marge, de (i) la disparition de semenciers en trouée ; (ii) et de l'absence de certains points au sol en peuplement adulte, est à intégrer dans l'avenir. Sachant toutefois, que chaque analyse de cas a été vérifiée visuellement sur les orthophotographies, les résultats de cette étude ne sont pas remis en cause.

L'analyse comparative entre placettes en forêt gérée et placettes en forêt non gérée a permis de mettre en évidence des différences de caractéristiques moyennes des évolutions des couverts entre ces deux groupes de placettes. Si ce résultat n'est pas surprenant, il confirme cependant que la méthode mise en place permet de quantifier ces différences et est donc susceptible d'apporter des informations pertinentes pour l'étude du lien entre biodiversité, exploitation forestière et naturalité. Les analyses après traitement des données photogrammétriques apportent déjà quelques éclairages sur les évolutions comparées des parcelles. Ainsi il est constaté, sur la période 1961-1987, que la tendance générale pour les deux situations de gestion est au comblement des trouées. Par contre, pour les deux périodes suivantes, une tendance à la stabilité est observée en zones gérées, alors que des ouvertures de trouées sont constatées en zones non-gérées. Mais au-delà, les véritables explications ne peuvent venir qu'en confrontant les informations émanant du terrain avec les résultats obtenus dans ce projet. En effet, le point de vue sylvicole est essentiel ; mais au regard du temps imparti pour cette étude aucun spécialiste n'a pu être contacté afin d'apporter au moins une amorce de réponse. Toutefois il a été répondu à la commande qui consistait à trouver une méthode qui permet de dire en chaque point GNB s'il y a eu ou non des trouées dans le paysage proche au cours des années ciblées par l'étude ; l'origine n'étant pas à expliquer.

Au stade de clôture de cette étude, il peut être avancé que la production par photogrammétrie de séries temporelles de Modèles Numériques de Surface (MNS), quand elle est de qualité, alliée à des règles de décision de suivi d'évolution de couverts forestiers pertinents, seront des outils qui répondront au besoin de bien caractériser le paysage de chaque placette GNB. Mais la pertinence des règles de décision, à ce jour, ne l'est que du point de vue d'un géomaticien. En effet, maintenant il reste à croiser ce regard avec ceux des acteurs de secteurs tels que la sylviculture et l'écologie pour ajuster les règles de décision de suivi d'évolution de couverts forestiers avec leurs spécificités, contraintes ou exigences. A ce titre, il sera peut-être possible de réintégrer dans nos types d'évolution de couverts forestiers l'ouverture de trouées superficielles et/ou ceux liés aux éclaircies en zones gérées. Ensuite, avec l'apport de

ces règles de décision peaufinées, la dynamique de la structure et de la croissance des peuplements forestiers pourra ainsi être étudiée à partir de la photogrammétrie rapidement. Mais, quoi qu'il en soit, il est important de considérer que les règles de décision d'évolution de couverts forestiers formulées durant cette mission ne sont que des outils au service d'acteurs qui auront à donner du sens aux évolutions constatées.

Enfin, la transférabilité des règles de décision semble difficile, dans l'état actuel des réflexions, en direction des couverts forestiers en zones vallonnées ou montagneuses. En effet, pour une bonne application des règles de décision telles que proposées actuellement, l'altitude du terrain ne doit pas varier de +/- 5 m au sein de la zone tampon. Toutefois une nouvelle réflexion sur cet aspect est envisageable, en partant non pas des hauteurs inférieures mais des hauteurs supérieures maximales estimées en fonction de l'essence dominante du peuplement à étudier. Ou encore, en réduisant au maximum les surfaces des zones tampons pour que la tolérance d'altitude retenue à ce jour ne soit pas dépassée en montagne. Autant dire que le protocole retenu durant cette mission pourrait être repensé avec par exemple, ne pas viser l'exhaustivité des types d'évolution du couvert pour ne retenir que les plus importants tout en utilisant des données externes émanant par exemple de l'IFN. Ou encore en prenant comme protocole les propositions formulées dans le cadre des études en zones montagneuses. Ensuite les résultats des différents protocoles, appliqués à une même zone d'étude d'une part et testés, d'autre part sur des zones altimétriques différentes, seraient comparés pour en déduire le ou les protocoles le(s) mieux adapté(s) aux critères d'exigences des commanditaires.

Par ailleurs, il est envisageable, à partir des différentiels de fréquences des classes de hauteur, mais sur des espaces plus grands que ceux qui ont été utilisés dans cette étude (0,25 ha), de détecter les couverts en équilibres temporels ou en instabilités.

De plus, il semble possible, à partir des règles de décision élaborées dans cette étude, d'automatiser les lectures des données pour faire ressortir les évolutions caractéristiques de différents couverts forestiers. Enfin, si des photographies anciennes sur une échelle de 60 ans étaient disponibles, exploitables et compatibles avec les contraintes de création de MNS, des aides au repérage de corridors temporels pourraient aussi faire l'objet de recherches complémentaires.

## REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout particulièrement à Sylvie DURRIEU qui m'a offert la possibilité de travailler au sein de l'UMR TETIS. Sa rigueur scientifique, ses conseils techniques, sa disponibilité et la confiance qu'elle m'a accordée ont été des facteurs indéniables de réussite dans cette mission de six mois à la Maison de la Télédétection à Montpellier.

Mes remerciements à Marion GOSELIN et Frédéric GOSELIN, basés tous deux à l'Irstea de Nogent-sur-Vernisson, pour leurs remarques et/ou propositions particulièrement pertinentes, d'autant qu'ils ont toujours été très réactifs pour répondre à mes interrogations. Par ailleurs, leurs contributions, via des aides méthodologiques de la part de Marion et en statistiques de la part de Frédéric, ont aussi été des apports précieux pour atteindre les objectifs de la mission.

Plus globalement merci à tout le personnel de la MTD pour leur sens de l'intégration et leur accueil.

Enfin mes remerciements aux enseignants et à l'équipe de direction du mastère SILAT pour cette année où savoirs et encouragements ont été prodigués dans la bonne humeur.

## BIBLIOGRAPHIE

### • Articles et ouvrages

- BALTSAVIAS E., GRUEN A., KÜCHLER M., THEE P., WASER L.T., ZHANG L. – 2006 – Tree height measurements and tree growth estimation in a mire environment using digital surface models. *ETH, Workshop “3D Remote Sensing in Forestry”*, (p 1-33).
- BETTS Harley D., BROWN Len J., STEWART Glenn H. – 2005 – Forest canopy gap detection and characterisation by the use of high-resolution Digital Elevation Models. *New Zealand Journal of Ecology*, vol.29(1), (p 95-103).
- BONTEMPS J.D., LONGUETAUD F., FRANCESCHINI T., CHARRU M., CONSTANT T. – 2012- L'estimation de la biomasse et de la productivité forestières à l'épreuve des changements environnementaux. *Innovations Agronomiques* 18 (2012), pp 39-52
- DENSLOW J. et SPIES T. – 1990 – Canopy gaps in forest ecosystems: An introduction. *Canadian Journal of Forest Research*, vol.34, (p 339-353).
- DUPLAT P. - 1996 - Sylviculture du chêne pédonculé. ONF Bulletin technique n°31. (p 21-28).
- DUPONT S., NONIN P., RENOARD L. – 1997 - Production de modèles numériques de terrain par interférométrie et radargrammétrie. *Bulletin SFPT*, 148, (p 97-104).
- ERDAS – 2010 – LPS Project Manager User's guide, (p 1-421).
- FUJITI T., ITAYA A., MIURA M., MANABE T., YAMAMOTO S. – 2003 – Long-term canopy dynamics analysed by aerial photographs in a temperate old-growth evergreen broad-leaved forest. *Journal of ecology*, vol.91, (p 686-693).
- GONG, PENG, GREG S. Biging et Rick STANDIFORD – 2000 – Use of digital surface model for hardwood rangeland monitoring. *Journal of Range Management*, vol.53, (p 622-626).
- GOREAUD F., de COLIGNY F., COURBAUD B., DHOTE J.F., DREYFUS Ph. et PEROT T.- 2005 – “la modélisation“ : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. *Vertigo la revue électronique en sciences de l'environnement*, (En ligne) volume 6 Numéro 2
- GOSELIN F. – 2006 – Gestion, Naturalité et Biodiversité (GNB). Quantifier la réponse de la biodiversité à l'exploitation forestière. Présentation ppt, (p 1-33).
- ITAYA A. MIURA M., YAMAMOTO S. – 2004 – Canopy height changes of an old-growth evergreen broad-leaved forest analysed with digital elevation models. *Forest Ecology and Management*, vol.194, (p 403-411).
- JOUANNE M. – 2009 – Création de MNT par couple stéréoscopique, à partir de photographies aériennes hautes résolutions, outils : ERDAS et MIC MAC. Stage de licence professionnelle « Aménagement du Territoire et Urbanisation spécialité Géomatique » IUT de Digne-les-Bains, (p 1-94).
- KADMON R. et HARARI-KREMER R. – 1999 – Studying long-term vegetation dynamics using digital processing of historical aerial photographs. *Remote Sensing Environment*, vol.68, (p 164-176).
- KRAUS K. et WALDHÄUSL P. – 1997 - Manuel de photogrammétrie, Principes et procédés fondamentaux, Hermès editor, Paris, (p 407).

- LANDMANN G., GOSSELIN F., BONHÊME I. - 2009 - Bio2, Biomasse et biodiversité forestières. Augmentation de l'utilisation de la biomasse forestière : implications pour la biodiversité et les ressources naturelles. Paris, MEEDDM-Ecofor, 210 p. (www.gjp- ecofor.org).
- LEPART J., MARTY P., KLESCZEWSKI M. – 2007 – Faut-il prendre au sérieux les effets des changements du paysage sur la biodiversité ? (p 1-13).
- LUCAS R.M., ELLISON J.C., MITCHELL A., DONNELLY B., FINLAYSON M., MILNE A.K – 2002 – Use of stereo aerial photography for quantifying changes in the extent and height of mangroves in tropical Australia. *Wetlands Ecology and Management*, vol.10, (p 161-175).
- MILLER D. R., QUINE C. P., HADLEY W. – 2000 – An investigation of the potential of digital photogrammetry to provide measurements of forest characteristics and abiotic damage. *Forest Ecology and Management*, vol.135, (p 279-288).
- NAKASHIZUKA T., KATSUKI T. et TANAKA H. – 1995 – Forest canopy structure analyzed by using aerial photographs. *Ecological Research*, vol.10, (p 13-18).
- NEBOUT J.-P. – 2006 - Des chênes en croissance libre - Aspects économiques, écologiques et environnementaux (2e partie) – La Forêt Privée, n° 292, novembre-décembre 2006.
- NEBOUT J.P. -2006- Le chêne en liberté (1<sup>ère</sup> partie), produire du chêne sessile de qualité en moins de 120 ans. «La forêt privée» - n° 291 (pp 37-41).
- PARDE, J. – 1978- Normes de sylviculture pour les forêts de chêne rouvre. RFF n°1 (p 11-17)
- PINEY I. – 2010 – 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. Rapport de stage de master EA 2<sup>ème</sup> année, spécialité Biodiversité, Ecotoxicité, Ecosystèmes, (p 1-83).
- PUECH C. – 2000 – Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes, 105p, Montpellier.
- RENAUD A. – 2000 – Cartographie du volume ligneux des peuplements de la forêt Boréale à l'aide de données d'altimétrie laser, 113p, Montréal.
- ROSE N.A., BURTON P.J. - 2009 - Using bioclimatic envelopes to identify temporal corridors in support of conservation planning in a changing climate. *Forest Ecology and Management*, 258p.
- RUNKLE James R. – 1992 – Guidelines and sample protocol for sampling. Forest gap, (p 1-39).
- TANAKA H. et NAKASHIZUKA T. – 1997 – Fifteen years of canopy dynamics analyzed by aerial photographs in a temperate deciduous forest, Japan. *Ecology*, vol.78(2), (p 612-620).
- TANNOUS I., LE GOFF F., JULIEN P. – 1997 - Méthodologie de production de MNT par fusion de données mixtes radar/optique. Bulletin SFPT, 148p.
- TRICHON V. et JULIEN M.-P. – 2006 – Tree species identification on large-scale aerial photographs in a tropical rain forest, French Guiana: application for management and conservation. *Forest ecology and management*, vol.225, (p 51-61).



VEGA C. et St-ONGE B. – 2009 – Mapping site index and age by linking a time series of canopy height models with growth curves. *Forest Ecology and Management*, vol.257, (p 951-959).

VEPAKOMMA U., KNEESHAW D., St-ONGE B. – 2010 – Interactions of multiple disturbances in shaping boreal forest dynamics: a spatially explicit analysis using multi-temporal lidar data and high-resolution imagery. *Journal of Ecology*, vol.98, (p 526-539).

ZAGALIKIS G., CAMERON A.D., MILLER D.R. – 2005 – The application of digital photogrammetry and image analysis techniques to derive tree and stand characteristics. *Canadian journal of forest research*, vol.35, (p 1224-1237).

- **Sites internet :**

<http://www.esrifrance.fr> Consulté le 28 Août 2012

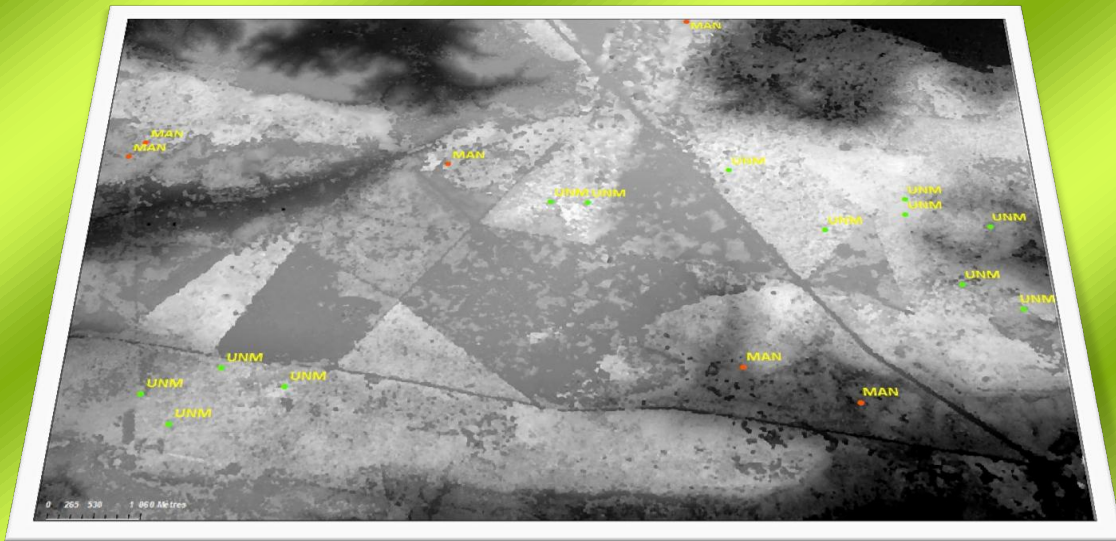
<http://www.dzmap.org/> Consulté le 28 Août 2012

<https://gnb.cemagref.fr/> Consulté le 6 juin 2012

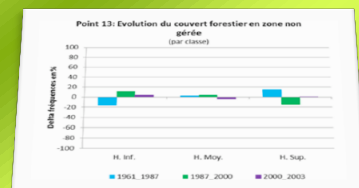
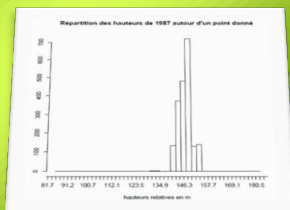
# TABLE DES ANNEXES

<b>Annexe 1-</b>	<b>Bibliographie</b> .....	<b>II</b>
<b>Annexe 2-</b>	<b>Données en biodiversité : relevés de terrain et piégeages effectués</b> .....	<b>IV</b>
<b>Annexe 3-</b>	<b>Comparaison ERDAS LPS / Mic Mac d'après JOUANNE (2009)</b> .....	<b>V</b>
<b>Annexe 4-</b>	<b>Paramètres d'orientation interne</b> .....	<b>VI</b>
	Tableau A - Paramètres d'orientation interne .....	VI
<b>Annexe 5-</b>	<b>Paramètres retenus pour générer les MNS</b> .....	<b>VII</b>
<b>Annexe 6-</b>	<b>Méthode de correction des MNS</b> .....	<b>VIII</b>
	Figure A - Passage de 32 bits à 8 bits .....	VIII
	Figure B - Identification des valeurs aberrantes sur les MNS .....	VIII
	Figure C - Correction des valeurs aberrantes (15 passages) .....	IX
<b>Annexe 7-</b>	<b>Correction des zones d'ombre sur le MNS de 1961</b> .....	<b>X</b>
	Figure D - Modeler pour la correction des zones d'ombre sur MNS de 1961 .....	X
<b>Annexe 8-</b>	<b>Emplacement des 31 points pour l'étude expérimentale</b> .....	<b>XI</b>
<b>Annexe 9-</b>	<b>Exemple d'histogramme au point 0</b> .....	<b>XII</b>
<b>Annexe 10-</b>	<b>Emplacement des points GNB</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Annexe 11-</b>	<b>Zone tampon (0,2 ha) autour des 31 points</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Annexe 12-</b>	<b>Table attributaire de 1987 pour les 31 points</b> .....	<b>XV</b>
<b>Annexe 13-</b>	<b>Etat d'avancement du projet et diagramme de GANTT</b> .....	<b>XVII</b>
	Tableau B - Ecart entre objectifs de départ et livrables .....	XIX
<b>Annexe 14-</b>	<b>Différents essais réalisés pour la génération du MNS de 1949</b> .....	<b>XXI</b>
	Tableau C- Coordonnées marques fiduciaires .....	XXI
<b>Annexe 15-</b>	<b>MNS obtenus suite aux différents essais sur les photos de 1949</b> .....	<b>XXII</b>
<b>Annexe 16-</b>	<b>Emplacement des points pour comparer les deux versions d'ERDAS</b> .....	<b>XXV</b>
<b>Annexe 17-</b>	<b>Guide méthodologique de génération de Modèles Numériques de Surface sous ERDAS LPS 2011</b> .....	<b>XXVI</b>
<b>Annexe 18-</b>	<b>Etapas pour cibler et enregistrer les valeurs des MNS sur chaque zone tampon étudiée</b> .....	<b>XXXV</b>
<b>Annexe 19-</b>	<b>Exemple de script sous le logiciel R</b> .....	<b>XXXVI</b>
<b>Annexe 20-</b>	<b>Courbe de croissance en hauteur</b> .....	<b>XXXIX</b>
	Figure E - Evolution de la hauteur dominante du chêne sessile .....	XXXIX
<b>Annexe 21-</b>	<b>Situations spécifiques pour l'élaboration des règles de décision</b> .....	<b>XL</b>
	Graphique A - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 8) .....	XL
	Tableau D - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 0) .....	XL
	Graphique B - Evolution du couvert forestier au pas de 2,5 m (point 8) .....	XLI
	Graphique C - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 31) .....	XLII
	Tableau E - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 31) .....	XLII
	Graphique D - Evolution du couvert au pas de 2.5m (point 31) .....	XLII
	Graphique E - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 21) .....	XLIII
	Tableau F - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 21) .....	XLIII
	Graphique F - Evolution du couvert forestier au pas de 2,5 m (point 21) .....	XLIII
	Graphique G - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 14) .....	XLIV
	Tableau G - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 14) .....	XLIV
	Graphique H - Evolution du couvert au pas de 2,5 m (point 14) .....	XLIV
	Graphique I - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 7) .....	XLV
	Tableau H - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 7) .....	XLV

<b>Annexe 22-</b>	<b>Analyse des différences d'histogrammes à partir de points positionnés manuellement. ....</b>	<b>XLVI</b>
<b>Annexe 23-</b>	<b>Analyse des séries temporelles centrées sur les points GNB.....</b>	<b>LXXII</b>
<b>Annexe 24-</b>	<b>Comparaison des zones gérées et non gérées autour des points GNB.....</b>	<b>XCI</b>
<b>Annexe 25-</b>	<b>Evolution du diamètre du houppier et de la hauteur des Chênes Sessiles en croissance libre</b>	<b>XCII</b>
	Figure F –Evolution de la hauteur moyenne en fonction du diamètre à 1,30 m des chênes sessiles en croissance libre (NEBOUT, 2006).....	XCII
	Figure G – Evolution du diamètre à 1,30 m du diamètre du houppier et de la hauteur moyenne en fonction de l'âge des chênes sessiles en croissance libre (NEBOUT, 2006).....	XCII



## Caractérisation des types d'évolution de couverts forestiers



---

## **Suivi de la dynamique temporelle du couvert forestier par analyse photogrammétrique.**

### **Résumé :**

Les évaluations de l'impact sur la biodiversité de la dynamique des perturbations forestières et des indices de fertilité stationnelle en forêt sont à la source de ce rapport. Une commande en ce sens a été formulée pour élaborer, via une production par photogrammétrie de séries temporelles de Modèles Numériques de Surface (MNS), des règles de décision permettant la caractérisation de types d'évolution de couverts forestiers (trouées).

La réponse apportée est inédite, car à ce jour un Modèle Numérique de Terrain était requis pour satisfaire à ce type de demande. Or, avec les MNS et l'analyse de leurs différentiels de niveaux de pixels sous forme d'histogrammes, le suivi de l'évolution d'une canopée est maintenant possible. A partir des règles de décisions élaborées, le traitement et l'analyse des séries temporelles positionnées sur des points sélectionnés par le projet GNB, en zones gérées et non gérées du site de Fontainebleau, ont pu être réalisés avec succès. Cette approche n'est actuellement opérationnelle qu'en zones forestières de plaine. Mais, il pourrait être envisageable, à partir du même concept, mais suivant d'autres protocoles de références pour les hauteurs du couvert, de répondre aux mêmes types de besoins en zone montagneuse.

**Mots-clés :** Modèles Numériques de Surface, photogrammétrie, couvert forestier, ouverture de trouée, comblement de trouée, trouée en voie de stabilisation, orthophotographies, histogrammes, pixel.

---

## **Monitoring the temporal dynamics of forest cover by photogrammetric analysis.**

### **Summary :**

Evaluations of the impact on biodiversity of forest disturbance dynamics and site fertility indices in forest are the source of this report. A request of such evaluations has been made to develop through a photogrammetric production time series Digital Elevation Models (DEM), decision rules for the characterization of the types of forest cover changes (openings).

The answer is unique, because today a Digital Terrain Model (DTM) was required to satisfy this type of request. However, with the DEM and the analysis of their differential levels of pixels in the form of histograms, to monitor the evolution of a canopy is now possible. Based on the developed rules processing and analysis of time series positioned on points selected by the GNB project in managed and unmanaged areas of the Fontainebleau's site, have been successfully completed. This approach is currently operational areas in lowland forest. But it might be possible, from the same concept, but according to other protocols references to the heights of the canopy, to answer the same kinds of needs in mountainous areas.

**Keywords :** Digital Elevation Model (DEM), photogrammetry, forest, opening gap, filling gap, gap in stabilizing, orthophotography, histogram, pixel.

---

**ANNEXES**

---

## Annexe 1- Bibliographie

Les résultats attendus sont centrés sur l'utilisation des images de télédétection et des MNS, les aspects techniques liés aux traitements des photographies aériennes (analogiques et numériques), les algorithmes à prendre en considération pour la création de modèles numériques et sur la précision des résultats. Aussi seront-ils privilégiés et plus particulièrement traités dans cette partie. De plus, comme en règle générale l'exploitation d'images de télédétection s'appuie sur au moins trois composantes qui interagissent entre elles, à savoir l'application elle-même, le choix des images et le choix des objets d'étude (PUECH, 2000), une attention spécifique sera portée sur cette dernière composante. Aussi, dans un premier temps, aborderons-nous les trouées forestières via la bibliographie écologique, puis dans un second temps, les indicateurs de production de la forêt via la bibliographie forestière, pour ensuite nous intéresser aux techniques de télédétection que nous pourrions mobiliser pour mener à bien ce projet.

### L'écologie

LANDMANN et al. 2009 mettent en place, sur le milieu forestier, une dynamique de recherche dont la problématique est la suivante « *la perspective d'une intensification des prélèvements de biomasse ligneuse en forêt nous conduit à nous interroger sur la vulnérabilité de la biodiversité forestière, et notamment sur notre capacité à identifier les situations les plus sensibles, issues de combinaisons défavorables entre certains systèmes de production (ou certaines de ces composantes) et certaines conditions environnementales* ». Dans ce contexte et pour n'aborder que l'étude de l'impact des trouées forestières sur la biodiversité, de nombreux auteurs soulignent la nécessité de trouver des stratégies pour les identifier et suivre leurs évolutions dans le temps (DENSLOW et SPIES, 1990 ; RUNKLE, 1992 ; ROSE et BURTON, 2009). C'est ainsi, par exemple, que des séries chronologiques d'images géométriquement corrigées puis projetées dans un système de coordonnées unique peuvent aider à suivre la dynamique des peuplements. Pour illustration KADMON et al. (1999), à partir de la digitalisation de photos aériennes historiques, ont quantifié, détecté et analysé la dynamique de la végétation. TANAKA (1997) a quant à lui constaté que la taille des trouées est une relation logarithmique linéaire avec leur abondance. VEPAKOMMA et al. (2010) ont confirmé ce constat pour tous les peuplements étudiés en signalant un pic en fréquence dans la classe de taille 10-100m<sup>2</sup>. Mais ce stade de réflexion ne peut être atteint qu'en veillant à la qualité, à l'orientation et à la résolution de chaque image, ainsi qu'aux différences d'illumination, aux angles d'observation et aux conditions atmosphériques, car la fiabilité des résultats en dépend (BALTSAVIAS et al., 2006). Enfin, malgré toutes ces précautions il semble encore délicat d'identifier via les photos aériennes la hauteur de la végétation des trouées (FUJITI et al., 2003). Concernant plus particulièrement les trouées, il existe plusieurs définitions et leurs caractérisations dimensionnelles sont diverses (RUNKLE, 1992 ; TANAKA et NAKASHIZUKA, 1997 ; FUJITA et al., 2003). La définition d'une trouée dans un couvert forestier est d'autant plus subjective qu'elle peut varier suivant le type de forêt (BETTS et al., 2005). BETTS et al. (2005) concluent cependant que la détection des trouées dans un couvert à partir de MNS semble réalisable en adaptant certains paramètres de la chaîne de traitement destinée à identifier les trouées. Dans ce cas il est nécessaire, sur de petits échantillons tests, de faire varier trois paramètres principaux que sont le seuil de profondeur de la trouée, la taille de la fenêtre utilisée pour les fonctions de filtres et le ratio surface/périmètre, pour tendre vers une concordance entre les données réelles et les informations issues de l'analyse des MNS (BETTS et al., 2005). Puis, ensuite seulement, d'étendre à de grandes surfaces du même type de forêt l'analyse paramétrée sur les échantillonnages (BETTS et al., 2005).

### La foresterie

La production forestière peut être évaluée à partir de la cartographie de la croissance des arbres en hauteur (BONTEMPS et al., 2012) et donc en théorie sur des séries de MNS réalisées en utilisant l'appariement stéréoscopique automatique de photos aériennes (en faisant l'hypothèse que le relief du sol est constant). Mais dans ce cas NAKASHIZUKA et al. (1995) soulèvent, entre autres, une question : la précision de MNS réalisés sur plusieurs dates est-elle suffisante, en hauteur et dans l'espace ? D'après notre recherche bibliographique il semble que oui, mais à la condition d'avoir un MNT précis pour la zone d'étude, de manière à le soustraire du MNS pour obtenir un MNC (TRICHON et JULIEN, 2006 ; MILLER et al., 2000 ; GONG et al., 2000 ; ITAYA et al., 2004 ; ZAGALIKIS et al., 2005 ; VEGA et St-ONGE, 2009). L'estimation, par MNC issu de photographies aériennes, de la hauteur de canopée est très voisine de celle mesurée sur le terrain (NAKASHIZUKA et al., 1995), mais à la condition de disposer d'un MNT fiable. Le

potentiel des MNC photogrammétriques pour évaluer la croissance pendant de longues périodes est conforté par les succès des expérimentations menées par plusieurs équipes dont MILLER et al. (2000), LUCAS et al. (2002) ou ITAY et al. (2004). Mais toutefois, tempère GOREAUD (2005), les résultats issus des analyses photogrammétriques ne doivent être vus que comme des compléments à l'expertise et à la connaissance des forestiers.

### La télédétection

Les « photographies aériennes sont l'une des formes les plus anciennes et les plus répandues de télédétection en raison notamment de leurs caractéristiques qualitatives (employées par la photo-interprétation) ou quantitatives (nécessaires à la photogrammétrie) » (RENAUD, 2000). Mais pour que le traitement photogrammétrique des photos aériennes soit possible, il est impératif qu'elles remplissent des conditions sur le plan métrique et géométrique (KRAUS et WALDHÄUSL, 1997). Si c'est le cas, le traitement automatisé de couples stéréoscopiques de photos, à savoir deux prises de vue verticales et de même hauteur, permet de mesurer l'altitude du sol ou de sa couverture. En photogrammétrie la précision de la restitution stéréoscopique d'un point de vue géométrique est directement proportionnelle à la différence d'angle d'incidence entre les deux photos (TANNOUS et al., 1997), alors qu'en radiométrie c'est l'inverse. Aussi, en photogrammétrie numérique, un compromis est inévitable, d'autant que les distorsions géométriques et radiométriques réduisent l'efficacité de la corrélation automatique (DUPONT et al., 1997). Ces corrélations servent par exemple à retrouver des points homologues entre images nécessaires à la construction des modèles numériques de surface. Ces contraintes d'acquisition étant intégrées, la production de MNS peut être réalisée par photogrammétrie numérique. Ensuite l'orthorectification (KRAUS et WALDHÄUSL, 1997) des images numériques à l'aide du MNS produit est possible : les images sont corrigées des déformations géométriques et ramenées à un référentiel géographique ce qui permet de les superposer à des cartes. A l'issue de ces traitements, la quantification, la détection et l'analyse de la dynamique de la végétation (KADMON et al., 1999) peuvent être abordées en analysant les séries temporelles de MNS, MNC (si un MNT est disponible) et éventuellement en s'appuyant sur les analyses des orthophotographies.



## **Annexe 2- Données en biodiversité : relevés de terrain et piégeages effectués**

- Dendrométrie : base du protocole SENP « MEEDDM » ; Caractérisation bois mort / bois vivant.
- Flore vasculaire : relevés en abondance-dominance avec 1 passage, 1000 m<sup>2</sup>, 2 opérateurs.
- Bryophytes : 5 bois vivants, 5 bois morts, 3 placettes circulaires de 2 m de rayon : 1 passage, 1 opérateur.
- Champignons : bois vivants et morts : 1 passage, 2 opérateurs.
- Coléoptères saproxyliques : 2 pièges à interception/ placette : 1 relevé/ mois.
- Oiseaux : points d'écoute STOC (5 min), 2 passages.
- Chauve-souris : points d'écoute ultrasons, 3 passages (1 printemps, 2 été).

## Annexe 3- Comparaison ERDAS LPS / Mic Mac d'après JOUANNE (2009)

### ERDAS LPS :

- Caractéristiques
    - Logiciel payant.
    - Qualité de l'extraction du MNT est due aux calculs de l'algorithme intégré dans le logiciel pour réaliser l'aéro triangulation.
    - Réalisé grâce à un auto-corrélateur qui produit un MNT raster par stéréoscopie.
  - Avantages/inconvénients :
    - Artéfacts dus aux décalages dans les points de liaison (p. 23). Différents tests on étaient réalisés pour voir d'où provenait le problème des décalages lors de la mise automatique des tie points (p. 78 à 89).
    - Problème sur les bords d'images.
    - Un manque de recouvrement entre les différents couples de photos engendre :
      - des décalages lors de la mise automatique des tie points ;
      - une mauvaise corrélation entre couple stéréo.
- Solution : lancer couple par couple la mise en place automatique des tie points.

### MicMac :

- Caractéristiques :
  - Logiciel « OpenSource » de l'IGN ;
  - MicMac extrait un MNT à partir de couple stéréoscopique mais n'intègre pas la partie qui permet de créer les points de liaison entre les images et un algorithme d'aéro triangulation (travail réalisé par IGN avec leurs logiciels).
  - utilise la géométrie d'acquisition de l'image issue de la chaîne de traitement « Pastis » et « Apero » pr retrouver les points altimétriques du chantier. A noter que « Pastis » et « Apero » sont des logiciels payant de l'IGN. Le premier permet de trouver des points homologues automatiquement et le deuxième de retrouver l'orientation interne et externe.
- Avantages/inconvénients :
  - Peu de défauts constatés.
  - Le plus performant quand beaucoup de clichés.
  - Le problème est de définir l'orientation externe car les logiciels permettant sa définition ne sont pas OpenSource (appartiennent à l'IGN).

## Annexe 4- Paramètres d'orientation interne

Année	Nombre de clichés	Format (cm)	Type de caméra	Système de projection/datum/sphère	Longueur focal (mm)	Coordonnées point principal (x <sub>0</sub> , y <sub>0</sub> )	Coordonnées des marques fiduciaires		Orientation des marques fiduciaires	Distorsion radiale de la lentille : distance radiale (mm)	Coefficients de distorsion	Orientation interne : taille pixel dans la direction de X et Y (pour caméra numérique)	
							X	Y					
1949	6	13*18	Argentique	- Lambert Conformal Conic - NTF - Clarke 1880 IGN	150	Non renseigné	65 0 -65 0	0 -90 0 90		Non renseigné	Non renseigné		
1961	5	19*19	Argentique	- Lambert Conformal Conic - NTF - Clarke 1880 IGN	125	Non renseigné	-90.53 0 90.24 0	0 90.380 0 -90.22		Non renseigné	Non renseigné		
1987	4		Argentique	- Lambert Conformal Conic - NTF - Clarke 1880 IGN	214.03	X <sub>0</sub> = -0.010 Y <sub>0</sub> = -0.0050	105.997 -105.998 -106.00 106.00 -0.002 -110.005 0.004 109.984	-105.998 -105.997 106.003 106.002 -110.005 -0.004 109.989 0.003		0 ; 10 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 70 ; 80 ; 90 ; 100 ; 110 ; 120 ; 130 ; 140 ; 150.	Non renseigné		
2000 bas (IFN)	4		Argentique	- Lambert Conformal Conic - NTF - Clarke 1880 IGN	303.8770	X <sub>0</sub> = -0.0110 Y <sub>0</sub> = -0.0030	106.004 -106.007 -106.004 106.006 -0.001	-106.001 -106.007 106.001 106.006 -109.996		10 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 70 ; 80 ; 90 ; 100 ; 110 ; 120 ; 130 ; 140 ; 148	K0 = -2.3102833e-05 K1 = 2.7246072e-09 K2 = -6.4862010e-14		
2000 haut (IFN)	4		Argentique	- Lambert Conformal Conic - NTF - Clarke 1880 IGN	303.8770	X <sub>0</sub> = -0.0110 Y <sub>0</sub> = -0.0030	-110.004 0.004 110.002	-0.001 109.998 -0.001					
2003 bas	5		Numérique	- Lambert Conformal Conic - NTF - Clarke 1880 IGN	60.1709	Non renseigné	Aucune		Aucune	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné	X = 9 microns Y = 9 microns
2003 haut	7												

Tableau A - Paramètres d'orientation interne

Remarque : Les marques fiduciaires pour 1949 et 1961 ont été calculées car non renseignées dans le rapport de calibration.

## Annexe 5- Paramètres retenus pour générer les MNS

Lors de la génération des MNS sous LPS, les paramètres ci-dessous ont été utilisés :

- Résolution : 1 m
- L'algorithme du module LPS pour extraire l'information d'élévation d'une image n'est pas utilisé.
- Option « forêt » utilisée avec les paramètres suivant en fonction des années :
  - 1961 :
    - Taille de la corrélation : 7\*7
    - Coefficient de corrélation limite : 0,6
  - 1987 :
    - Taille de la corrélation : 7\*7
    - Coefficient de corrélation limite : 0,7
  - 2000 et 2003 :
    - Taille de la corrélation : 7\*7
    - Coefficient de corrélation limite : 0,8

Remarque : Le coefficient limite a été choisi par rapport à l'ancienneté des photos aériennes. En effet, plus les photos sont de mauvaise qualité, plus le coefficient de corrélation limite doit être petit, sans toutefois aller en dessous de 0,5 (ERDAS, 2010).

## Annexe 6- Méthode de correction des MNS.

### Passage du 32 bits en 8 bits

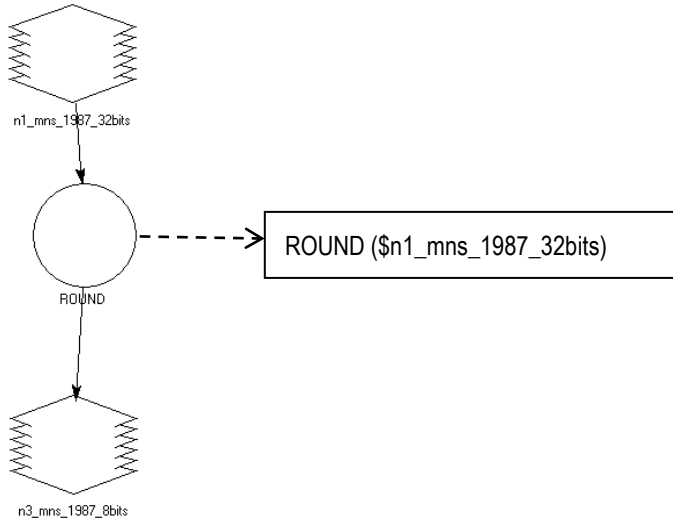


Figure A - Passage de 32 bits à 8 bits.

### Identification des valeurs aberrantes sur les MNS

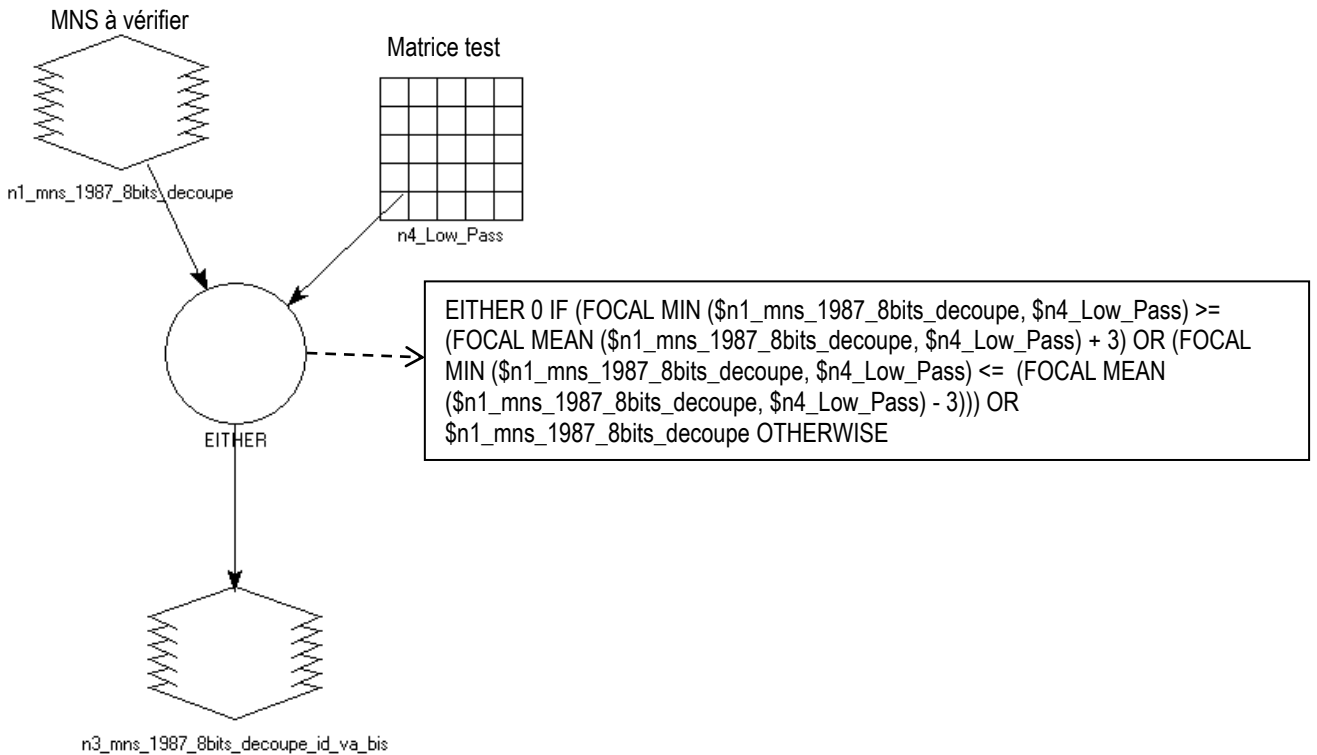
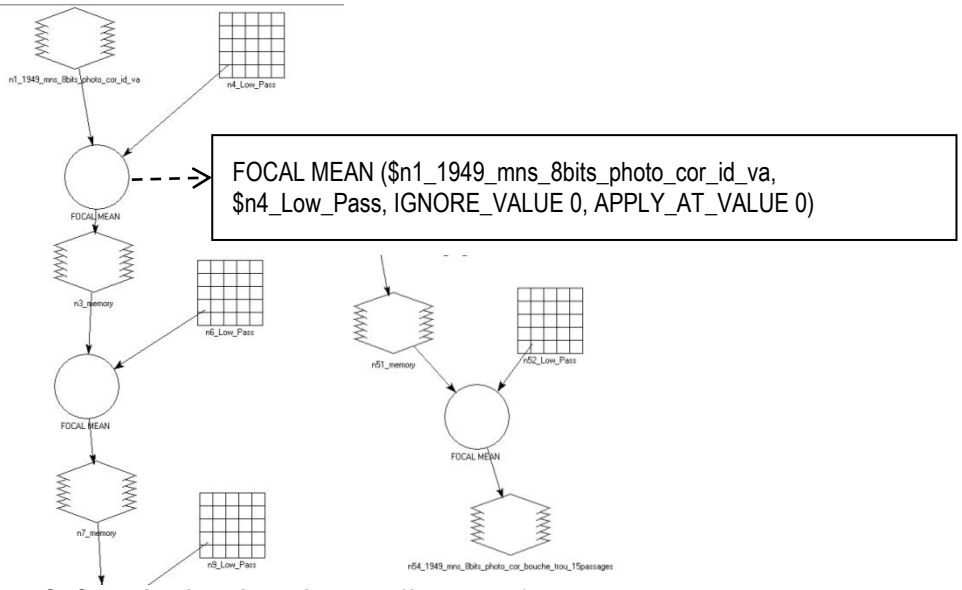


Figure B - Identification des valeurs aberrantes sur les MNS.

**Correction des valeurs aberrantes (15 passages)**



**Figure C - Correction des valeurs aberrantes (15 passages).**

## Annexe 7- Correction des zones d'ombre sur le MNS de 1961.

### Sous ArcGis :

- Création d'une couche binaire (0 et 1) où 1 correspond aux valeurs inférieures à 40 (seuil de nuance de gris) sur l'orthophoto de 1961 (Outils Spatial Analyst → Algèbre spatial → Calculatrice Raster).
- Reclassification de la couche binaire pour avoir en 0 les valeurs correspondantes au seuil (Outils Spatial Analyst → Reclassement → reclassification).
- Multiplication de cette couche avec le MNS de 1961. La couche résultante comprend les valeurs 0 (seuil) et les valeurs du MNS de 1961 aux autres endroits (Outils Spatial Analyst → Algèbre spatial → Calculatrice Raster).

### Sous ERDAS Imagine® :

- Remplacement des valeurs 0 par celles du MNT (obtenu avec les photos de 2000 d'hiver) à l'aide d'un « model maker » ci-dessous.

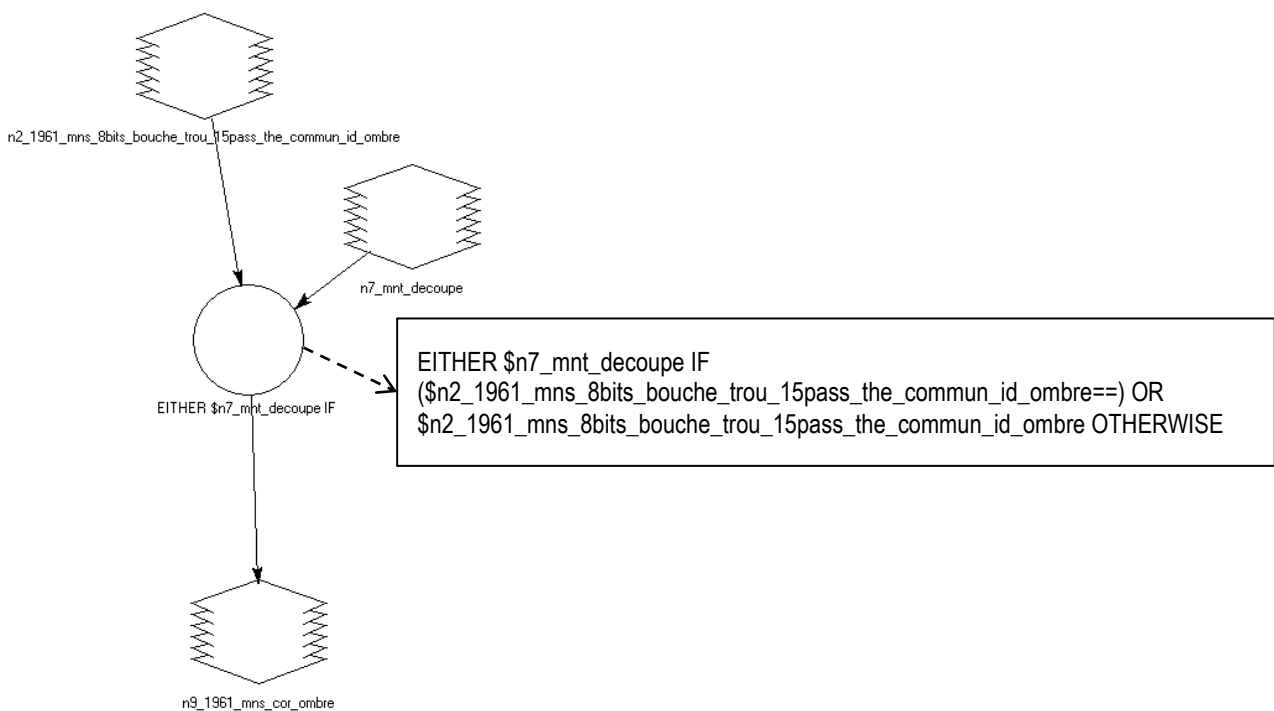
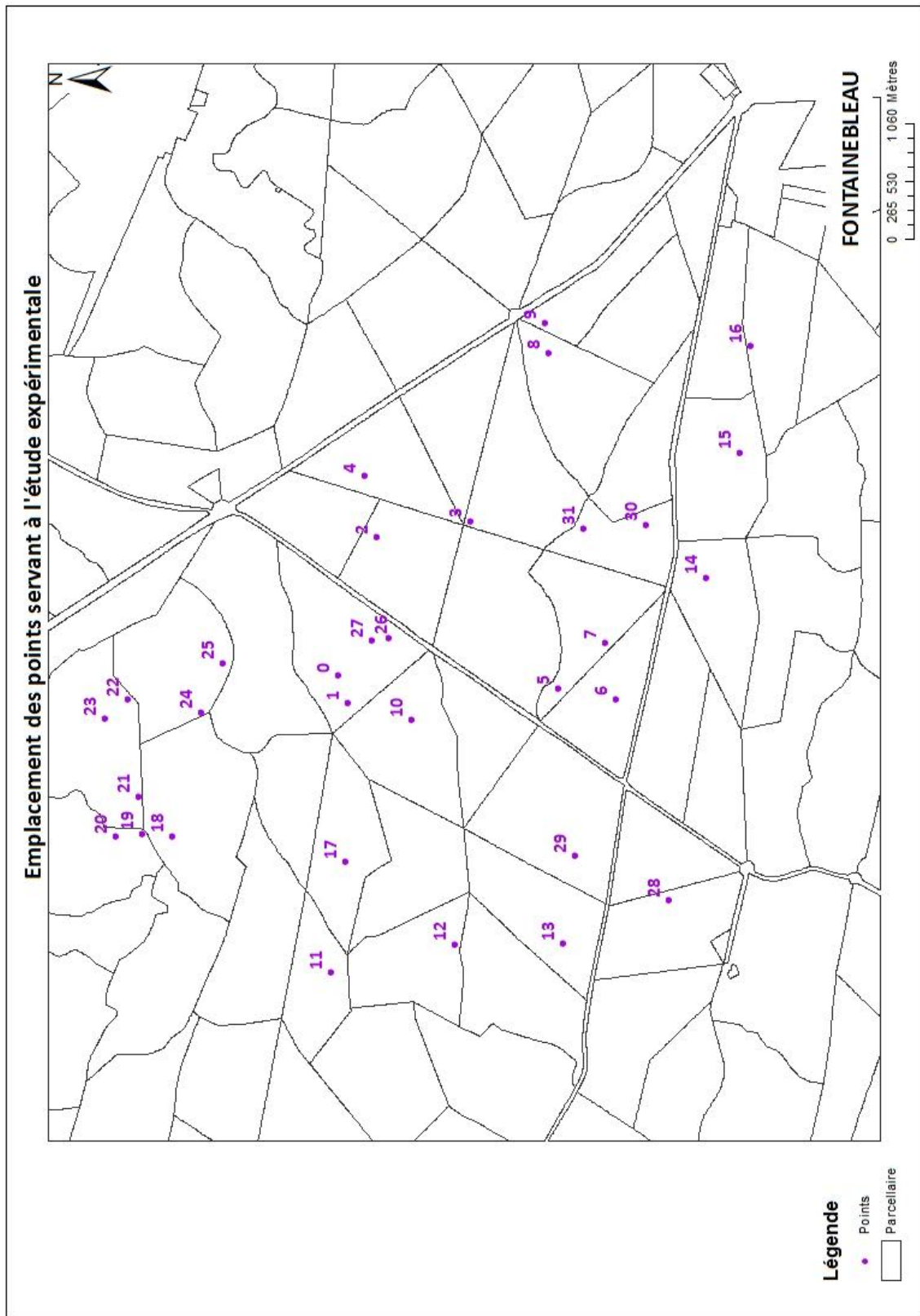


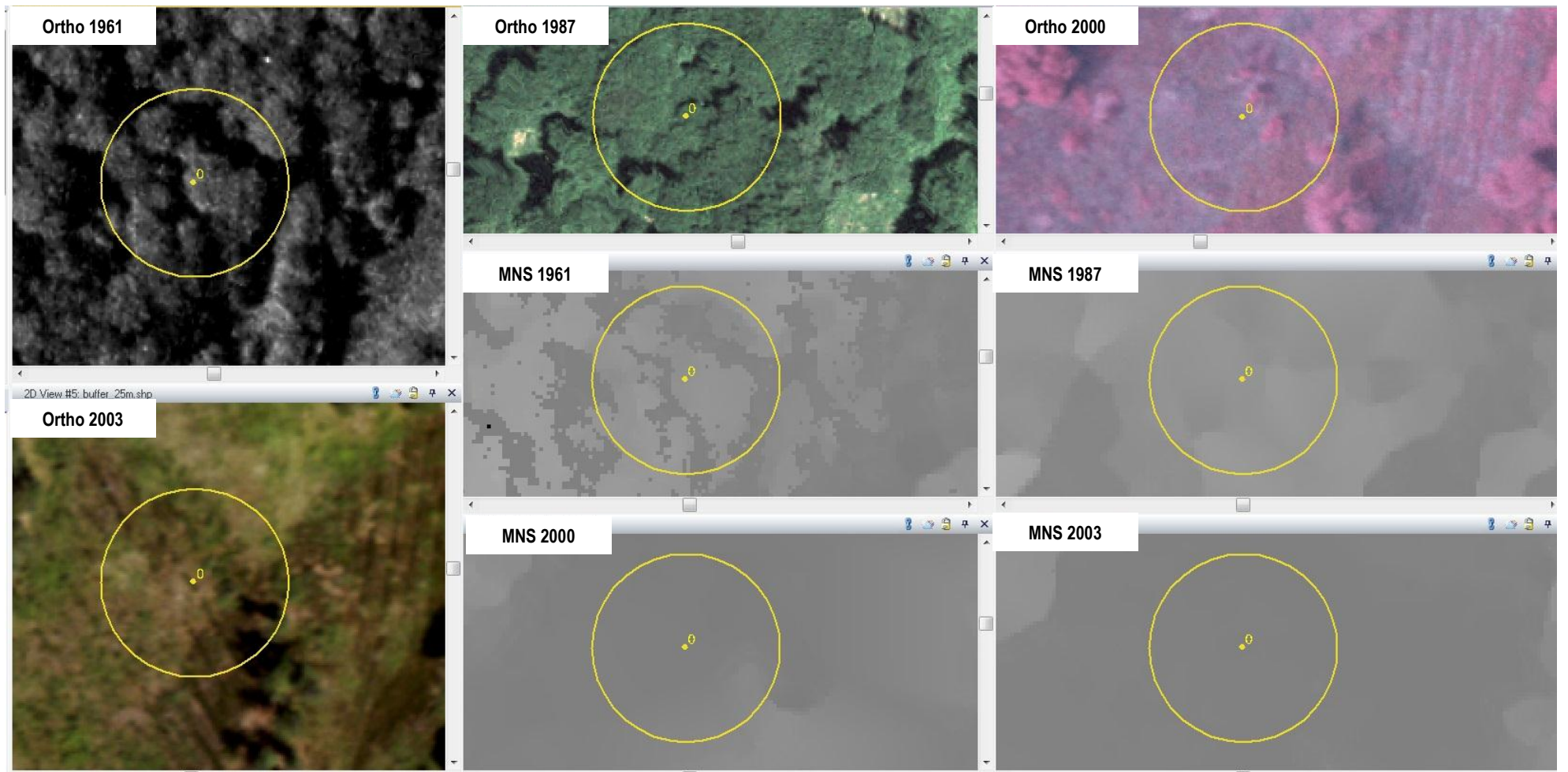
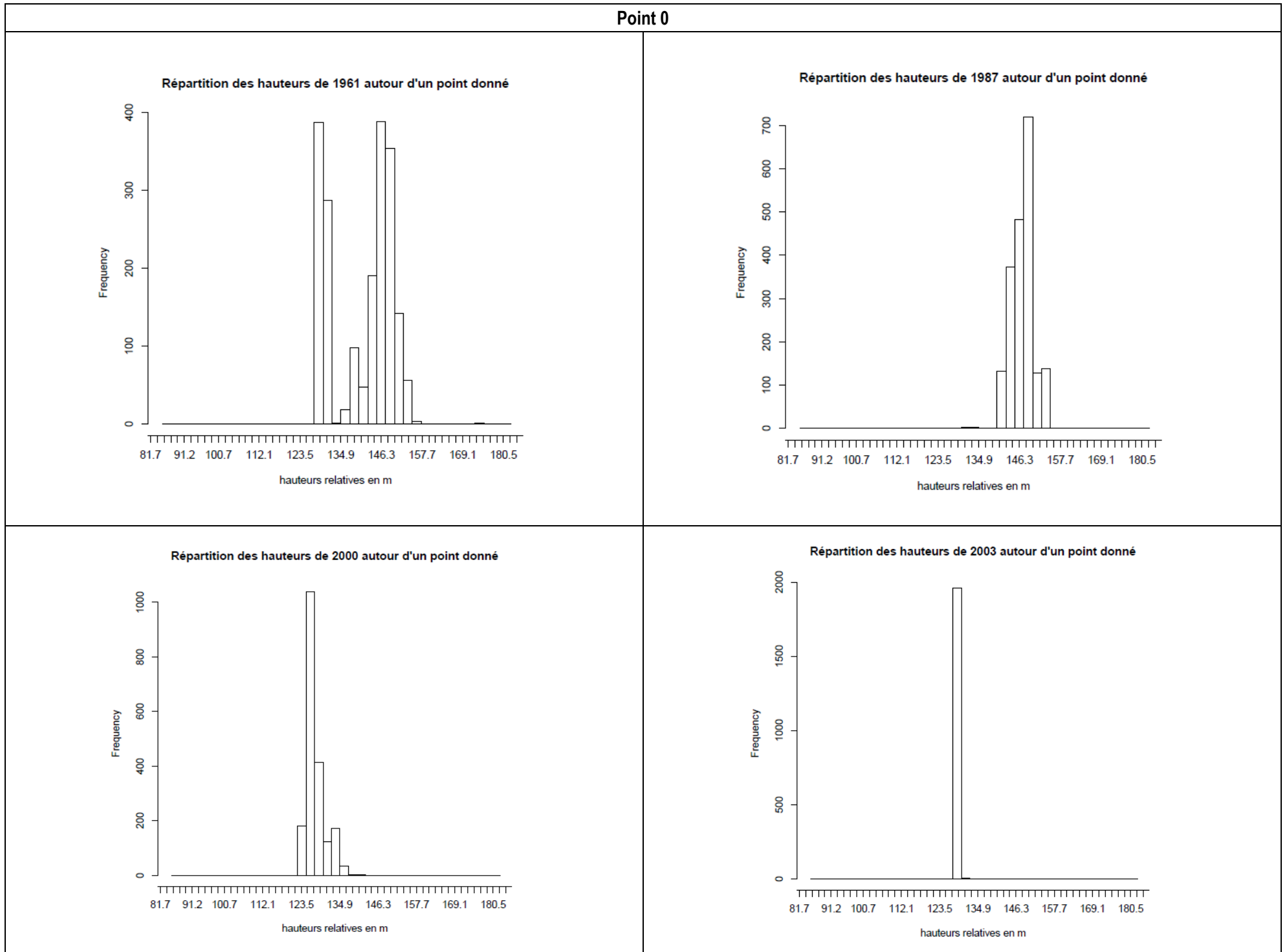
Figure D - Modeler pour la correction des zones d'ombre sur MNS de 1961.

Annexe 8- Emplacement des 31 points pour l'étude expérimentale.

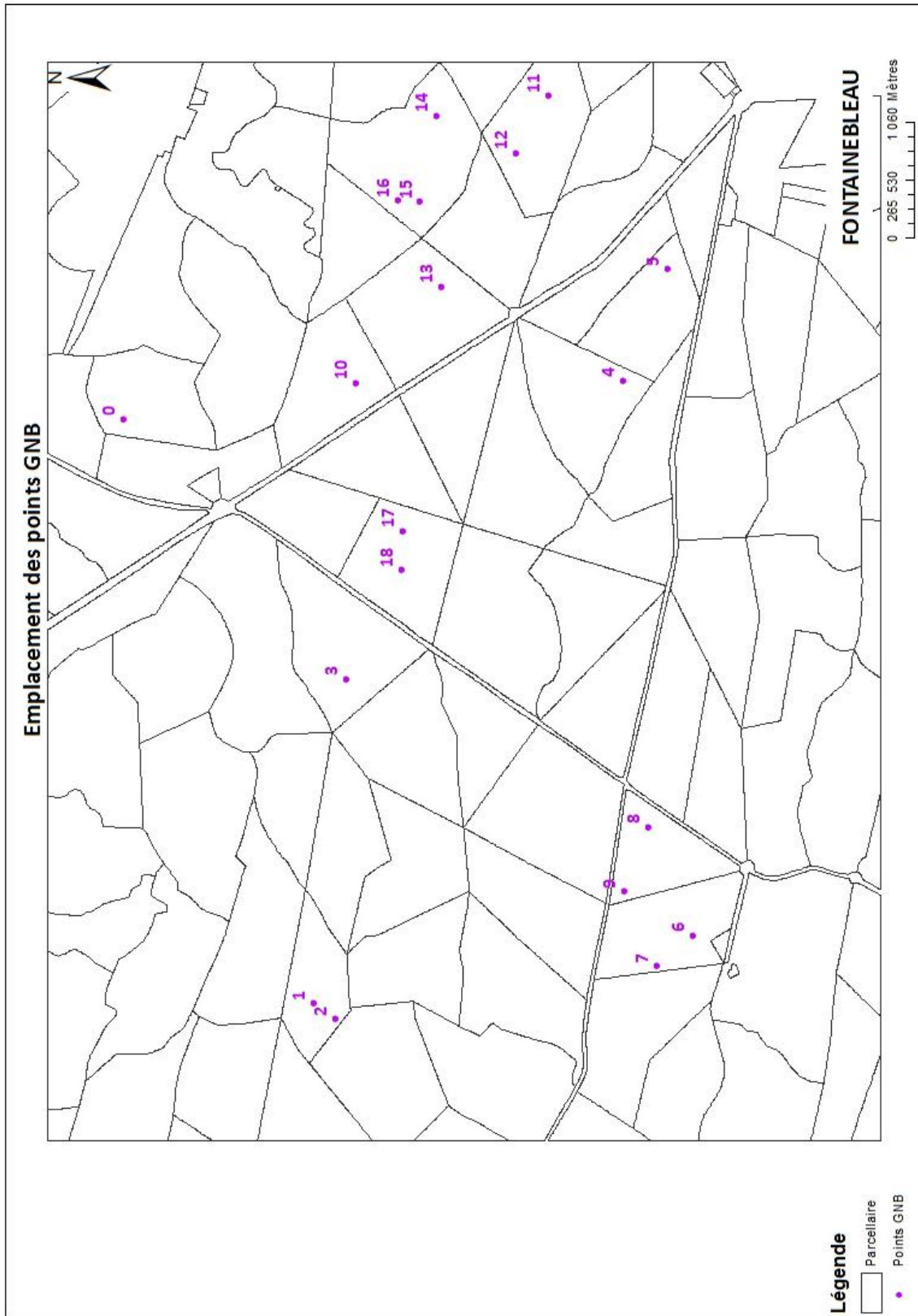




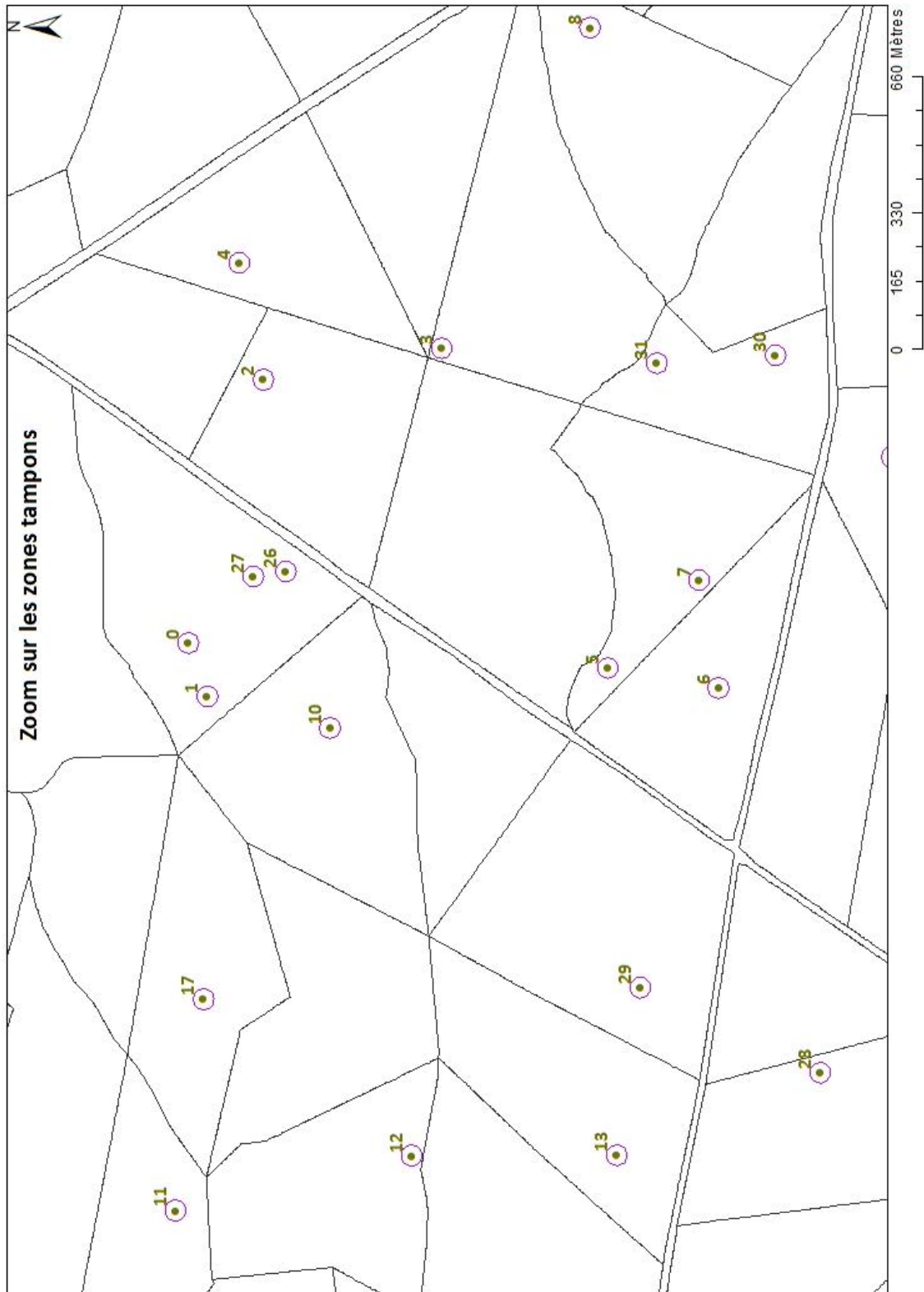
Annexe 9- Exemple d'histogramme au point 0



Annexe 10- Emplacement des points GNB.



Annexe 11- Zone tampon (0,2 ha) autour des 31 points



## Annexe 12- Table attributaire de 1987 pour les 31 points

Table

1987\_pts\_buf25

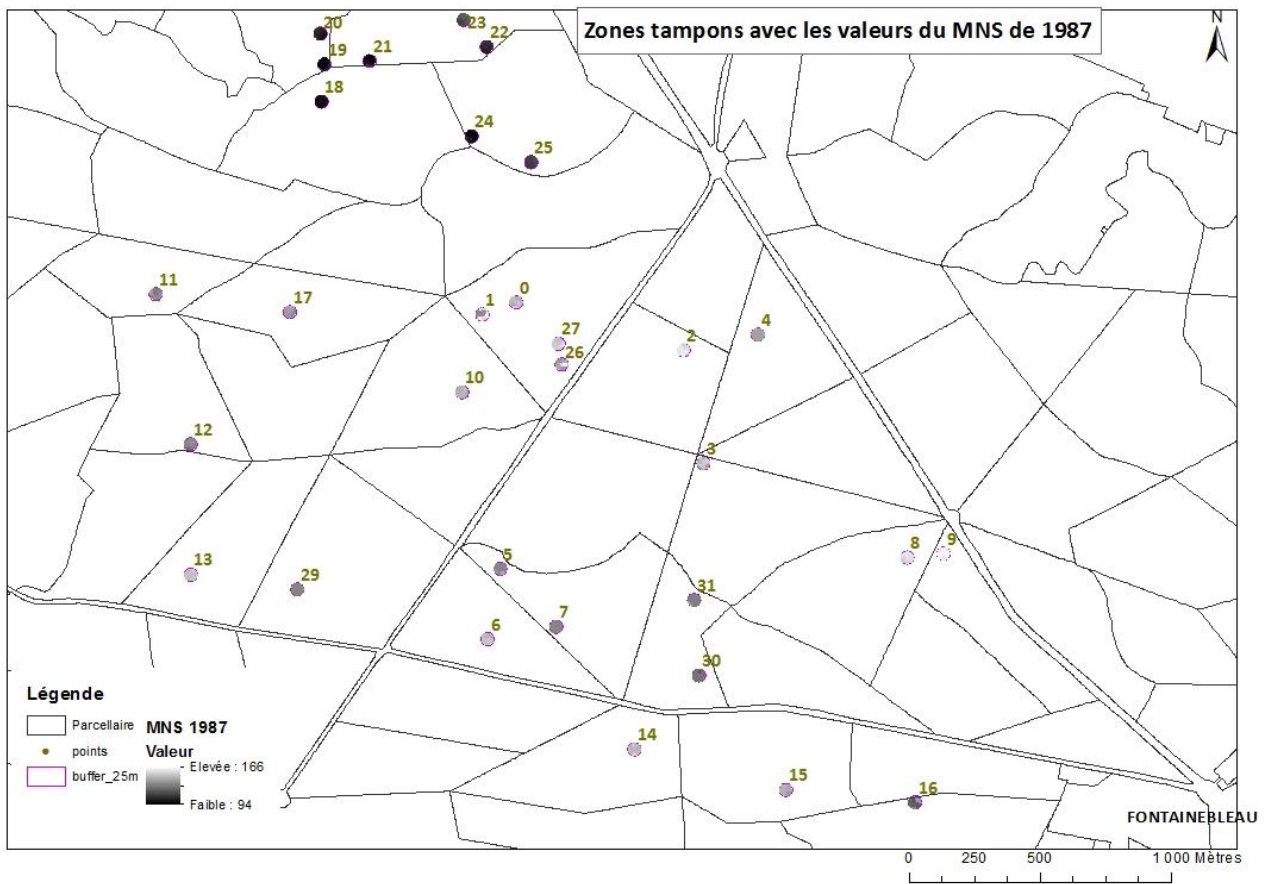
Hauteur

ID zone tampon

FID	Shape	buffer 25m FID	POINTID	GRID_CODE	FID 2	ID	BUFF DIST
2691	Point	29315	29316	163	2	2	25
2691	Point	29316	29317	163	2	2	25
2691	Point	29317	29318	163	2	2	25
2691	Point	29318	29319	163	2	2	25
2691	Point	29319	29320	163	2	2	25
2691	Point	29320	29321	164	2	2	25
2691	Point	29321	29322	164	2	2	25
2691	Point	29322	29323	164	2	2	25
2691	Point	29323	29324	163	2	2	25
2692	Point	29324	29325	163	2	2	25
2692	Point	29325	29326	163	2	2	25
2692	Point	29326	29327	162	2	2	25
2692	Point	29327	29328	162	2	2	25
2692	Point	29328	29329	162	2	2	25
2692	Point	29329	29330	161	2	2	25
2692	Point	29330	29331	164	2	2	25
2692	Point	29331	29332	164	2	2	25
2692	Point	29332	29333	164	2	2	25
2692	Point	29333	29334	163	2	2	25
2693	Point	29334	29335	163	2	2	25
2693	Point	29335	29336	163	2	2	25
2693	Point	24976	24977	141	4	4	25
2693	Point	24977	24978	141	4	4	25
2693	Point	24978	24979	141	4	4	25
2693	Point	24979	24980	141	4	4	25
2693	Point	24980	24981	141	4	4	25
2693	Point	24981	24982	141	4	4	25
2693	Point	24982	24983	141	4	4	25
2693	Point	24983	24984	141	4	4	25
2694	Point	24984	24985	141	4	4	25
2694	Point	24985	24986	141	4	4	25
2694	Point	24986	24987	141	4	4	25
2694	Point	24987	24988	141	4	4	25
2694	Point	24988	24989	141	4	4	25
2694	Point	24989	24990	141	4	4	25
2694	Point	24990	24991	141	4	4	25
2694	Point	24991	24992	141	4	4	25
2694	Point	24992	24993	141	4	4	25
2694	Point	24993	24994	141	4	4	25
2695	Point	24994	24995	141	4	4	25
2695	Point	24995	24996	141	4	4	25
2695	Point	24996	24997	141	4	4	25
2695	Point	24997	24998	141	4	4	25
2695	Point	24998	24999	141	4	4	25
2695	Point	24999	25000	141	4	4	25
2695	Point	25000	25001	141	4	4	25
2695	Point	25001	25002	141	4	4	25
2695	Point	25002	25003	141	4	4	25

1 (0 sur 62526 sélectionnés)

1987\_pts\_buf25



---

## Annexe 13- Etat d'avancement du projet et diagramme de GANTT.

### Travaux réalisés sur la période du 1<sup>er</sup> avril au 15 juin 2012

- Prise de contact, par mail, avec l'IGN (Bernard Lefevre ; [bernard.lefevre@ign.fr](mailto:bernard.lefevre@ign.fr)) pour savoir s'il existe un MNT (Modèle Numérique de Terrain) d'une résolution de 1 m sur la zone de Fontainebleau. La réponse est que seul un produit BD Alti au pas de 25 m est commercialisé. Cette réponse engendre une nouvelle contrainte à intégrer dans le projet.
- Recherches bibliographiques qui confortent mes connaissances sur le sujet et alimentent une synthèse bibliographique.
- Réunion téléphonique le 2 avril pour définir les objectifs du projet SILAT puis la rédaction du compte-rendu de la réunion.
- Génération des MNS (Modèle Numérique de Surface) des années 1961, 1987, 2000 et 2003, sur le site de Fontainebleau, avec ERDAS Imagine 2011 :
  - Identification et correction des valeurs aberrantes avec l'aide d'un modeler sous ERDAS Imagine 2011 ;
  - Réalisation d'une emprise commune pour les différentes années.
- Réalisation d'un tableau récapitulatif, sous Excel, des différents paramètres pour l'orientation interne rentrés sous ERDAS LPS afin de générer les MNS des différentes années.
- Rédaction d'un compte-rendu synthétique du séminaire portant sur la photogrammétrie et la télédétection auquel j'ai participé à l'irstea de Grenoble le 10 mai 2012.
- Recherches particulières sur les paramètres relatifs à l'année 1949 :
  - réalisation de plusieurs essais pour tenter d'obtenir un MNS correct sous ERDAS LPS. Mais sans résultat satisfaisant pour l'instant ;
  - Même type d'essais sous le logiciel MicMac (logiciel développé par l'IGN) mais la prise en compte des paramètres de la focale n'est pas résolue.
- Réalisation de tutoriels :
  - LPS sous ERDAS 2011 ;
  - MosaicPro sous ERDAS 2011.
- Comparaison des MNS obtenus avec la version d'ERDAS 2011 et ceux obtenus avec la version ERDAS 9.2 :
  - Relevés de hauteur sur quelques pixels pris au hasard puis conservés sur deux MNS d'une même année. Avec ensuite une comparaison des hauteurs de ces mêmes pixels avec celles issues du Scan 25 qui sert de référence afin de cibler les aberrations faute de mieux eu égard à sa faible précision.
- Analyse de la hauteur relative : étude de l'évolution d'un pixel sur les quatre années disponibles. NB : les pixels retenus sont situés aux points GNB.
- Réalisation des différences de MNS : 1961-1987 ; 1987-2000, 2000-2003.
- Analyse de la surface d'une trouée sous Arcgis :
  - Réalisation de différentes zones tampons (50, 100, 150 et 200 m) autour des relevés de biodiversité ;
  - Extraction par masque des valeurs des MNS contenues dans la zone tampon considérée ;
  - Reclassification des MNS pour obtenir les mêmes classes de hauteurs relatives sur les différentes années ;
  - Etude de l'évolution des classes sous Excel.
- Proposition d'une définition de trouée en cours de réalisation.

### Travaux réalisés sur la période du 15 juin au 2 juillet 2012

- Entretien téléphonique le 22 juin 2012 dont les objectifs sont de faire le point sur les travaux convenus lors de la réunion du 2 avril 2012 et de trouver une méthode d'identification des trouées à partir de MNS. Rédaction d'un compte-rendu suite à la réunion.

- Réalisation, sous ArcGis, de zones tampons autour des points GNB puis extraction, dans ces zones, des valeurs des MNS pour chaque année. La même opération a été effectuée autour de points (6) pris dans des zones de trouées.
- Réalisation de script R pour obtenir des histogrammes par année avec les MNS.
- Analyse des histogrammes.

### Travaux réalisés sur la période du 3 juillet au 30 juillet 2012

- Entretien téléphonique le 6 juillet 2012 dont les objectifs sont de faire le point par rapport à la réunion du 22 juin 2012 et de déterminer la méthode de réalisation des histogrammes ainsi que les analyses à mener.
- Comparaison des MNS entre eux pour vérifier leurs cohérences. Pour ce faire, sous ArcGis création d'une couche de points, en situant chacun d'entre eux sur des zones (routes...) où l'altitude reste à peu près constante d'une année à l'autre. Après traitement, importation des valeurs sous Excel pour analyse.
- Superposition de la BDOortho sur le Scan 25 pour vérifier si des décalages existent. Cette opération est possible car la BDOortho sert de référence pour les points de calages.
- Sur le MNS de 1961, comblement des zones d'ombres par les valeurs du MNT afin de voir si les résultats varient. Pour cela :
  - sous ArcGis, à partir de l'orthophoto de 1961, création d'une couche raster ayant 0 où les valeurs sont supérieures à 40 et 1 où elles sont inférieures à 40 (correspond aux zones d'ombre). Reclassification de la couche pour avoir en 0, les zones d'ombre et 1 les autres zones. Puis multiplication (calculatrice raster) de cette dernière avec le MNS de 1961 ce qui aboutit à un MNS ayant des 0 aux zones d'ombre.
  - sous ERDAS, remplacement des 0 par les valeurs du MNT à l'aide d'un modeler « correction\_ombre\_mns\_1961 ».

Après cette opération il s'avère que les tendances premières du MNS restent inchangées.

- Réalisation d'histogrammes :
  - Création d'une couche points : points placés de tel sorte qui correspondent à des zones de comblement, de trouées et stables ;
  - Réalisation d'une zone tampon autour de chaque point de 0,2 ha ;
  - Extraction des valeurs des différents MNS dans les zones tampon ;
  - Exportation de ces valeurs dans le logiciel R ;
  - Réalisation des histogrammes.
- Analyse des histogrammes.
- Intégration sous ERDAS LPS, car plus de points de contrôle sont pris en considération pour les différentes années lors de la triangulation sans tenir compte de la RMSE.
- Réalisation des histogrammes autour des 6 points identifiés lors de la période du 15 juin au 2 juillet pour pouvoir comparer les résultats.
- Réalisation des différentiels d'histogrammes pour ces points.

### Travaux réalisés sur la période du 1<sup>er</sup> août au 1<sup>er</sup> septembre 2012

- Entretien téléphonique le 27 juillet 2012.
- Prise de contact avec Camille SALOU, chef de marché SCAN - Département Marché Professionnel à l'IGN, pour savoir s'il y avait la possibilité d'obtenir un MNT à 25m.
- Identification, sur les orthophotos de 1961, 1987, 2000 et 2003, d'une trentaine de points aux endroits d'apparition de trouées, de comblement, de zones stables, d'arbres isolés....
- Réalisation des histogrammes autour de ces points et des différentiels d'histogrammes.
- Projet LPS, pour les différentes années (1961, 1987, 2000 et 2003), en utilisant l'option « forêt » lors de la génération des MNS.
- Plan du rapport en cours d'élaboration.

- Elaboration des critères de définition d'une trouée et des règles d'évolution à partir de l'analyse visuelle des orthophotos et des valeurs issues de MNS.
- Comparaison des MNS issu d'ERDAS 2011 avec option avec ceux issus d'ERDAS 9.2.
- Rédaction rapport.

### Production attendue

Conformément à la lettre de mission, un guide méthodologique de génération de MNS est à établir. Puis, en appliquant cette approche méthodologique, des séries temporelles sont à créer et à analyser sur le site de Fontainebleau. Ensuite, en s'appuyant sur la méthodologie de création de MNS et en tenant compte de la qualité des séries temporelles obtenues, des règles de décision permettant la caractérisation de types d'évolution de couverts forestiers sont à construire. Enfin, la qualification d'un produit dérivé, centré sur la prise en compte de hauteurs spécifiques relatives à la caractérisation de différents types de surface forestière, sera proposée sous la forme de traitements et d'analyses des séries temporelles positionnées sur les points GNB en zones gérées et non gérées du site de Fontainebleau.

### Ecarts entre objectifs de départ et livrables

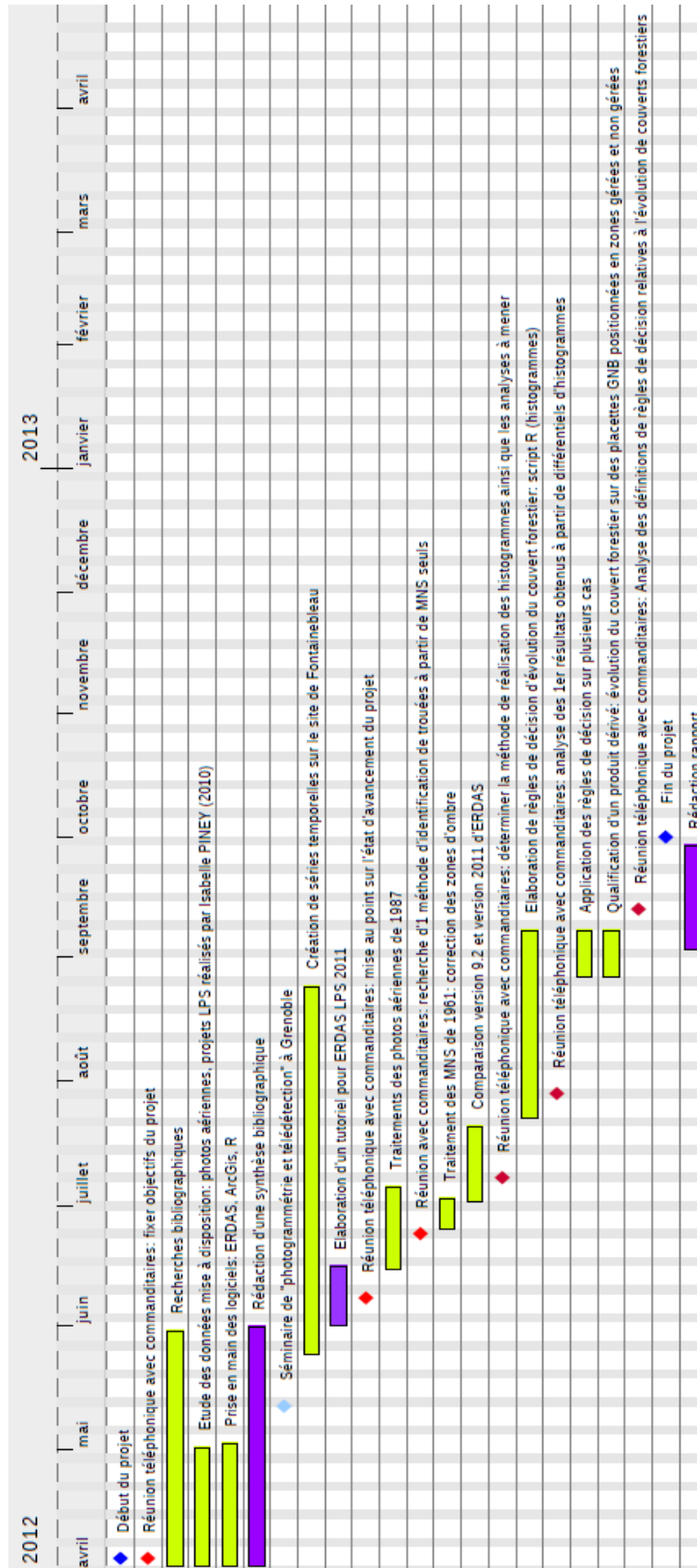
Les écarts entre la production attendue et celle qui sera livrable figurent dans le Tableau B.

<b>Ecarts entre objectifs de départ et livrables</b>			
<b>Projets concernés</b>	<b>Objectifs de départ</b>	<b>Livrables</b>	<b>Observations</b>
Projets GNB et FORESEE	Guide méthodologique pour calculer les MNS par photogrammétrie sur photographies acquises par caméra numérique, par chambres photogrammétriques récentes et anciennes.	Un guide méthodologique pour ERDAS LPS allant de la création d'un projet LPS à la génération d'un MNS est proposé.	Objectif atteint.
Projet GNB	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Création de séries temporelles sur un site d'étude à Fontainebleau (77), voire sur un 2<sup>e</sup> à Engins-Autrans (38) suivant le temps imparti.</li> <li>- Analyse de ces séries temporelles.</li> <li>- Qualification d'un certain nombre de produits dérivés pour les 2 sites.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Création de séries temporelles sur le site d'étude à Fontainebleau (77).</li> <li>- Analyse de séries temporelles sur le site d'étude à Fontainebleau (77).</li> <li>- Création de règles de décision d'évolution de couverts forestiers.</li> <li>- Qualification d'un produit dérivé pour le site sur le site d'étude à Fontainebleau (77).</li> </ul>	Objectif atteint sur chacun des axes mais en un seul lieu. Le site d'Engins-Autrans (38) faute de temps, n'a pas été pris en considération. Par contre des règles de décision d'évolution de couverts forestiers ont été élaborées.
Projet FORESEE	Selon l'évolution du projet et l'avancement des travaux dans le cadre du projet GNB, le travail pourra consister (1) en la simple mise à disposition du guide méthodologique assorti d'une évaluation de la précision des produits obtenus par photogrammétrie, (2) au transfert de compétences à un post-doctorant INRA, partenaire du projet et (3) au traitement de quelques couples stéréoscopiques en complément des traitements réalisés par l'IGN et l'INRA.	Mise à disposition du guide méthodologique assorti d'une évaluation de la précision des produits obtenus par photogrammétrie.	L'évolution du projet et l'avancement des travaux relatifs au projet GNB font que seul le guide méthodologique est livrable.
	Rapport présentant les travaux réalisés.		Objectif atteint.

Tableau B - Ecarts entre objectifs de départ et livrables



Diagramme de GANTT



## Annexe 14- Différents essais réalisés pour la génération du MNS de 1949

### Paramètres communs aux différents essais :

- **Nombre de clichés** : 6
- **Caméra** : longueur focale : 150 mm ; format photos : 13\*18 cm (zone utile) et coordonnées des marques fiduciaires sont résumés dans le Tableau C :

Ligne	Film X (mm)	Film Y (mm)
1	65	0
2	0	-90
3	-65	0
4	0	-90

Tableau C- Coordonnées marques fiduciaires.

Orientation externe : **nombre de points de contrôle utilisés pour la triangulation : 6 ; nombre de points de liaison utilisés pour la triangulation : 120 ;**

- **Résolution du MNS généré** : 1 m.

Pour certains essais une correction est effectuée sur les photos aériennes de base, à savoir l'application de la fonction « focale médiane » avec une fenêtre 3\*3 sur toutes les photos aériennes par l'intermédiaire d'un Modeller sous ERDAS Imagine.

### Les différents essais réalisés sous ERDAS LPS

- 1<sup>er</sup> essai

Le MNS est généré en gardant les paramètres par défaut sans utiliser le modèle proposé par LPS (« use adaptive ATE »).

- 2<sup>ème</sup> essai

Une correction des photos aériennes de départ est effectuée. Puis le MNS est généré en gardant les mêmes paramètres que pour le 1<sup>er</sup> essai.

- 3<sup>ème</sup> essai

La génération du MNS est effectuée en gardant les paramètres par défaut donc avec en utilisant le modèle proposé par LPS (« use adaptive ATE ») avec comme précision pour le modèle de 1.

- 4<sup>ème</sup> essai

Une correction des photos aériennes de départ est réalisée. Le MNS est généré en gardant les paramètres par défaut donc avec l'utilisation du modèle proposé par LPS (« use adaptive ATE ») avec comme précision du modèle : 1.

- 5<sup>ème</sup> essai

Projet LPS → DTM Extraction → Accuracy: utilisation des points de liaison pour une meilleure précision du MNS généré.

- 6<sup>ème</sup> essai

Projet LPS → DTM Extraction → Accuracy: utilisation des points de liaison pour une meilleure précision du MNS généré.

- 7<sup>ème</sup> essai

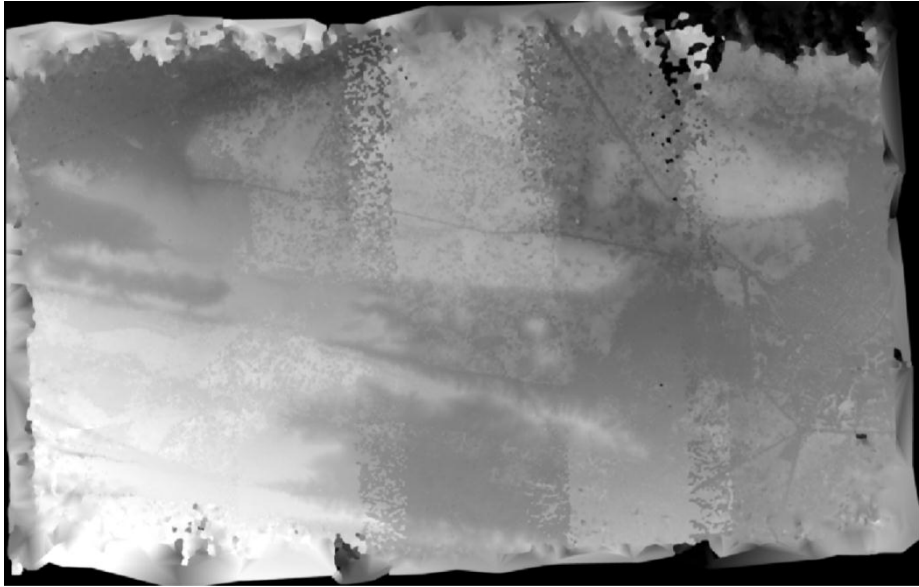
Les photos aériennes de départ ne sont pas corrigées. La génération du MNS est réalisée avec l'utilisation de l'algorithme du logiciel (précision 1 m). De plus une réduction de la surface de corrélation du MNS par 22 %.

- 8<sup>ème</sup> essai

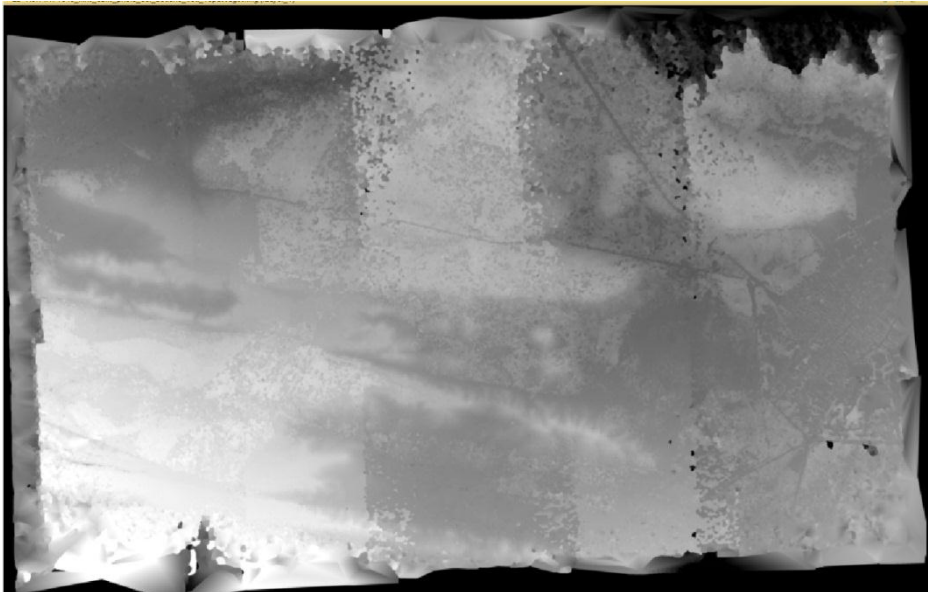
L'amélioration de la RMSE (0,4525) en supprimant les points de liaison contribuant à une mauvaise RMSE. Le MNS est généré en gardant les paramètres par défaut donc avec l'utilisation du modèle proposé par LPS (« use adaptive ATE ») avec comme précision du modèle généré : 1.

**Annexe 15- MNS obtenus suite aux différents essais sur les photos de 1949.**

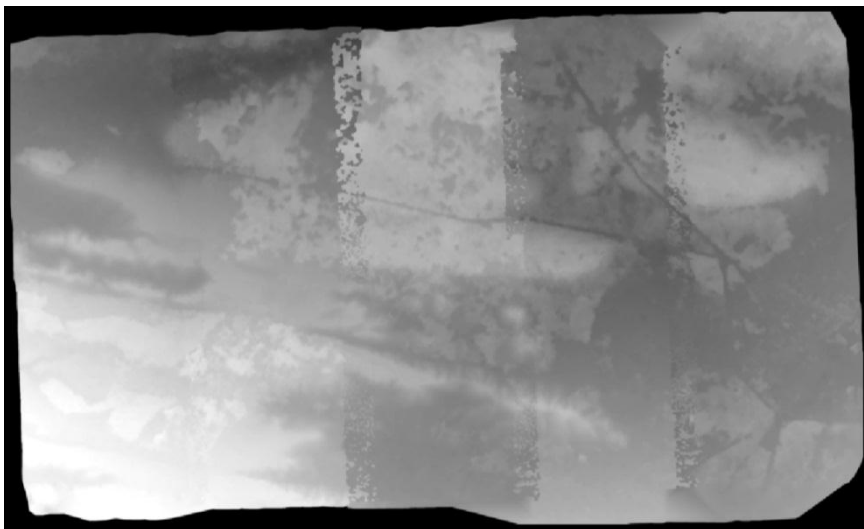
**Résultat du 1<sup>er</sup> essai**



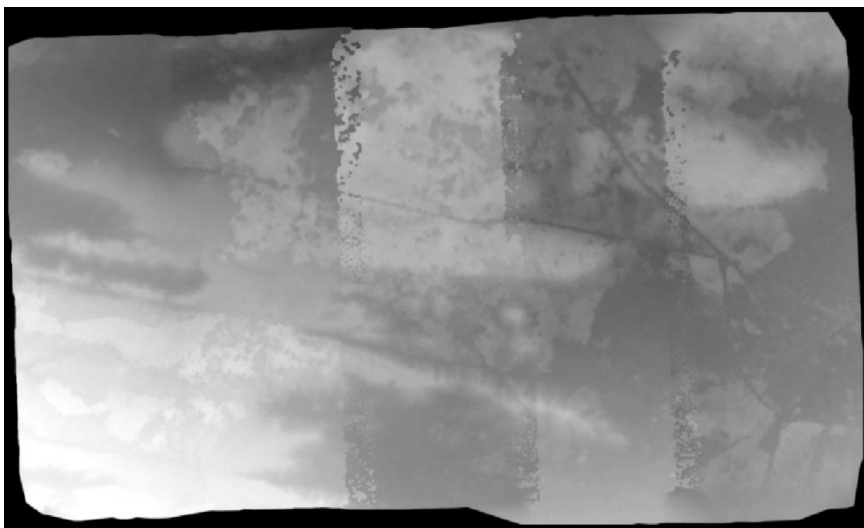
**Résultat du 2<sup>ème</sup> essai**



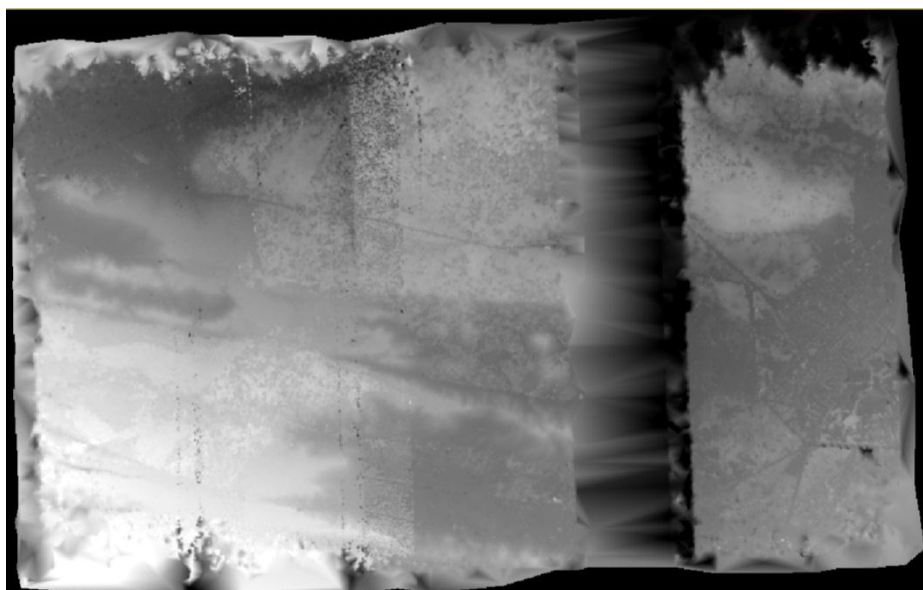
Résultat du 3<sup>ème</sup> essai



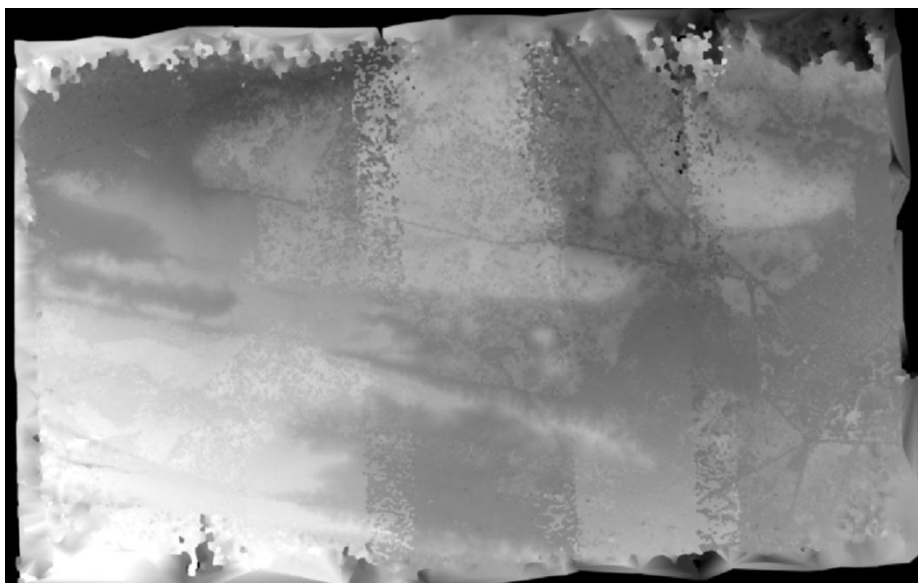
Résultat du 4<sup>ème</sup> essai



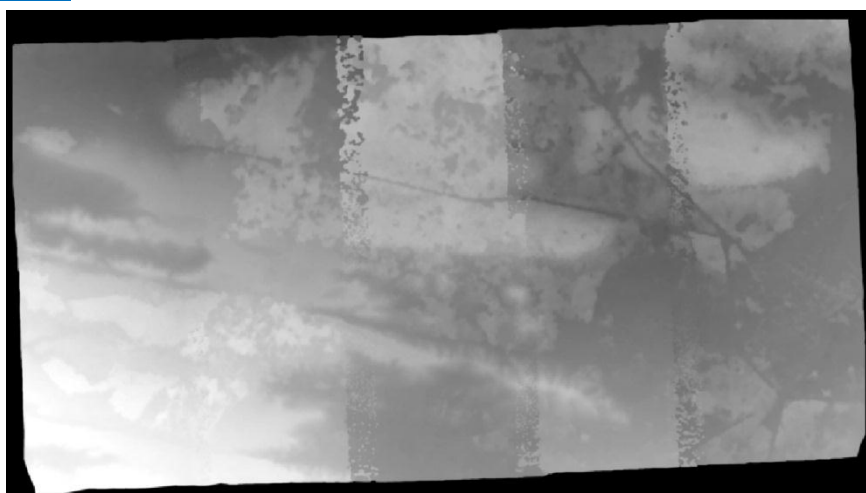
Résultat du 5<sup>ème</sup> essai



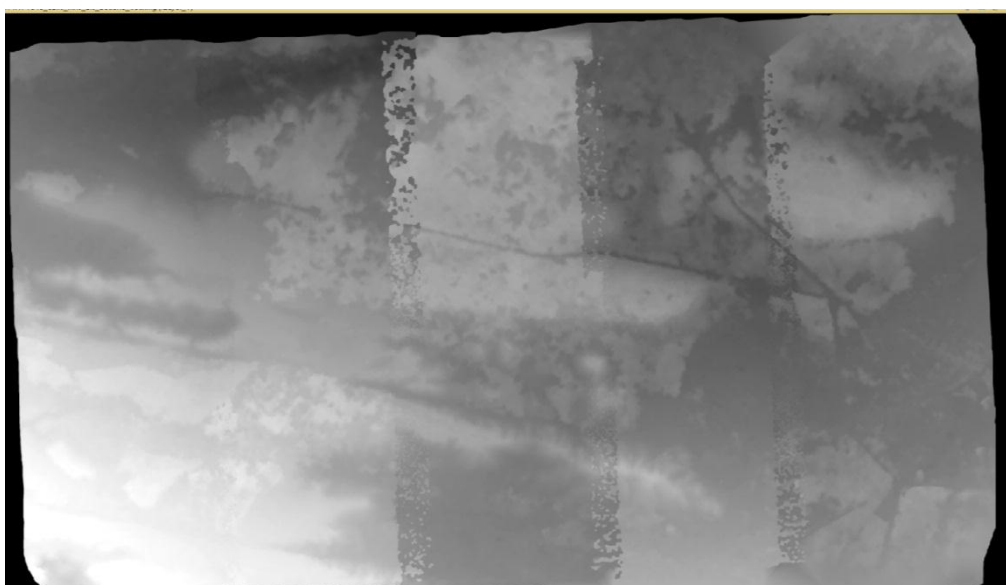
Résultat du 6<sup>ème</sup> essai



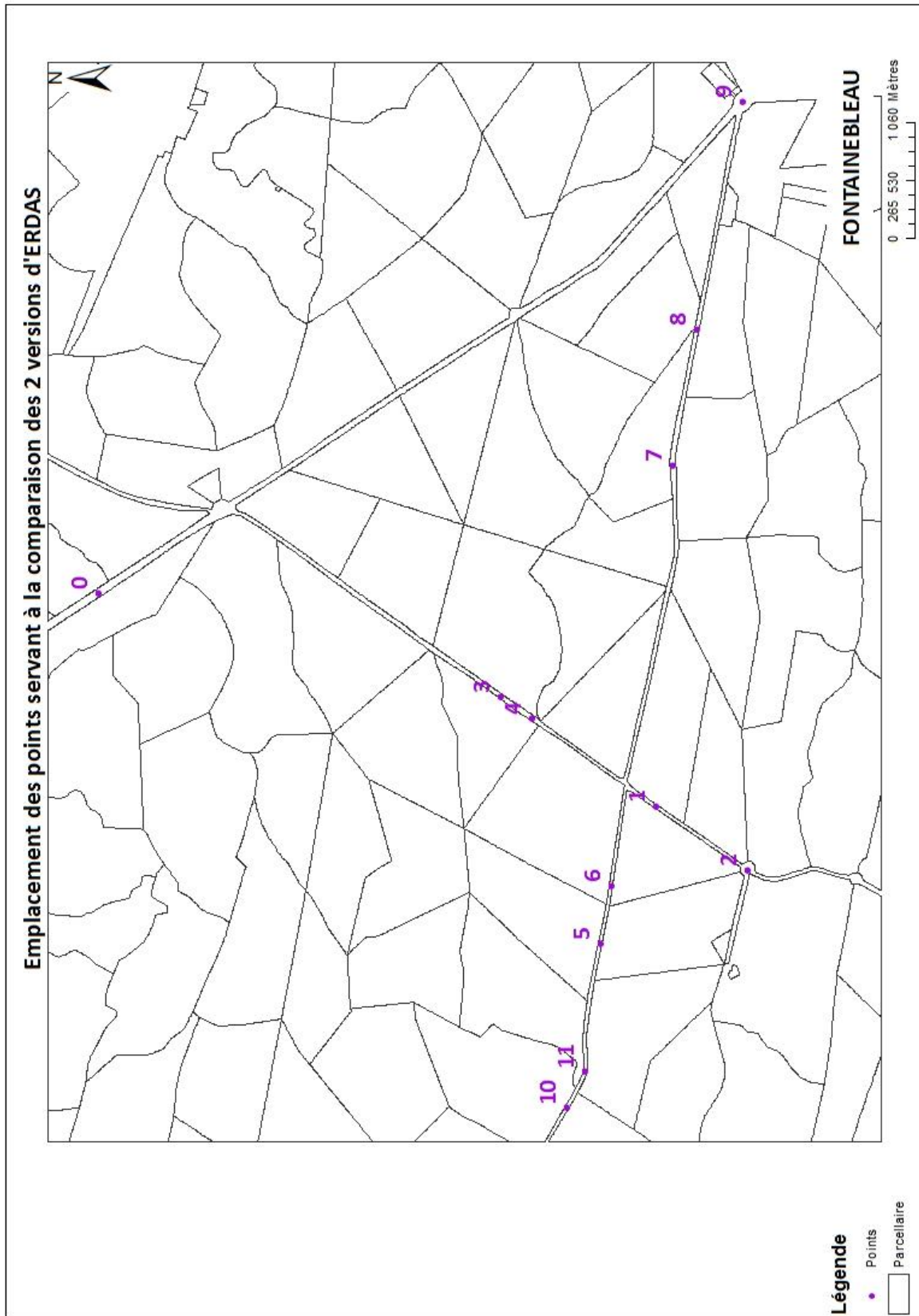
Résultat du 7<sup>ème</sup> essai



Résultat du 8<sup>ème</sup> essai



Annexe 16- Emplacement des points pour comparer les deux versions d'ERDAS.



## Annexe 17- Guide méthodologique de génération de Modèles Numériques de Surface sous ERDAS LPS 2011.

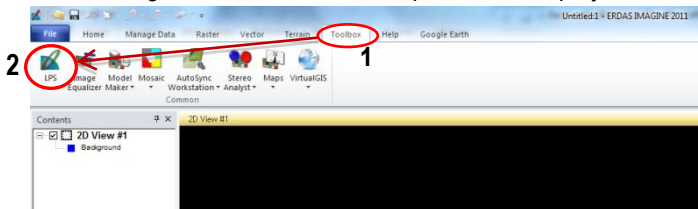
LPS est une suite appartenant à ERDAS Imagine comprenant différents outils de photogrammétrie, comme par exemples, la triangulation, la génération de MNT, la production d'orthophotos et l'extraction de caractéristiques 3D.

Dans ce guide, seront abordées les différentes étapes de construction d'un Modèle Numérique de Surface (MNS) à partir de photos aériennes. A savoir :

- Ouverture de la création d'un projet LPS ;
- Orientation interne ;
- Orientation externe ;
- MNS.

### • Création d'un projet LPS

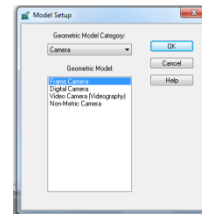
Ouvrir le logiciel ERDAS IMAGINE, puis créer un projet LPS :



Enregistrer le projet dans un dossier.

#### Choix du type de caméra :

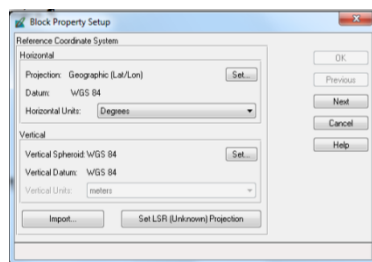
- « Frame Camera » pour les formats argentiques ;
- « Digital Camera » pour les formats numériques.



#### Propriétés du bloc de données

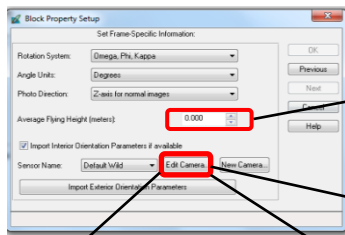
Choix du système de coordonnées de références pour le bloc soit :

- choisir un système en cliquant sur « Set » ;
- importer un projet LPS ayant le même système de coordonnées que le nouveau, en cliquant sur « Import ».

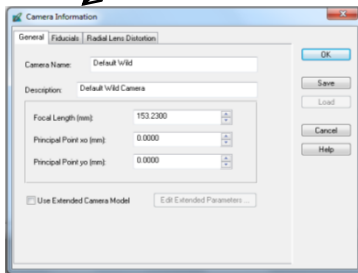


## Caractéristiques spécifiques à la caméra

Informations se situant dans le rapport de calibration de la caméra.

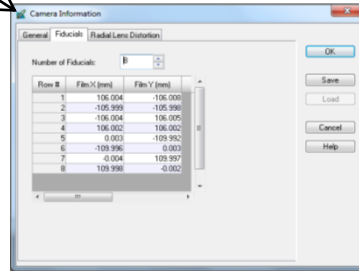


Hauteur de vol du vecteur.



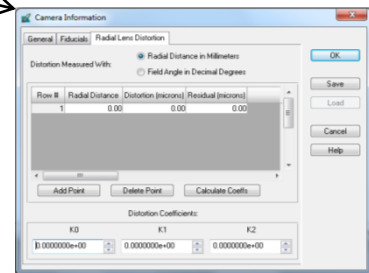
### Onglet : « General »

Dans certains rapports de calibration les coordonnées du point principal ne sont pas données, dans ce cas ne rien renseigner.



### Onglet : « Fiducials »

Marques fiduciales de la caméra (sauf pour les caméras numériques).



### Onglet : « Radial Lens Distortion »

Distorsion radiale de la lentille. Pas toujours renseignée dans le rapport → possibilité de ne rien mettre.

### Remarques :

- Si les coordonnées des marques fiduciales ne sont pas présentes dans le rapport de calibration, elles peuvent toutefois être calculées.
- Attention à la concordance des unités en vérifiant que celles utilisées sur le rapport de calibration sont identiques à celles demandées par le logiciel.

Une fois les paramètres de la caméra renseignés, cliquer sur « Ok »

## • Orientation interne

**DEFINITION** : l'orientation interne a pour but d'établir une relation entre système de coordonnées pixel et système de coordonnées image (Karabork et al.,)


Pour ce faire, deux cas se présentent :

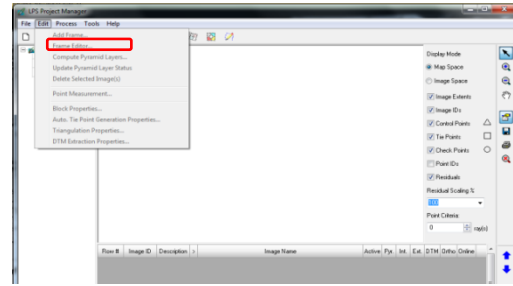
- Pour des photos numérisées, les mesures de marques fiduciales sont nécessaires ;
- Pour des photos provenant de caméras numériques cette relation est déterminée lors du processus de calibration de la caméra. Ainsi les mesures de marques fiduciales ne sont pas à effectuer.

L'orientation interne est donc déterminée à l'aide de la fiche de calibration de la caméra et des marques fiduciales (sauf pour les caméras numériques).



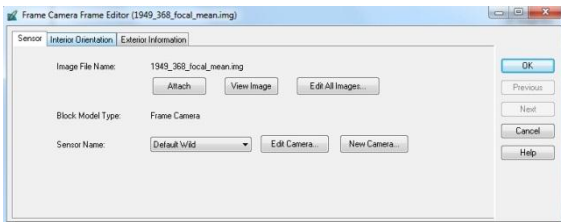
**ETAPES**

- Charger les photos aériennes pour cela cliquer sur 
- Paramètres de la caméra : Edit → frame editor



La fenêtre ci-dessous apparaît :

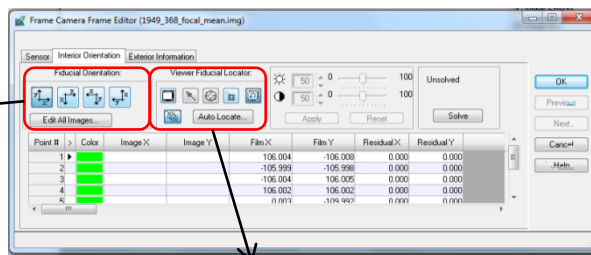
- **Onolet : « Sensor »**



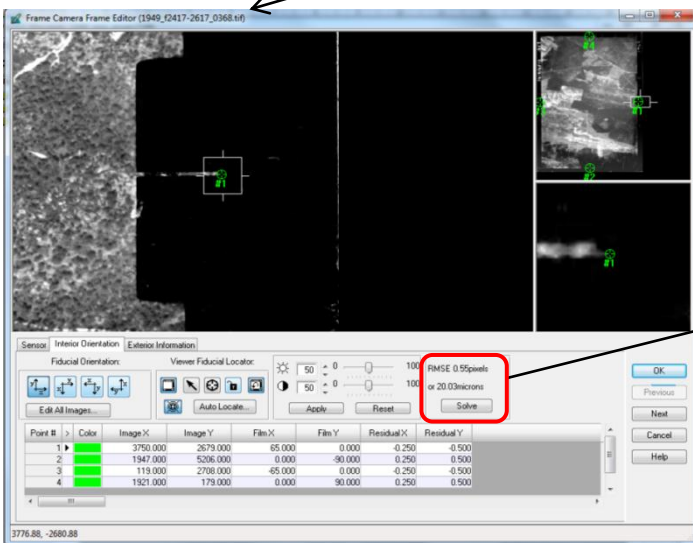
- ↳ Vérifier le bon emplacement des photos aériennes en allant dans « Attach ».
- ↳ Si lors de l'ouverture d'un nouveau projet LPS, les caractéristiques de la caméra n'ont pas été renseignées, cliquer sur « Edit Camera » (cf. 0).

- **Onolet : « Interior Orientation »** (Ne pas effectuer pour les caméras numériques).

1/ Choisir l'orientation des axes x et y des marques fiduciales



2/ Placer les marques fiduciales sur tous les clichés. Cliquer sur « Next » pour changer de photos.

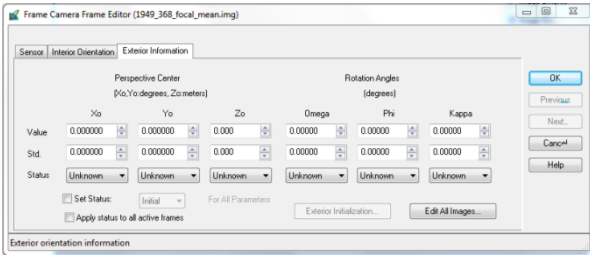


Pour chaque image, la RMSE, l'erreur moyenne quadratique de transformation entre pixel et le système de coordonnées image, est calculée.

Une fois les marques fiduciales placées sur les différentes images, cliquer sur « Ok ».

• **Onglet : « Exterior Information »**

Cet onglet sera rempli automatiquement lors de la triangulation.




Cliquer sur « Ok » une fois les onglets renseignés.

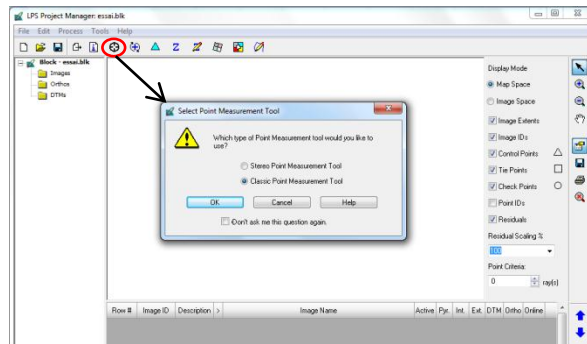
• **Orientation externe**

**DEFINITION** : L'orientation externe comprend (Gauthier et al., 2010) :

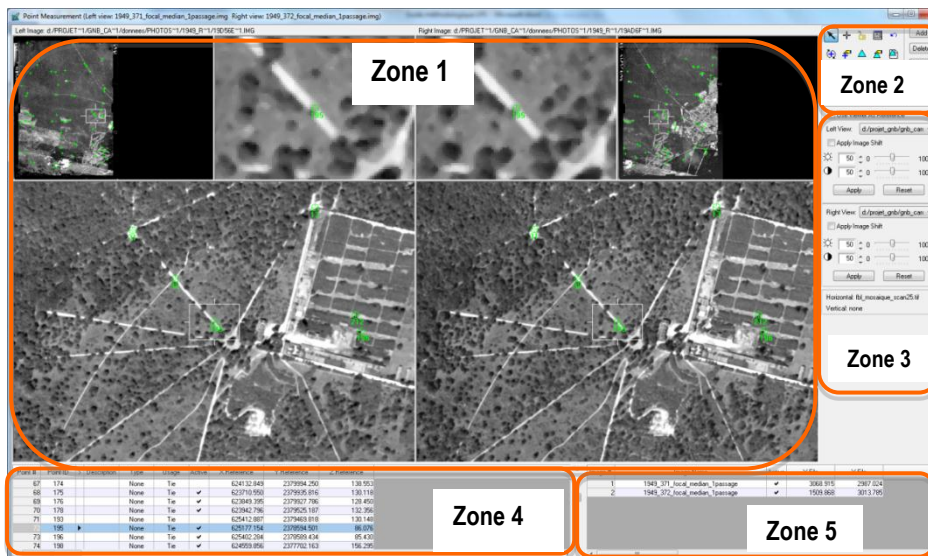
- L'orientation absolue : géoréférencement des images par l'intermédiaire de points de contrôle ;
- L'orientation relative : corrélation des images entre elles à l'aide de points de liaison.

Les orientations absolue et relative permettent ainsi d'effectuer le processus d'aérotriangulation.

Pour cela, cliquer sur , la fenêtre ci-après s'ouvre. Choisir « Classic Point Measurement tool » puis « Ok ».



**Présentation fenêtre**



Description des zones d'après TP de Sylvie DURRIEU, mastère SILAT, Montpellier :

- **Zone 1** : affichage des deux photos découpées en trois vignettes de résolution différentes.
- **Zone 2** : icônes des principales commandes du menu.
- **Zone 3** : modification des configurations d'affichage des deux photos (contraste, luminosité et image affichée) ;
- **Zone 4** : tableau récapitulatif des points utilisés pour l'orientation externe. L'utilisateur peut spécifier :
  - Le type de point (contrôle ou liaison) ;
  - Les coordonnées des points dans le système de référence choisi ;
  - Activer ou désactiver un ou plusieurs point(s) pour le prendre en considération ou non dans la triangulation.
- **Zone 5** : tableau récupérant les coordonnées de chaque point dans le référentiel image (ligne, colonne).

### Points de contrôle

**DEFINITION** : Les points de contrôle ont pour but de géoréférencer l'image et donc par la suite de pouvoir la superposer à une carte ou autres supports. Aussi ces points sont repérables sur le terrain et sur la photo ont des coordonnées en X, Y et Z connues.

### ÉTAPES

**1/ Télécharger l'image de référence : Scan25, orthophotographie ou MNT.**

**2/ Pour afficher l'image de référence.**

**3/ Pour ajouter un point, cliquer sur « Add ». Une ligne apparait dans la zone 4. Pour le type choisir « Full », « Vertical » ou « Horizontal » et dans « usage » choisir « Control ». Puis cliquer sur pour positionner le point sur la 1<sup>ère</sup> image puis re cliquer sur pour positionner le même point sur l'autre image. Compléter la colonne « Z Reference » par la valeur de l'altitude correspondante au point.**

Point #	Point ID	Description	Type	Usage	Active	X Reference	Y Reference	Z Reference
1	1	pt_373	Full	Control	<input checked="" type="checkbox"/>	627114.635	237812.634	70.000
2	2	pt_373_3a	Full	Control	<input checked="" type="checkbox"/>	627895.712	2377871.466	73.000
3	3	pt_373_3b	Full	Control	<input checked="" type="checkbox"/>	626760.099	2377831.403	75.000
4	4	pt_373_3	Full	Control	<input checked="" type="checkbox"/>	627578.686	2380771.500	142.000
5	5	pt_375_4	Full	Control	<input checked="" type="checkbox"/>	627885.002	2378425.945	83.000
6	6	pt_375_5	Full	Control	<input checked="" type="checkbox"/>	628198.820	2378762.374	83.000
7	7	pt_375_6	Full	Control	<input checked="" type="checkbox"/>	627713.095	2377586.004	78.000
8	8	pt_368_365	Full	Control	<input checked="" type="checkbox"/>	6211623.303	3728827.347	88.000

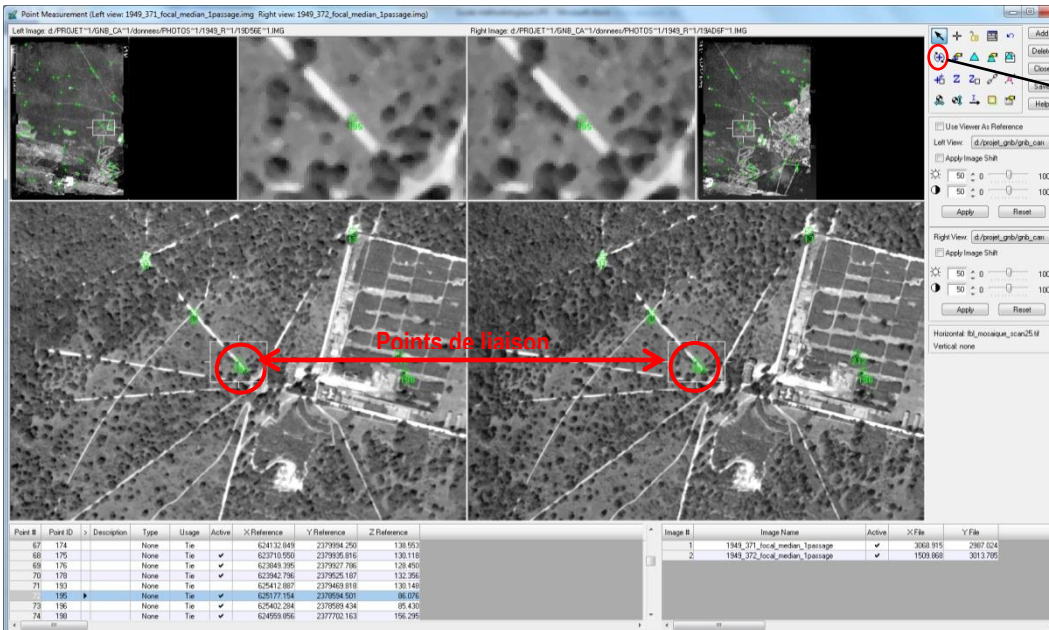
Colonnes remplies dès que le point est placé sur une image ou carte géoréférencée.

A renseigner

## Points de liaison



**DEFINITION** : Les points de liaison permettent de relier les images entre elles en localisant un objet (intersection de routes, bâtiments...) sur plusieurs images (MURAZ et al., 1999). Contrairement aux points de contrôle leurs coordonnées ne sont pas connues.

### ÉTAPES



Pour générer automatiquement les points de liaison, un minimum de points de contrôle est requis.

Une fois les points de liaison placés, de façon manuelle ou automatique, le processus d'aérotriangulation peut être lancé.

Pour placer de façon manuelle les points de liaison, cliquer sur « Add ». Une ligne apparaît dans la zone 4. Pour le type choisir « None » et dans « usage » choisir « tie ». Puis cliquer sur  pour positionner le point sur la 1<sup>ère</sup> image puis recliquer sur  pour positionner le même point sur l'autre image. La colonne « Z Reference » sera remplie automatiquement lorsque la triangulation sera acceptée.

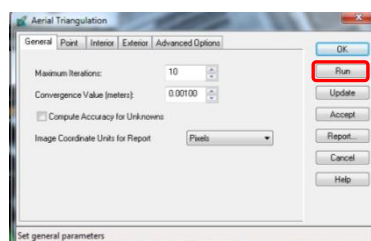
**Remarque** : les points de liaison et de contrôle doivent être répartis sur toutes les photos pour obtenir un bon résultat.

## L'aérotriangulation

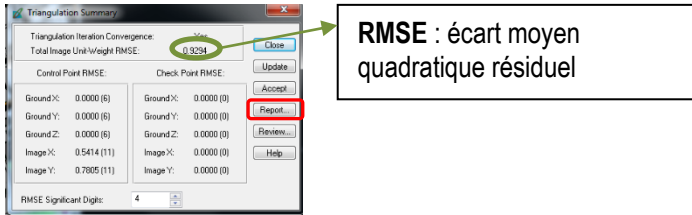
**DEFINITION** : Le processus d'aérotriangulation permet de calculer l'orientation du capteur pour les différentes images en X, Y et Z ainsi que la rotation avec le calcul des coefficients lambda, phi et kappa.

### ÉTAPES

Cliquer sur  la fenêtre ci-dessous s'ouvre :



L'aérotriangulation peut être lancée avec les paramètres par défaut du logiciel. Pour cela cliquer sur « Run ». Une nouvelle fenêtre s'ouvre :



Un rapport de l'aérotriangulation est obtenu en cliquant sur « Report ». Cela permet de voir quels sont les points qui engendrent le plus d'erreurs dans la triangulation et ainsi de les supprimer.

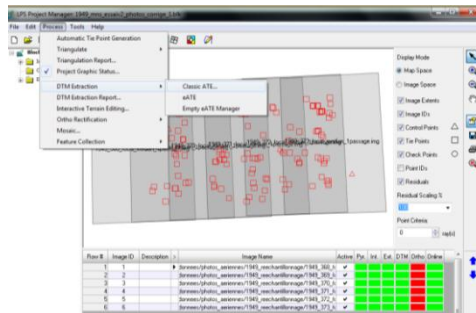
8	-0.2944	0.2003	-1.5226
17	-0.4391	-0.6692	2.8200
21	0.7390	-0.4774	2.0296
31	-0.0285	-0.5764	-1.9663
32	0.1018	0.8046	0.4374
	aX	aY	aZ
	0.0131	-0.1197	0.3033
	mX	mY	mZ
	0.3734	0.5316	1.7564
	CE90	LE90	
	1.0688	3.0714	
The image residuals of intersected GCP			
Point	Image	Vx	Vy
2	6	-0.019	-0.357
8	1	-0.016	-0.578
8	2	0.001	0.982
17	1	-0.003	-0.214
17	2	0.001	0.215

Une fois l'obtention du RMSE satisfaisante, cliquer sur « Update » puis « Accept » et « Ok ». Enfin sauvegarder les paramètres d'orientation externe en cliquant sur « Save » dans la zone 2 puis fermer la fenêtre.

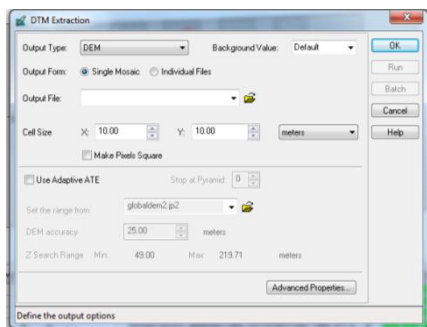
## • Modèle Numérique de Surface (MNS)

Avant de générer le MNS, il faut valider les paramètres de l'orientation externe. Pour cela : Edit → Frame Editor → Exterior Information → Ok.

Pour générer le MNS aller dans : Process → DTM Extraction → Classic ATE...




La fenêtre ci-dessous s'ouvre :



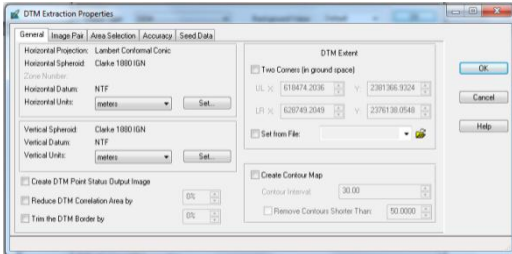
A renseigner :

- Type en sortie : DEM
- Forme en sortie :
  - « Single Mosaic » : un seul MNS est généré ;
  - « Individual files » : création d'un MNS pour chaque paire d'images actives.
- « Cell Size » : résolution du MNS en sortie.
- « Use Adaptive ATE » : algorithme du module LPS pour extraire l'information d'élévation d'une image.

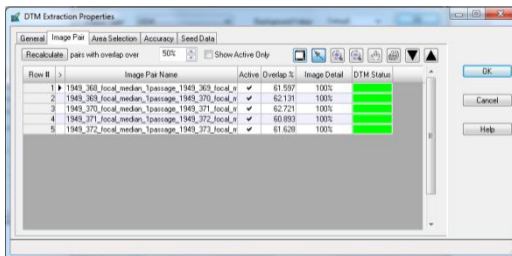
D'autres options sont possibles en cliquant sur « Advanced Proprieties ». Toutefois les paramètres, de ces options, peuvent être laissés par défaut. Si c'est le cas retenu cliquer sur « Run » pour lancer la génération du MNS.

Une fois le MNS obtenu, enregistrer le projet LPS en cliquant sur . Revenir dans ERDAS Imagine pour visualiser le MNS produit en ouvrant une couche raster.

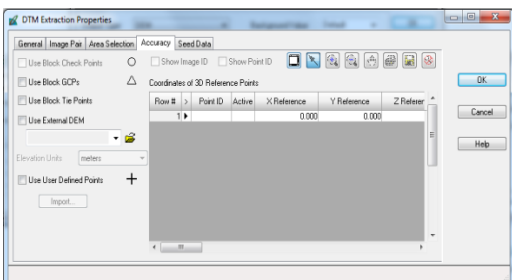
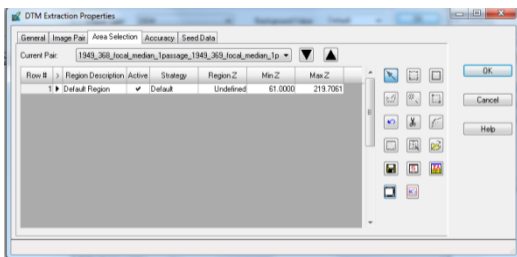
**Autres options possibles** : « Advanced Proprieties ».



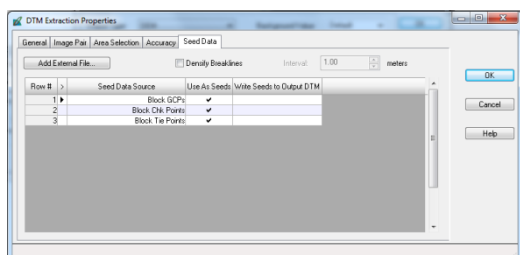
- Informations sur la projection et l'unité utilisée pour le MNS.
- Possibilité de réduire la surface de corrélation.



- Permet de sélectionner les paires d'images utilisées lors de la génération du MNS.



- Informations sur la précision du MNS en sortie. La référence 3D prise pour la précision peut être soit celle :
  - Points de contrôle ;
  - Points de liaison ;
  - Un autre MNS ;
  - Coordonnées 3D que vous définissez.



Une fois les paramètres intégrés, cliquer sur « Ok » pour fermer les fenêtres puis sur « Run » pour générer le MNS. L'orthorectification (KRAUS et WALDHÄUS, 1997) des images numériques à l'aide du MNS produit est possible : les images sont corrigées des déformations géométriques et ramenées à un référentiel géographique ce qui permet de les superposer à des cartes. Toutefois, le MNS produit sous LPS est enregistré en 32 bits et donc pour pouvoir l'utiliser lors de l'orthorectification il est nécessaire de le transformer en 8 bits.

Une fois les MNS générés sous ERDAS LPS au format 32 bits, il est nécessaire de les transformer en 8 bits pour pouvoir les utiliser lors de l'orthorectification des photos aériennes (annexe 6 – figure A). En effet, ERDAS LPS ne prend pas les MNS au format 32 bits pour l'ortho rectification

---

## • Références bibliographiques

---

DURRIEU S., TP mastère SILAT

GAUTHIER J., GRENIER R., BELLEMARE-RACINE E. – 2010 – La planification des interventions en milieu naturel à l'aide des outils de la photo-interprétation.

KARABORK H., YILDIZ F., COSKUN E. – Object recognition for interior orientation in digital photogrammetry, p. 1-4.

KRAUS K. et WALDHÄUSL P. – 1997 - Manuel de photogrammétrie, Principes et procédés fondamentaux, Hermès editor, Paris, (p 407).

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

## **Annexe 18- Etapes pour cibler et enregistrer les valeurs des MNS sur chaque zone tampon étudiée**

- Réaliser une zone tampon de 0,2 ha (Géotraitement → zone tampon) autour de points (ex : points GNB) ;
- Extraire des valeurs pour chaque MNS à l'intérieur des zones tampons (Outils Spatial Analyst → Extraction → Extraction par masque) ;
- Convertir les zones extraites (raster) vers des points (Outils de conversion → À partir d'un raster → raster vers points), à faire pour les différentes années ;
- Ouvrir la table attributaire des points ainsi extraits pour faire une jointure avec celle de la zone tampon et ainsi avoir le numéro de la zone correspond pour chaque point (Table attributaire → jointure et relation → joindre → joindre les données d'une autre couche selon l'emplacement).

Enregistrer le fichier OpenOffice en format .csv en mettant comme séparateur un point-virgule.

La réalisation d'un script sous le logiciel R est nécessaire pour réaliser les histogrammes en fréquence (annexe 14).





---

```

result_hist[,"1961",i+1]=hist_1961$counts
result_hist[,"1961",i+1]=hist_1961$counts
result_hist[,"1961",i+1]=hist_1961$counts
result_hist[,"1961",i+1]=hist_1961$counts
result_hist[,"1961",i+1]=hist_1961$counts
result_hist[,"1961",i+1]=hist_1961$counts
result_hist[,"1961",i+1]=hist_1961$counts

}}

dev.off()

###Creation d'un tableau pour regrouper les résultats de ttes les annees
nplots<-19
results<-array(NA,dim=c(nplots,8,4))
dimnames(results)[[2]]<-1:8
dimnames(results)[[3]]<-1:4
dimnames(results)[[2]][1:8]<-c("mean","sd","min","max","quant.05","quant.10","quant.90","quant.95")
dimnames(results)[[3]][1:4]<-c("1961","1987","2000","2003")

###moyenne, ecart type, max, min quantile par point
for(i in 0:18)
{
tmp6=point_1961[point_1961$ID_buffer==i,]
if (tmp6$ID_buffer==i)
{
  results[i+1,"mean","1961"]=mean(tmp6$hauteur)
  results[i+1,"sd","1961"]=sd(tmp6$hauteur)
  results[i+1,"max","1961"]= max(tmp6$hauteur)
  results[i+1,"min","1961"]=min(tmp6$hauteur)
  results[i+1,c("quant.05","quant.10","quant.90","quant.95"),"1961"]=quantile(tmp6$hauteur,c(0.05,0.1,0.9,0.95))
}}

#####Telechargement fichier 1987
point_1987=read.csv('Fichiers_csv/Hist_def_gnb/1987_pts_buf25.csv', header=T,sep=";", as.is=T, stringsAsFactors=F,
dec=".", na.strings="")

###Selection colonnes
point_1987=point_1987[,2:4]

##modification noms colonnes
colnames(point_1987)=c("ID_point","hauteur","ID_buffer")

## Histogramme
pdf('D:/Projet_GNB/GNB_carole/R/Histo_pts_gnb_def/1987/point_2.pdf')
for(i in 0:18)
{ #i=2
tmp1=point_1987[point_1987$ID_buffer==i,]
if (tmp1$ID_buffer==i)
{
  hist_1987=hist(tmp1$hauteur,freq=TRUE,breaks=x, xlim=c(90,190),xlab="hauteurs relatives en m",xaxp = c(0, 190,
100), main="Répartition des hauteurs de 1987 autour d'un point donné")
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
}
}

```

---

---

```
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts#
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
result_hist[,"1987",i+1]=hist_1987$counts
```

```
  }}
dev.off()
```

```
###moyenne, ecart type, max, min quantile par point GNB
```

```
for(i in 0:18)
```

```
{
```

```
tmp7=point_1987[point_1987$ID_buffer==i,]
```

```
if (tmp7$ID_buffer==i)
```

```
{
```

```
  results[i+1,"mean","1987"]=mean(tmp7$hauteur)
```

```
  results[i+1,"sd","1987"]=sd(tmp7$hauteur)
```

```
  results[i+1,"max","1987"]= max(tmp7$hauteur)
```

```
  results[i+1,"min","1987"]=min(tmp7$hauteur)
```

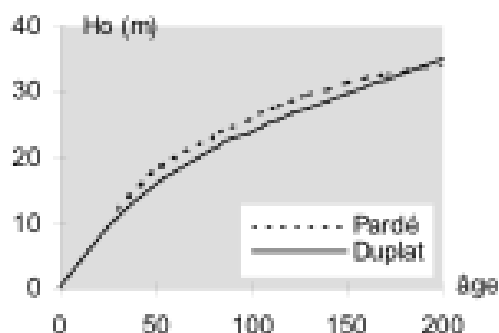
```
  results[i+1,c("quant.05","quant.10","quant.90","quant.95"),"1987"]=quantile(tmp7$hauteur,c(0.05,0.1,0.9,0.95))
```

```
}}
```

## Annexe 20- Courbe de croissance en hauteur

Deux sources d'information sont utilisées mais les données sont sujettes à discussion car suivant que les chênes soient en croissance libre, en futaie classique ou en arbre de haie leurs croissances varient dans des proportions importantes, d'autant que la hauteur n'est qu'un des éléments de la croissance. De plus la fertilité de la station, caractérisée souvent par la réserve utile en eau, est aussi un élément important à intégrer.

Aussi, dans le cadre de notre étude des chiffres moyens ont donc été retenus pour l'élaboration des règles de décision de couvert forestier sur la forêt de Fontainebleau. En effet dans cette mission c'est la méthode qui est privilégiée car ensuite, suivant les forêts étudiées, il sera nécessaire de prendre en considération la véritable courbe de croissance de l'espèce principale du peuplement considéré.



Evolution de la hauteur dominante du chêne sessile :  
 - Nord-Est (Duplat, 1996)  
 - Secteur ligorien (Pardé, 1962)

Figure E - Evolution de la hauteur dominante du chêne sessile.

Estimation de  $H_1$ , normes hauteurs : (couples âge en années, hauteur en m)

- Chêne Sessile : de (45, 20) à (48, 14) (suivant fertilité) ;
- Pin d'Alep : de (50, 8) à (50, 16) ;
- Pin Maritime : de (20, 16) à (20, 13) ;

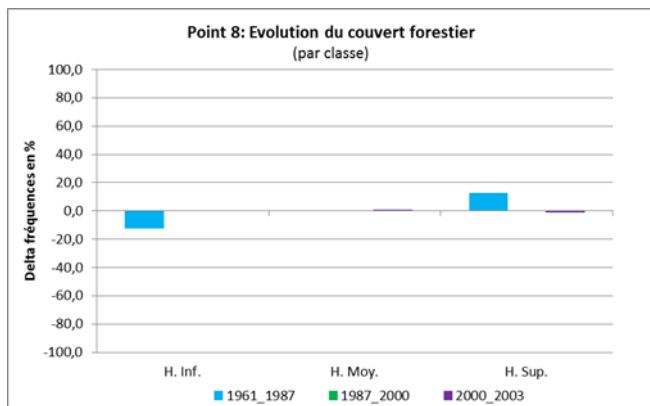
## Annexe 21- Situations spécifiques pour l'élaboration des règles de décision

Par mesure de simplification de l'écriture il est convenu que « H. Inf. » représente en réalité le  $\Delta$  fréquences de la classe « H. Inf. », il en est de même pour « H. Moy. » et « H. Sup. ». En ce qui concerne la valeur absolue du  $\Delta$  fréquences de la classe H. Inf. elle est notée | H. Inf. |, il en va de même pour | H. Moy. | et | H. Sup. |.

### Situation : absence d'évolution notable du couvert (point 8)

Sur la période 1961-1987 un **comblement de petites trouées** est observé. Sur les autres périodes 1987-2000 et 2000-2003 pas de changement.

- Période 1961-1987 : H. Inf. = -241, c'est à dire  $< 0$  ou encore représente 12 % de la somme des fréquences de la zone tampon 8. Durant cette période un **comblement de trouée** est constaté sur les orthophotographies et les MNS.
- Périodes 1987-2000 : | H. Inf. | = 0 ou encore représente 0 % de la somme des fréquences de la zone tampon 8, | H. Moy. | = 0 et | H. Sup. | = 0. Durant cette période une **absence d'évolution** est constatée sur les orthophotographies et les MNS.
- Période 2000-2003 : | H. Inf. | = 0, | H. Moy. | = 15 ou encore représente 0,7 % de la somme des fréquences de la zone tampon 8 et | H. Sup. | = 15 ou encore représente 0,7 % de la somme des fréquences de la zone tampon 8. Durant cette période une **absence d'évolution** est constatée sur les orthophotographies et les MNS.

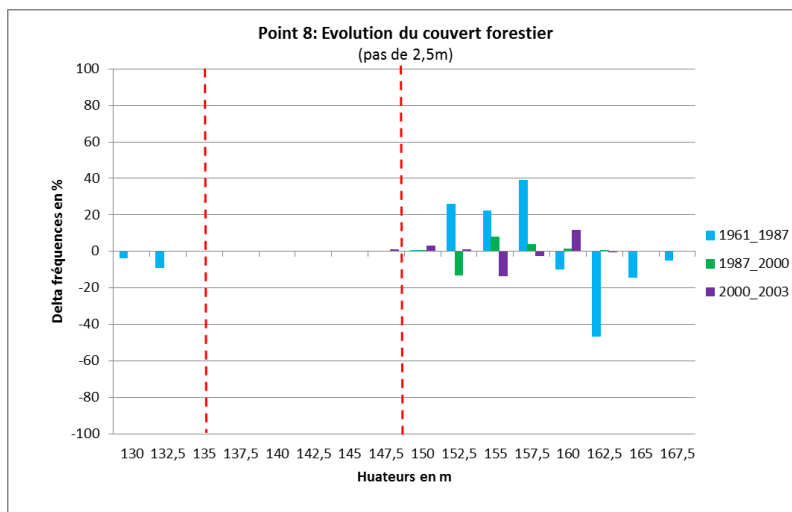


Graphique A – Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 8).

Hauteur en m	Classe	1961 - 1987	1987 - 2000	2000 -2003
130	H. Inf.	-241	0	0
132,5				
135				
137,5	H. Moy.	0	0	15
140				
142,5				
145				
147,5				
150	H. Sup.	241	0	-15
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				

Tableau D - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 0).

La lecture du Graphique B au pas de 2,5 m illustre bien le comblement de petites trouées, mais permet surtout de constater des évolutions importantes sur la période 1961-1987 avec les classes supérieures à 152,5 m ; évolutions qui n'étaient pas perceptibles avec le classement en trois méta-classes de hauteurs. Ainsi, il est possible de voir que les classes de hauteurs qui vont de 160 m à 165 m sont négatives et de façon encore plus prononcée pour la classe 162,5 m. Alors que les classes 152,5 m ; 155 m et 157,5 m sont positives et ont un poids légèrement



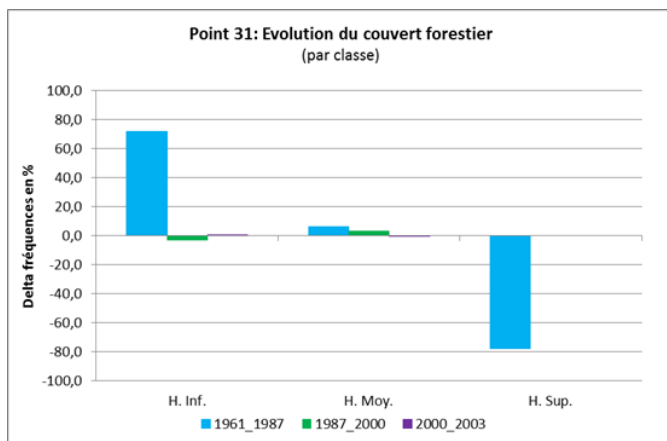
Graphique B - Evolution du couvert forestier au pas de 2,5 m (point 8).

supérieurs aux classes de rang supérieur, d'où l'affichage positif sur le graphique comportant 3 méta-classes. Par ailleurs, il est intéressant de noter les évolutions sur la période 1987-2000 avec la classe 152,5 m négative et les classes 155 m et 157,5 m positives. Enfin, pour la période 2000-2003 les changements sont de moindres importances.

### Situation : Apparition trouée et absence d'évolution (point 31)

**Apparition d'une trouée** sur la période 1961-1987. Par la suite aucune évolution apparente sur les périodes 1987-2000 et 2000-2003, la trouée est donc **en voie de stabilisation**.

- Période 1961-1987 : H. Inf. = 1403, c'est-à-dire  $> 0$  ou encore représente 71 % de la somme des fréquences de la zone tampon 31. Durant cette période une **ouverture trouée** est constatée sur les orthophotographies et les MNS et de plus elle est **étendue**.
- Période 1987-2000 : | H. Inf. | = 61, ou encore représente 3 % de la somme des fréquences de la zone tampon 31, | H. Moy. | = 61, ou encore représente 3 % de la somme des fréquences de la zone tampon 31 et | H. Sup. | = 0. Durant cette période une **absence d'évolution** est constatée sur les orthophotographies et les MNS.
- Période 2000-2003 : | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. |  $\approx 0 \pm 10\%$  de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution**.

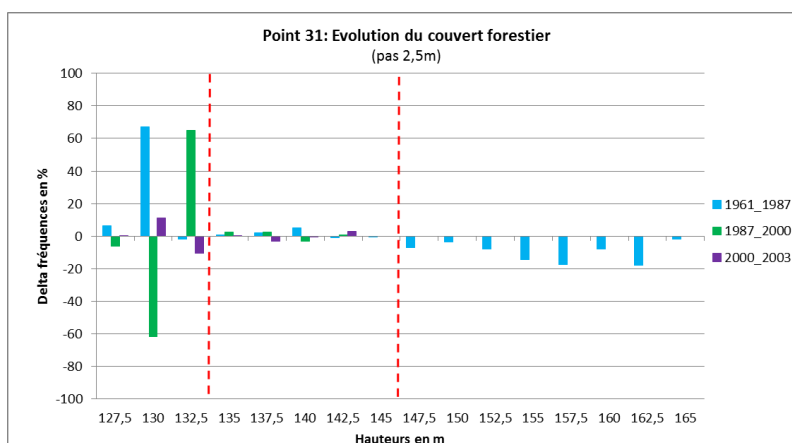


Graphique C - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 31).

Hauteur en m	Classe	1961 - 1987	1987-2000	2000 -2003
127,5	H. Inf.	1403	-61	12
130				
132,5				
135	H. Moy.	123	61	-12
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-1526	0	0
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				

Tableau E - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 31)

La prise en compte de l'évolution du couvert avec un pas de 2,5 m (Graphique D) permet d'affiner les grandes évolutions. C'est ainsi que sur la période 1987-2000 un gain de la classe 132,5 m au détriment de la classe 130 m est constaté.



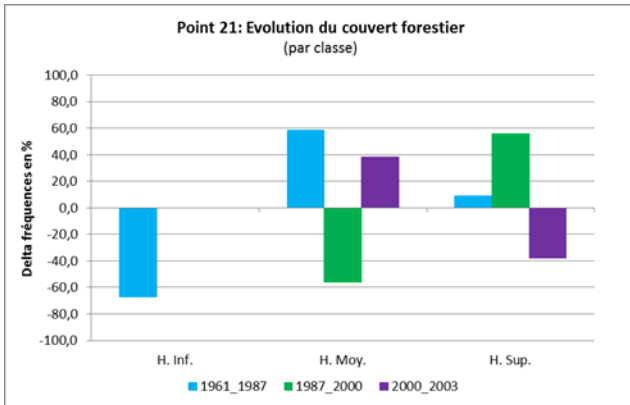
Graphique D - Evolution du couvert au pas de 2.5m (point 31).

### Situation : comblement de trouée existante, puis éclaircies (point 21)

Un **comblement d'une trouée** sur la période 1961-1987 est remarqué. Sur la période 1987-2000 on observe la croissance des arbres. Enfin sur la dernière période 2000-2003 une configuration de **trouée superficielle** apparaît.

- Période 1961-1987 : H. Inf. = -1319, c'est-à-dire  $< 0$  ou encore représente 67 % de la somme des fréquences de la zone tampon 21. Durant cette période un **comblement de trouée** est constaté sur les orthophotographies et les MNS.
- Période 1987-2000 : H. Inf. = 0, H. Moy. = -1093, c'est-à-dire  $< 0$  ou encore représente 55 % de la somme des fréquences de la zone tampon 21 → durant cette période un **comblement de trouée superficielle** est constaté sur les orthophotographies et les MNS.
- Période 2000-2003 : H. Inf. = 0, H. Moy. = 743, c'est-à-dire  $> 0$  ou encore représente 38 % de la somme des fréquences de la zone tampon 21 et H. Sup. = -743, c'est à dire  $< 0$  ou encore représente 38 % de la

somme des fréquences de la zone tampon 21 avec H. Moy. = | H. Sup. |. Durant cette période **une trouée superficielle** est constatée sur les orthophotographies et les MNS.

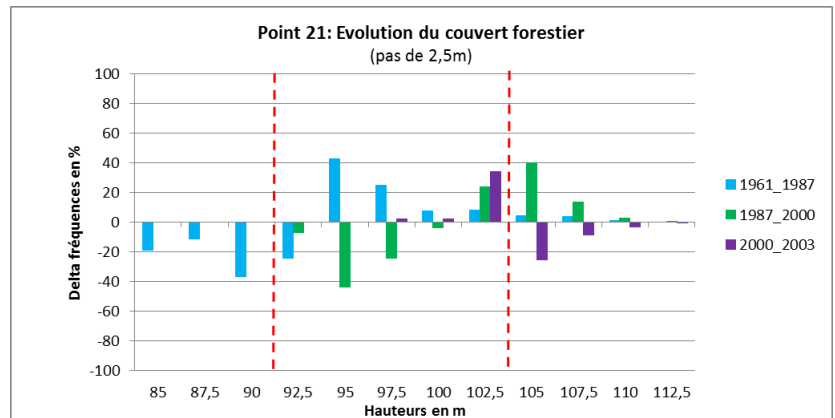


Graphique E - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 21).

Hauteur en m	Classe	1961 - 1987	1987 - 2000	2000 - 2003
85	H. Inf.	-1319	0	0
87,5				
90				
92,5	H. Moy.	1148	-1093	743
95				
97,5				
100				
102,5	H. Sup.	171	1093	-743
105				
107,5				
110				
112,5				

Tableau F - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 21)

La prise en compte de l'évolution du couvert avec un pas de 2,5 m (Graphique F) permet d'affiner les grandes évolutions. Ainsi, sur la période 2000-2003 c'est la classe 102,5 m regroupée au sein des « H. Moy. » qui est significative, alors qu'au sein de « H. Sup. » ce sont les classes 105 m et 107,5 m négatives qui le sont.



Graphique F - Evolution du couvert forestier au pas de 2,5 m (point 21).

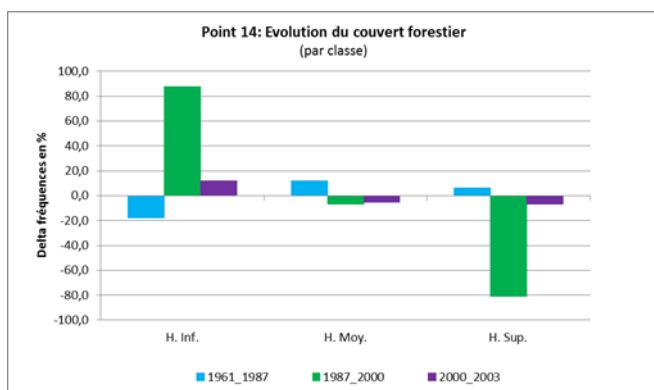
**Situation : comblement et ouverture de trouée (point 14)**

Sur la période 1961-1987, un **comblement** modéré d'une trouée est à signaler. Sur la période 1987-2000 une **ouverture de trouée** est constatée. Ensuite, la seule évolution sur la période 2000-2003 consiste à la poursuite d'une érosion du couvert forestier.

- Période 1961-1987 : = -350, c'est-à-dire < 0 ou encore représente 18 % de la somme des fréquences de la zone tampon 14. Durant cette période **un comblement de trouée** est constaté sur les orthophotographies et les MNS.
- Période 1987-2000 : H. Inf.= 1713, c'est-à-dire > 0 ou encore représente 87 % de la somme des fréquences de la zone tampon 14, | H. Sup. | = 1582 soit 12 fois plus que | H. Moy. | = 131. Durant cette période une **ouverture de trouée étendue et profonde** est constatée sur les orthophotographies et les MNS.



- Période 2000-2003 : H. Inf. = 236, c'est à dire > 0 ou encore représente 12 % de la somme des fréquences de la zone tampon 14. Durant cette période une **ouverture de trouée** est constatée sur les orthophotographies et les MNS.

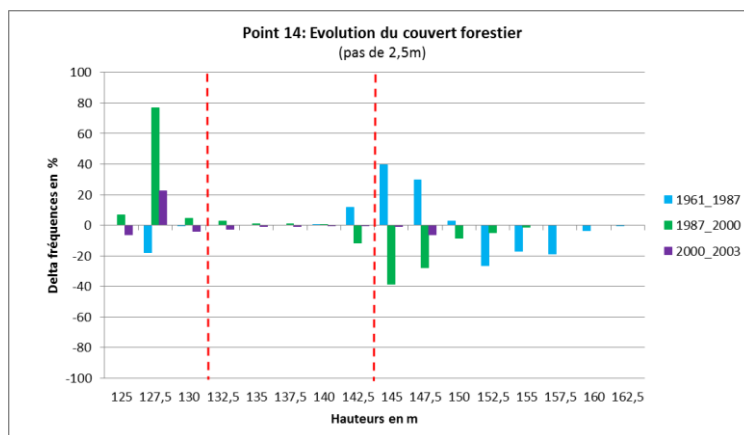


Graphique G - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 14).

Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
125	H. Inf.	-350	1713	236
127,5				
130				
132,5	H. Moy.	232	-131	-101
135				
137,5				
140				
142,5				
145	H. Sup.	118	-1582	-135
147,5				
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				

Tableau G - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 14)

Le Graphique H au pas de 2,5 m illustre avec précision, sur la période 1961-1987, l'activité positive forte de la classe 145 m et dans une moindre mesure celle de la classe 147,2 m. Il est à remarquer que les classes 150 m ; 152,5 m et 155 m sont négatives. Pour les deux périodes suivantes l'affichage au pas de 2,5 m n'apporte pas un éclairage supplémentaire.



Graphique H- Evolution du couvert au pas de 2,5 m (point 14).

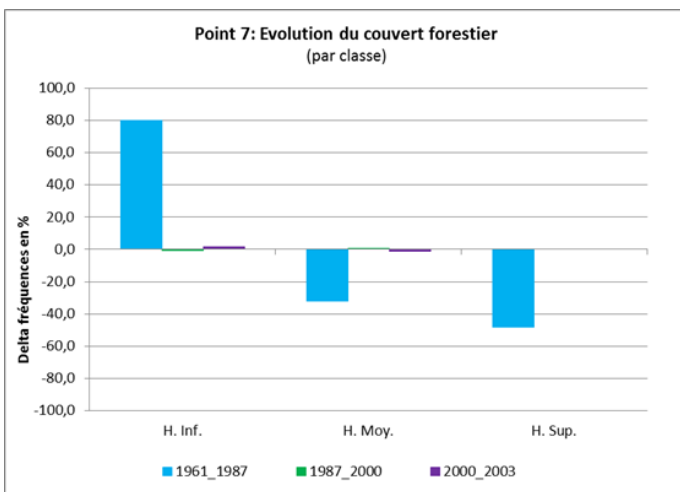
### Situation : ouverture de trouée et absence d'évolution (point 7)

Durant la période 1961-1987, c'est la disparition de la classe « H. Sup. » et dans une moindre mesure de la classe « H. Moy. » qui sont à remarquer alors qu'une ouverture de trouée profonde est visible. De plus la classe « H. Inf. » croît en valeur absolue de 79 % or il est remarqué sur les orthophotographies une trouée étendue. Durant les périodes 1987-2000 et 2000-2003 aucune évolution notable ne figure sur les orthophotographies.

- Période 1961-1987 : H. Inf. = 1563, c'est-à-dire > 0 ou encore représente 79 % de la somme des fréquences de la zone tampon 7 et H. Sup.= -622 < 0 ou encore représente 31 % de la somme des

fréquences de la zone tampon 7 avec | H. Sup. | = 941 soit 51,2 % de plus que | H.Moy. | . Durant cette période une **ouverture de trouée étendue et profonde** est constatée sur les orthophotographies et les MNS.

- Période 1987-2000 : | H. Inf. | = 17, ou encore représente 0,9 % de la somme des fréquences de la zone tampon 7, | H. Moy. | = 17 ou encore représente 0,9 % de la somme des fréquences de la zone tampon 7 et | H. Sup. | = 0. Durant cette période une **absence d'évolution** est constatée sur les orthophotographies et les MNS.
- Période 2000-2003 : | H. Inf. | = 28, ou encore représente 1,4 % de la somme des fréquences de la zone tampon 7, | H. Moy. | = 28 ou encore représente 1,4 % de la somme des fréquences de la zone tampon 7 et | H. Sup. | = 0. Durant cette période une **absence d'évolution** est constatée sur les orthophotographies et les MNS.

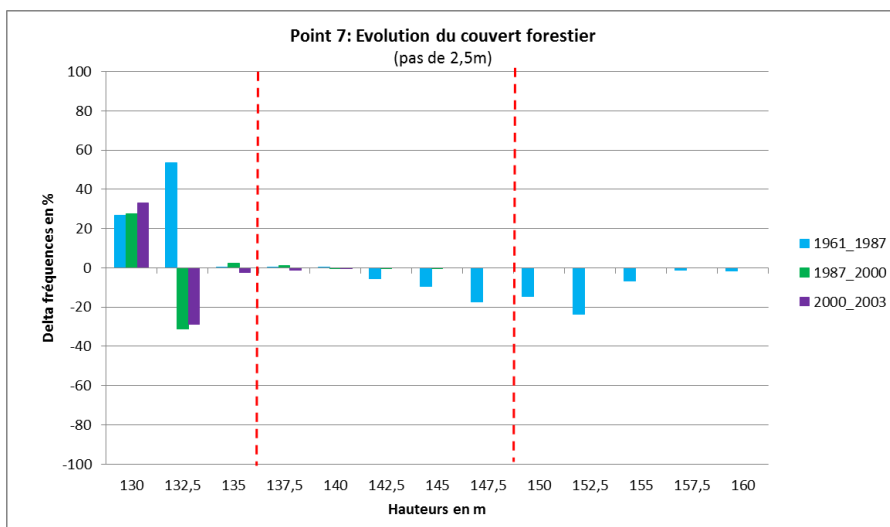


Graphique I - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 7).

Hauteur en m	Classe	1961-1987	1987-2000	2000-2003
130	H. Inf.	1563	-17	28
132,5				
135				
137,5	H. Moy.	-622	17	-28
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-941	0	0
150				
152,5				
155				
157,5				
160				

Tableau H - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 7)

La lecture du Graphique J au pas de 2,5 m est instructive plus particulièrement pour la période 2000-2003. En effet, il est intéressant de constater que la trouée s'est accentuée sur cette dernière période avec un basculement de la classe 132,5 m à la classe 130 m. Par la suite la faible activité sur la période 1987-2000 est vérifiée.



Graphique J - Evolution du couvert au pas de 2,5m (point 7).

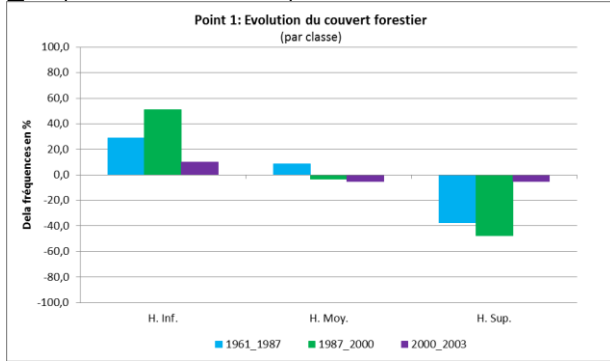
## Annexe 22- Analyse des différences d'histogrammes à partir de points positionnés manuellement.

Différence effectuée : année la plus récente – année la plus ancienne

Par mesure de simplification de l'écriture il est convenu que « H. Inf. » représente en réalité le  $\Delta$  fréquences de la classe « H. Inf. », il en est de même pour « H. Moy. » et « H. Sup. ». En ce qui concerne la valeur absolue du  $\Delta$  fréquences de la classe H. Inf. elle est notée | H. Inf. |, il en va de même pour | H. Moy. | et | H. Sup. |.

### Point 1

$\Sigma$  fréquences de la zone tampon : 1960



Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 1)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	571	999	198
130				
132,5				
135	H. Moy.	165	-63	-100
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-736	-936	-98
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				

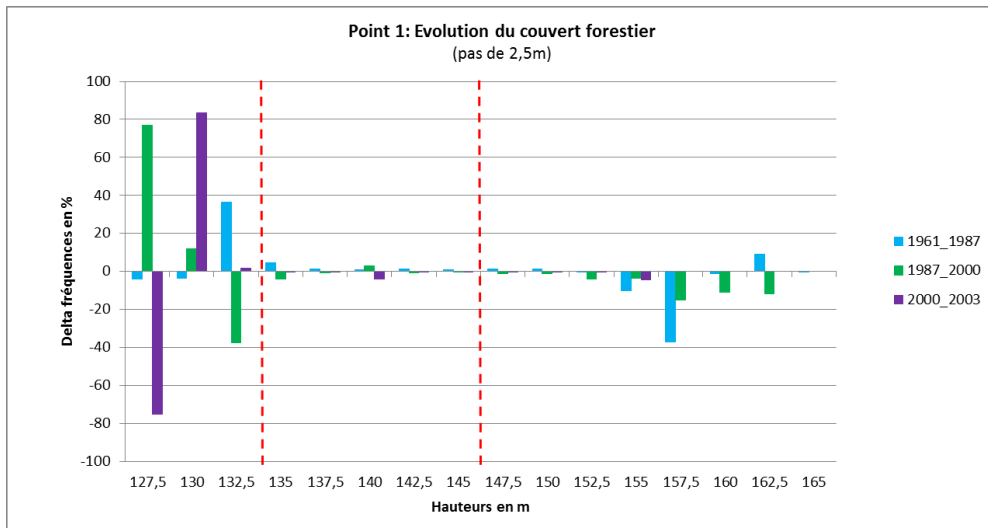
**1961-1987** : Apparition de la classe H. Inf. et diminution de la classe H. Sup.

- H. Inf. > 0 → **ouverture d'une trouée.**
- H. Inf. > 0 ; H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % de | H. Moy. | → **trouée profonde.**

**1987-2000** : accroissement de la classe H. Inf. et poursuite de la diminution de la classe H. Sup.

- | H. Inf. |  $\approx$  +/- 10% de la somme des fréquences de la zone tampon → **trouée permanente.**
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % de | H. Moy. | → **trouée profonde.**

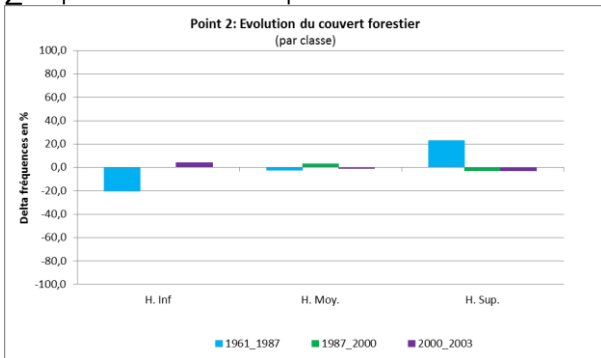
**2000-2003** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup.  $\approx$  0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



**2000-2003** : La **stabilité du couvert forestier** constatée à la lecture du graphique à 3 classes est à affiner en passant par la représentation des hauteurs au pas de 2,5m. En effet la classe 127,5 est remplacée par la classe 130 soit une amorce éventuelle de comblement en faisant une interprétation centrée uniquement sur ces bas niveaux.

Point 2

Σ fréquences de la zone tampon : 1957



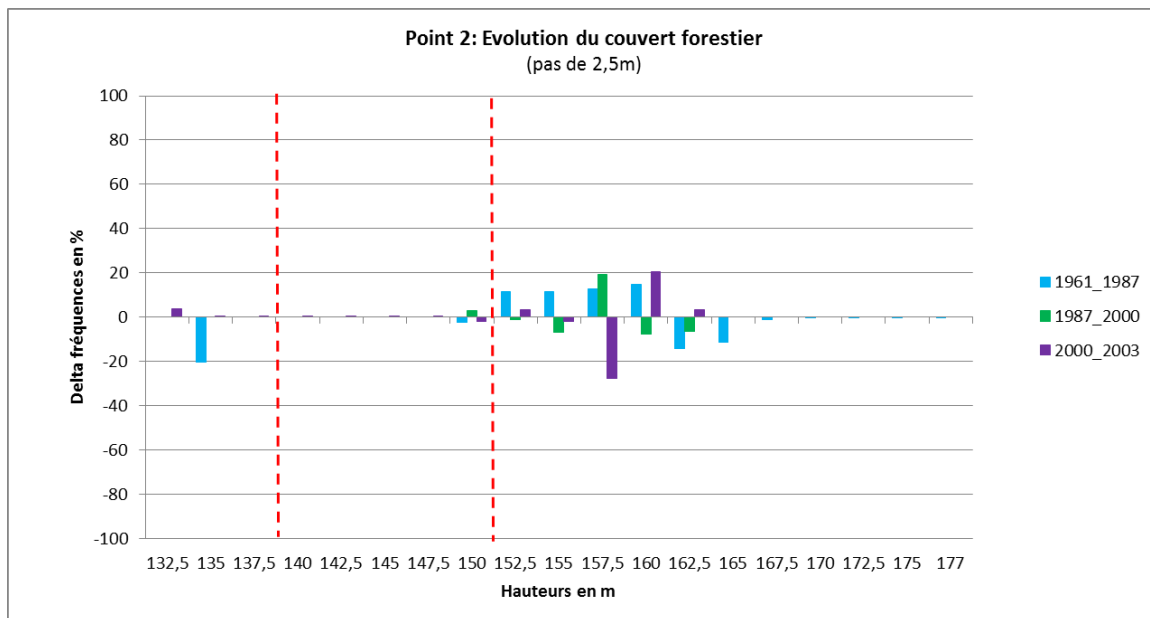
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 2)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
132,5	H. Inf.	-399	0	77
135				
137,5				
140	H. Moy.	-48	56	-15
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5				
155	H. Sup.	447	-56	-62
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170				
172,5				
175				
177				

**1961-1987** : Diminution de la classe H. Inf. et apparition de la classe H. Sup.

H. Inf. < 0 → **comblement d'une trouée.**

**1987-2000** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

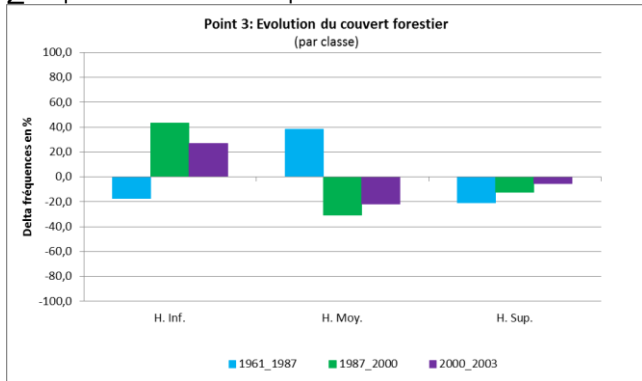
**2000-2003** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



**2000-2003** : Même constat que pour la période précédente. Toutefois la représentation des hauteurs au pas de 2,5 m permet de remarquer la disparition de la classe 157,5 m au bénéfice de la classe 160 m. Une hypothèse parmi d'autres : la croissance du peuplement.

Point 3

Σ fréquences de la zone tampon : 1947



**1961-1987** : Diminution des classes H. Sup. et H. Inf. et augmentation de la classe H. Moy.

H. Inf. < 0 → **comblement de trouées** de petites surfaces et amorce de comblement de trouées superficielles.

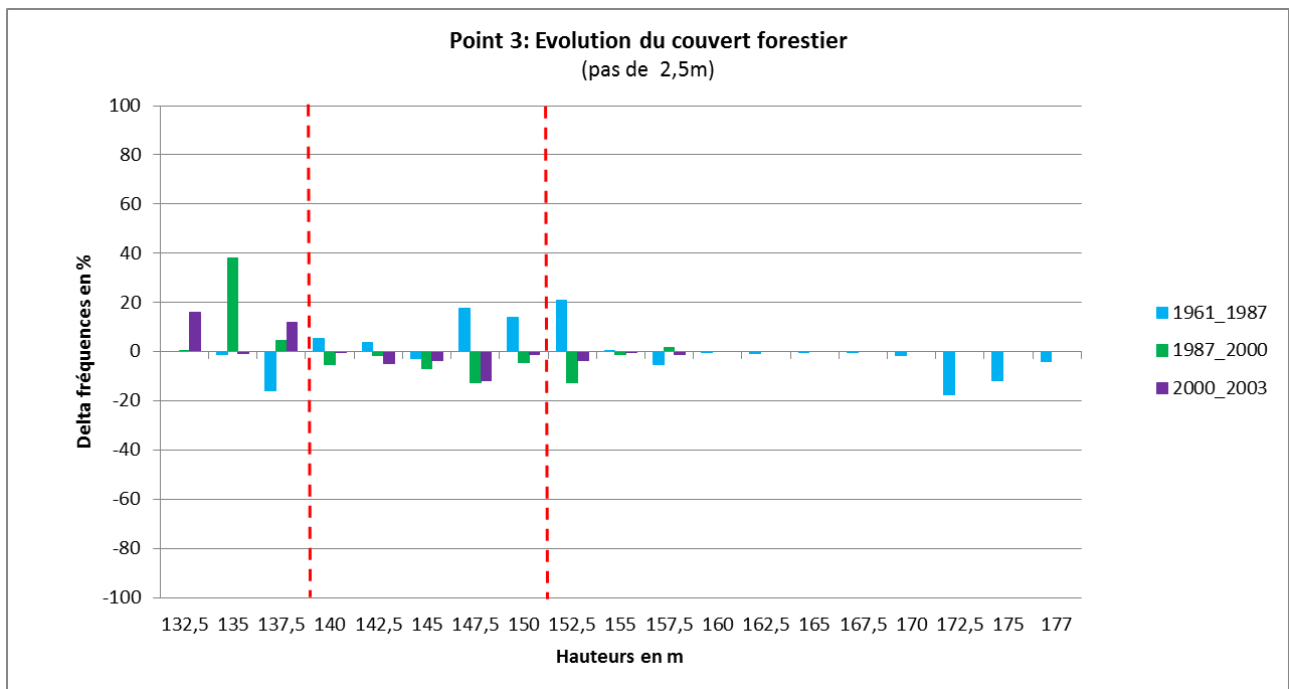
**1987-2000** : Diminution des classes H. Sup. et H. Moy. et augmentation de la classe H. Inf.

H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.

**2000-2003** : Diminution des H. Sup. et H. Moy et augmentation de la classe H. Inf. c'est-à-dire que la trouée s'accroît.

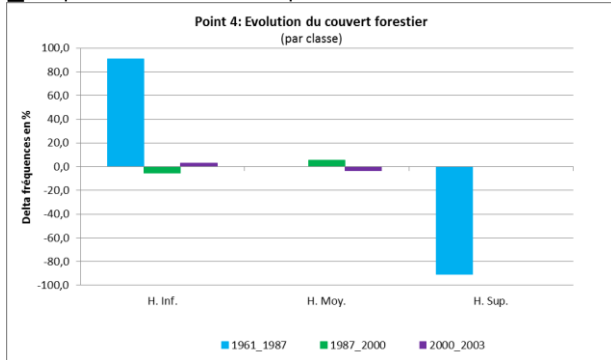
H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.

Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 3)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
132,5	H. Inf.	-339	842	527
135				
137,5				
140	H. Moy.	742	-599	-426
142,5				
145				
147,5				
150	H. Sup.	-403	-243	-101
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170				
172,5				
175				
177				



Point 4

Σ fréquences de la zone tampon : 1956



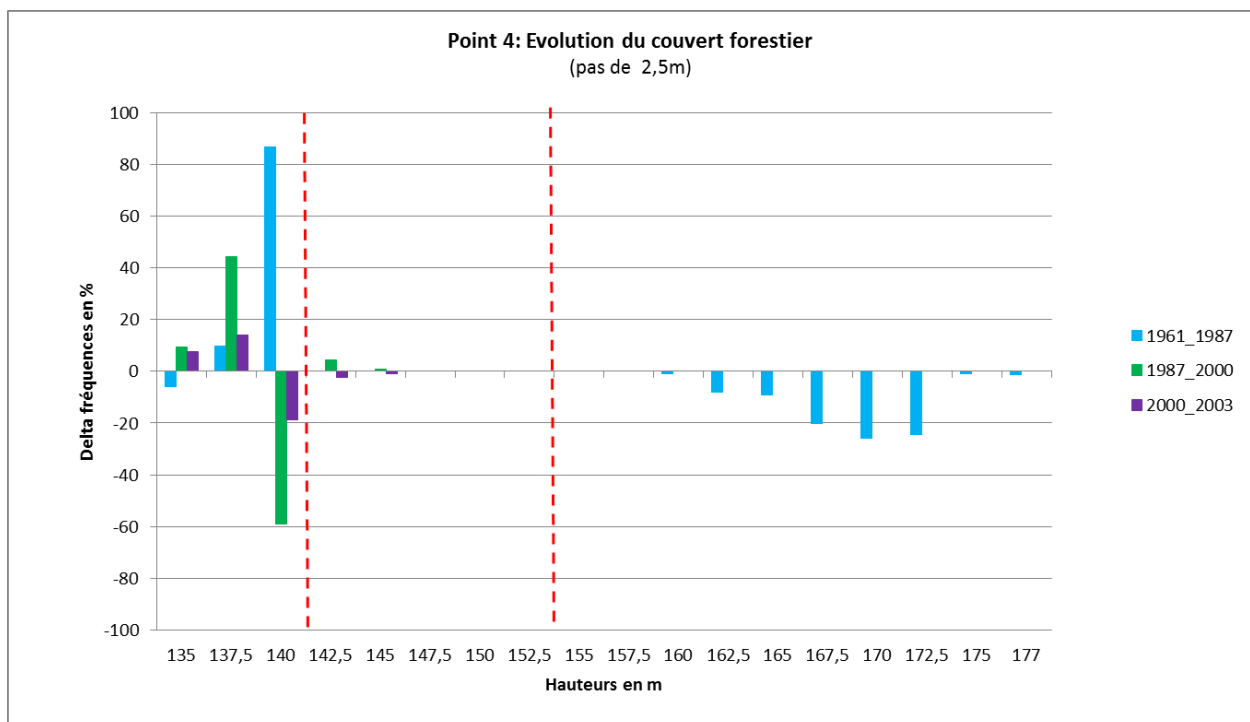
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 4)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
135	H. Inf.	1775	-105	63
137,5				
140				
142,5	H. Moy.	0	105	-63
145				
147,5				
150				
152,5				
155	H. Sup.	-1775	0	0
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170				
172,5				
175				
177				

**1961-1987** : Diminution de la classe H. Sup. et augmentation de la classe H. Inf.

- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET |H. Sup.| > 50 % de |H. Moy.| → **trouée profonde**.

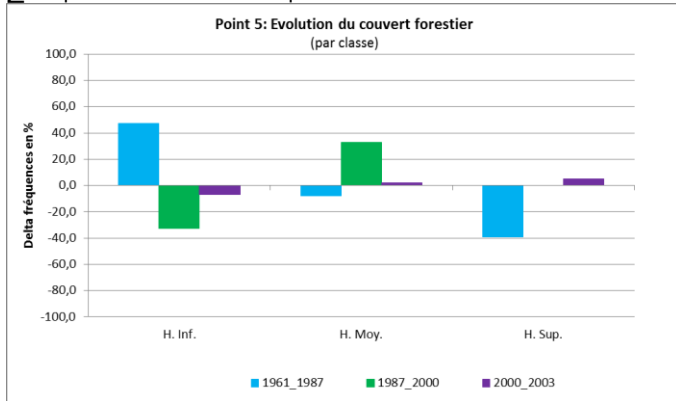
**1987-2000** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution**.

**2000-2003** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution**.



Point 5

Σ fréquences de la zone tampon : 1953



Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	920	-639	-136
130				
132,5				
135	H. Moy.	-156	639	37
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-764	0	99
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				

**1961-1987** : Diminution de la classe H. Sup. et augmentation de la classe H. Inf.

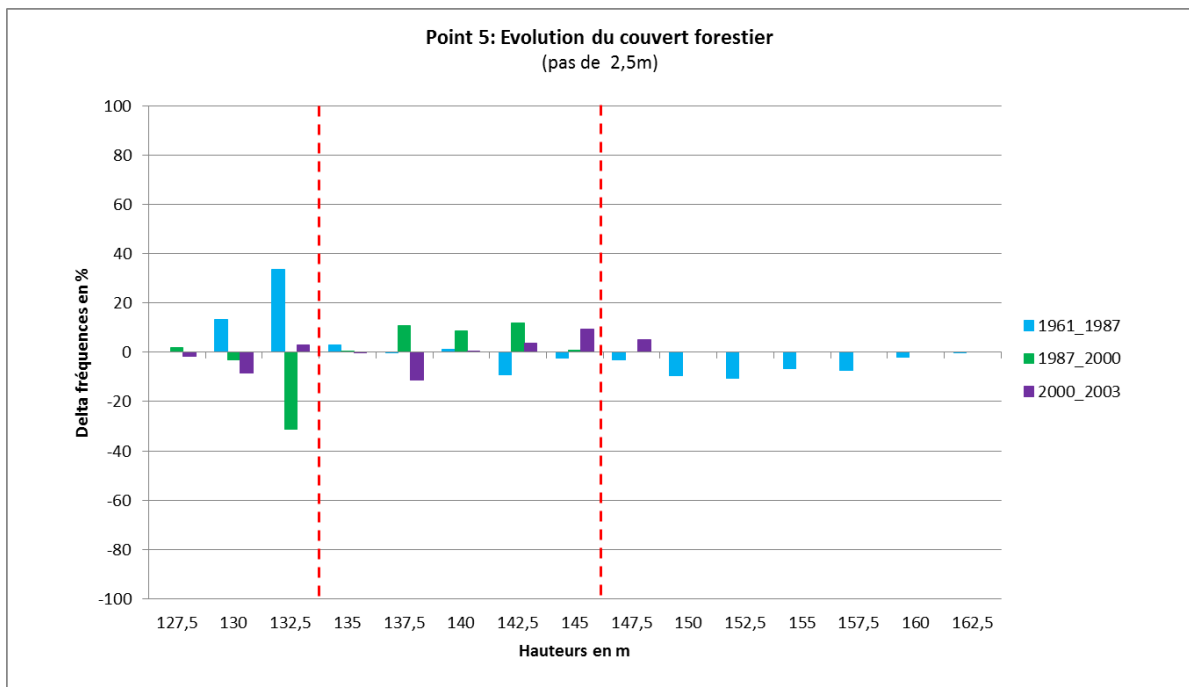
- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % | H. Moy. | → **trouée profonde**.

Remarque : orthophoto de 1961, présence d'une ombre non repérée comme trouée.

**1987-2000** : Diminution de H. Inf. et augmentation de H. Moy, nous avons probablement un comblement d'une trouée.  
H. Inf. < 0 → **comblement trouée**.

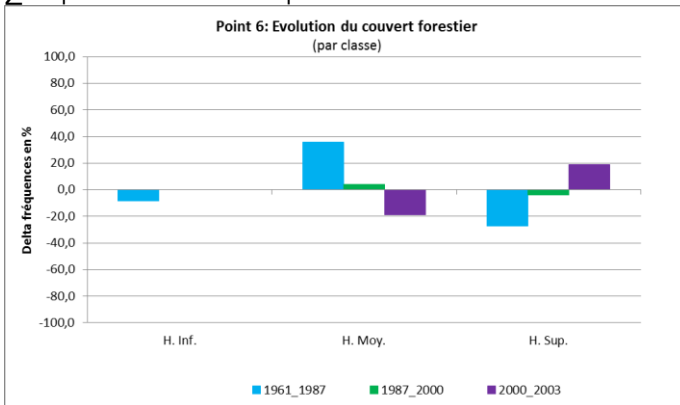
**2000-2003** : Augmentation de H. Moy. et diminution de H. Inf. probablement du à la croissance des arbres au cours de la période.

H. Inf. < 0 → **comblement probable de trouée** mais les valeurs absolues de chacune des classes est < à 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon. Toutefois sur le graphique au pas de 2,5 m la croissance du couvert durant cette période est visible en classe H. Moy..



## Point 6

Σ fréquences de la zone tampon : 1952



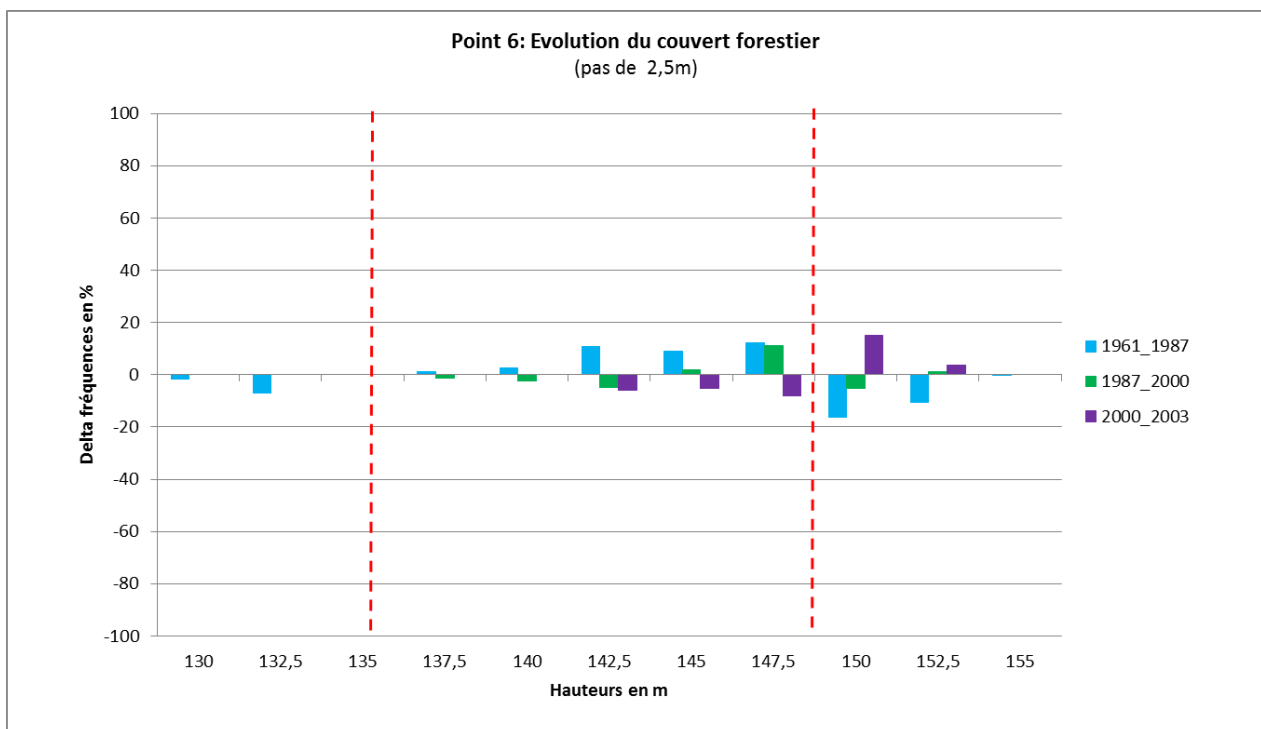
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 6)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
130	H. Inf.	-165	0	0
132,5				
135				
137,5	H. Moy.	697	80	-367
140				
142,5				
145				
147,5				
150	H. Sup.	-532	-80	367
152,5				
155				

**1961-1987 :**

- H. Inf. < 0 → **comblement de trouées de faible superficie.**
- H. Inf. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon, H. Moy. ≥ 0 et H. Sup. ≤ 0 avec H. Moy. ≥ | H. Sup. | → **trouée superficielle.**

**1987-2000 :** H. Inf., H. Moy., H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

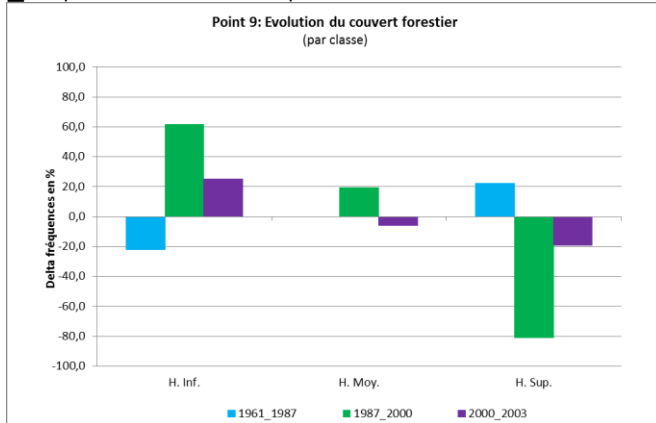
**2000-2003 :** H. Inf. = 0, H. Moy. < 0 → **comblement de trouée superficielle.**





Point 9

Σ fréquences de la zone tampon : 1960



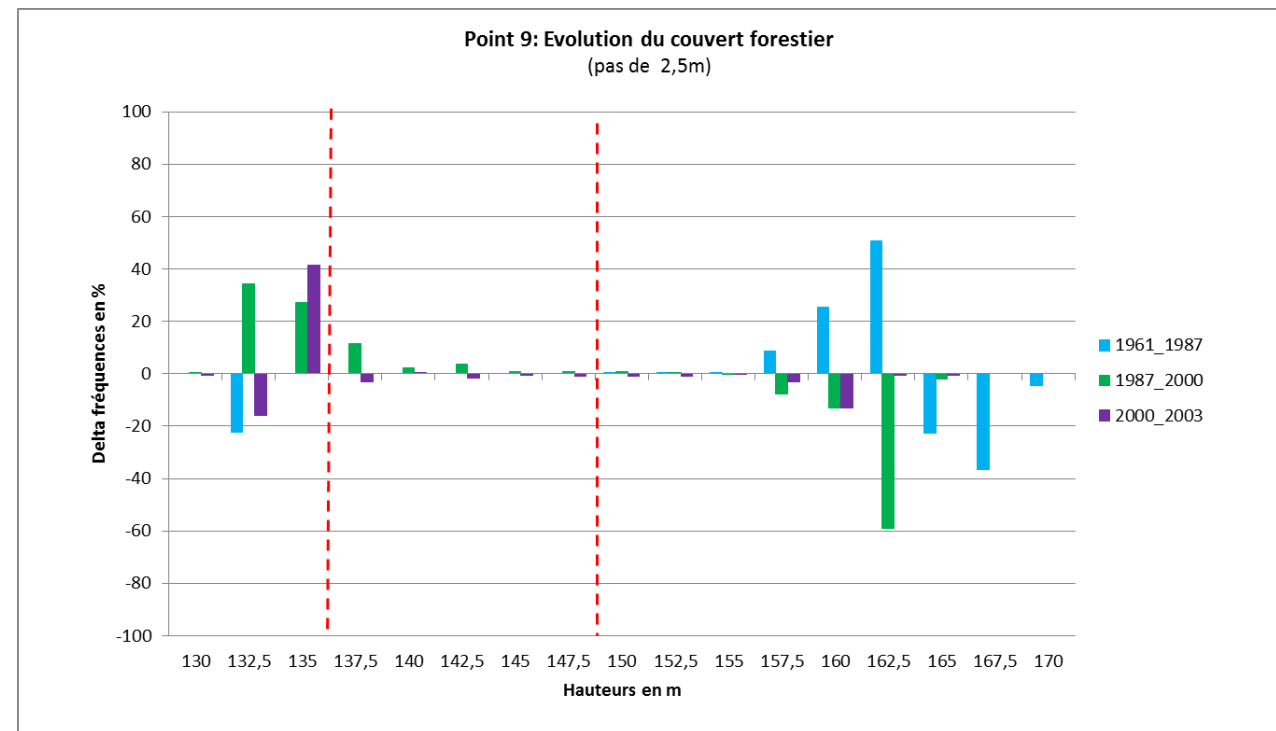
**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement de trouée.**

**1987-2000** : Diminution de la classe H. Sup. et augmentation de la classe H. Inf.

- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**
- H. Inf. > 0 et H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % de | H. Moy. | → **trouée profonde.**

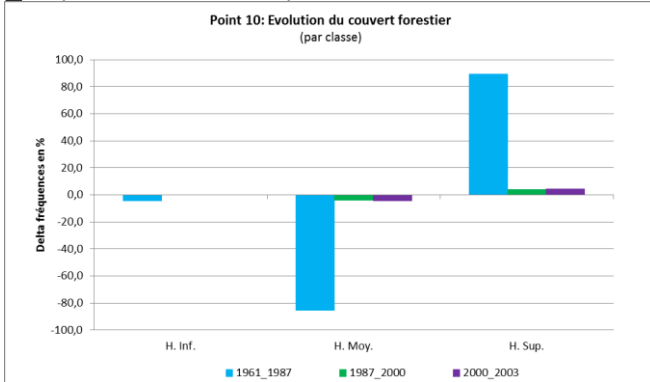
**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**

Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 9)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
130	H. Inf.	-435	1210	489
132,5				
135				
137,5	H. Moy.	0	375	-114
140				
142,5				
145				
147,5				
150	H. Sup.	435	-1585	-375
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170				



Point 10

Σ fréquences de la zone tampon : 1955



Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 10)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
122,5	H. Inf.	-83	0	0
125				
127,5				
130	H. Moy.	-1667	-75	-83
132,5				
135				
137,5				
140	H. Sup.	1750	75	83
142,5				
145				
147,5				

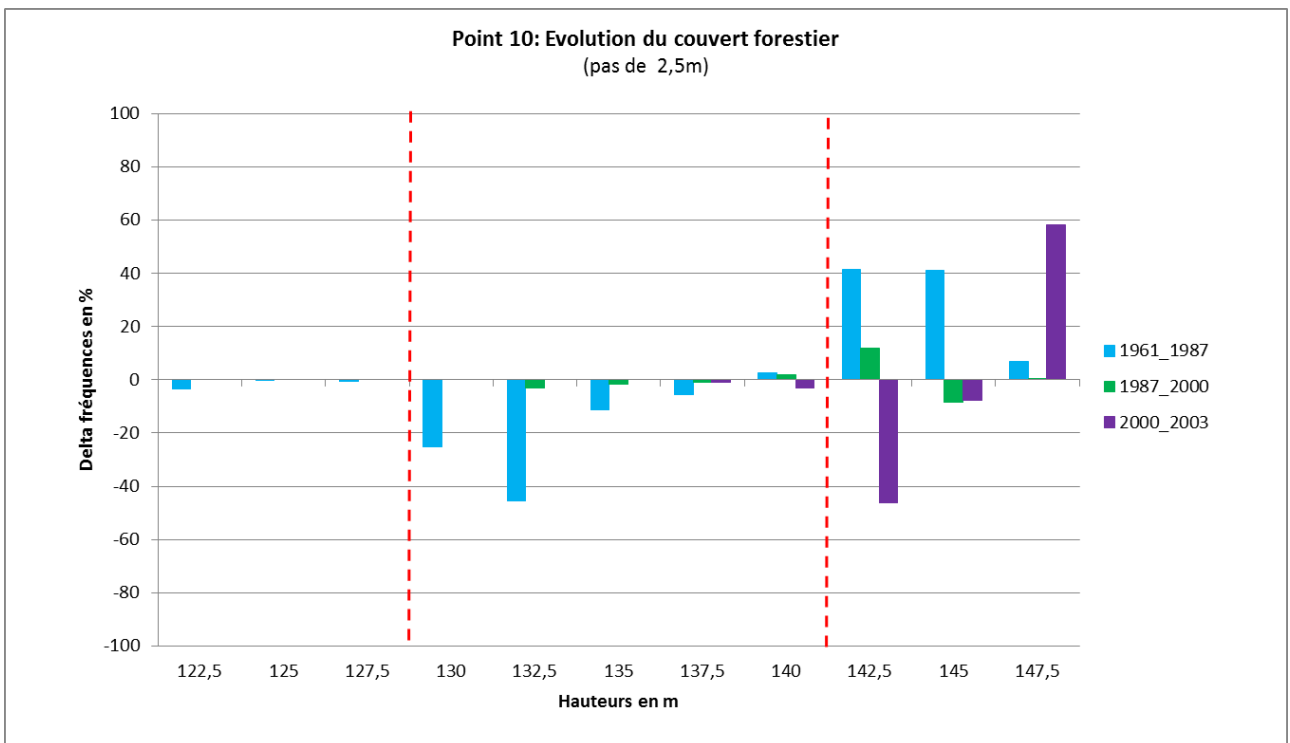
**1961-1987** : Diminution de H. Moy. et augmentation de H. Sup.

→ **croissance probable des arbres.**

H. Inf. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon et H. Moy. < 0 → **comblement de trouée superficielle.**

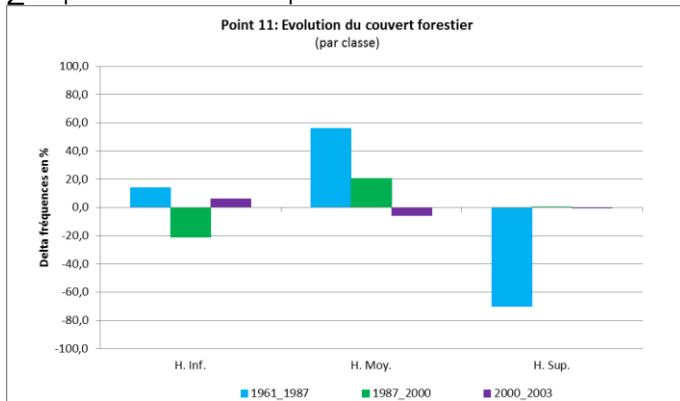
**1987-2000** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

**2000-2003** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



Point 11

Σ fréquences de la zone tampon : 1950



Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 11)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
125	H. Inf.	273	-408	118
127,5				
130				
132,5	H. Moy.	1091	400	-110
135				
137,5				
140				
142,5				
145	H. Sup.	-1364	8	-8
147,5				
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				

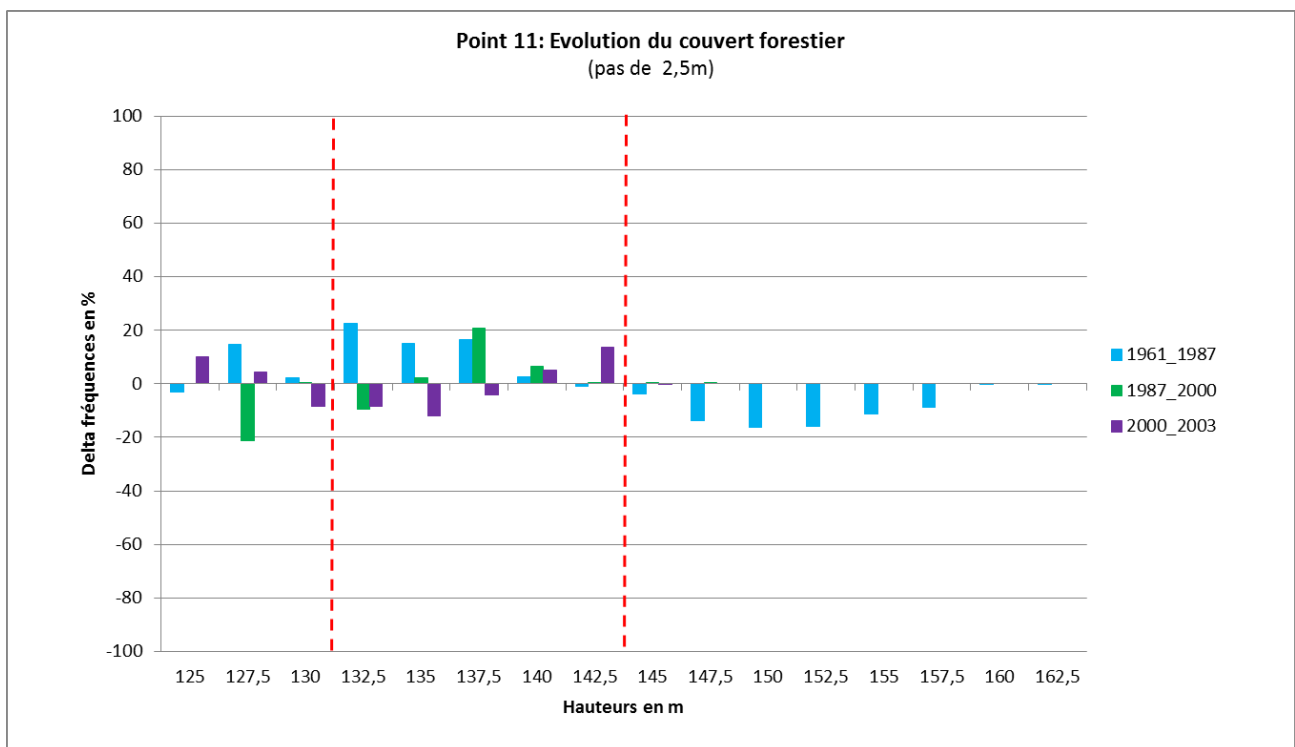
**1961-1987** : Diminution de H. Sup. et augmentation des classes H. Inf. et H. Moy.

- H. Inf. > 0 → **légères ouvertures de trouées** (14 %).
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % de | H. Moy. | → **trouée profonde**.

**1987-2000** : Diminution de H. Inf. et augmentation de H. Moy. → **croissance probable des arbres**.

H. Inf. < 0 → **comblement trouée**.

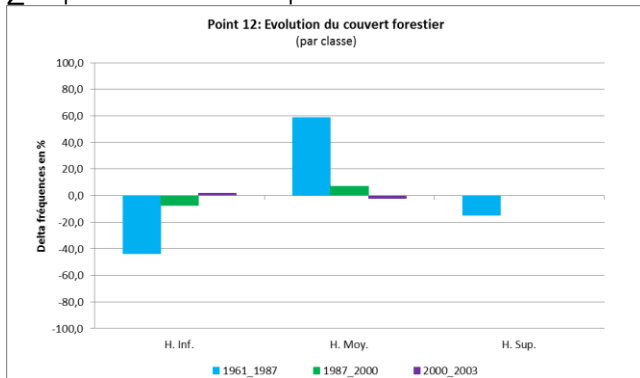
**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **très légère ouverture de trouées** (6 %).



**2000-2003** : croissance du couvert durant cette période est visible en classe H. Moy.

Point 12

Σ fréquences de la zone tampon : 1957

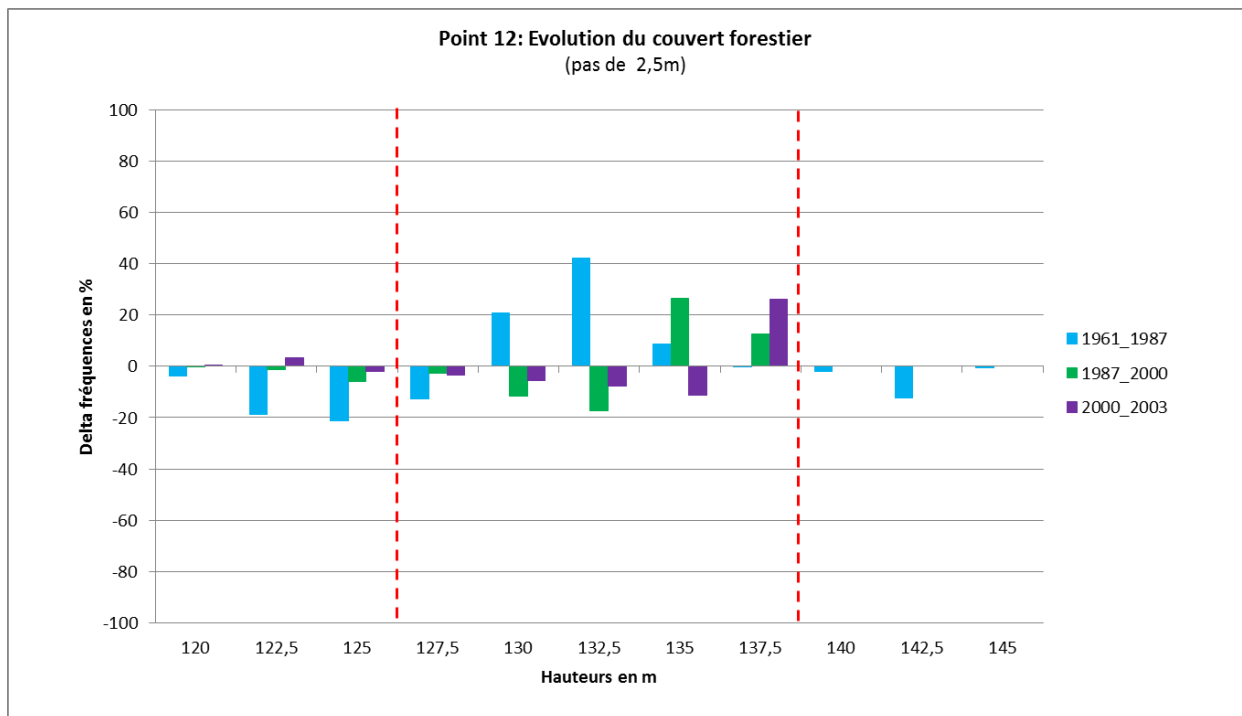


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 12)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
120	H. Inf.	-856	-142	39
122,5				
125				
127,5	H. Moy.	1147	142	-39
130				
132,5				
135				
137,5				
140	H. Sup.	-291	0	0
142,5				
145				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement de trouée.**

**1987-2000** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

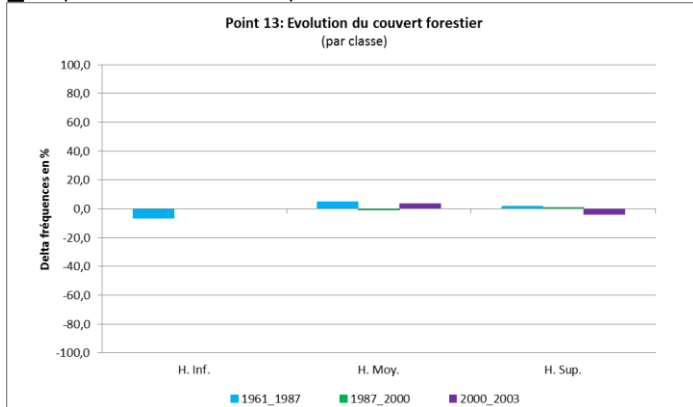
**2000-2003** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



**2000-2003** : la croissance du couvert durant cette période est visible en classe H. Moy.

Point 13

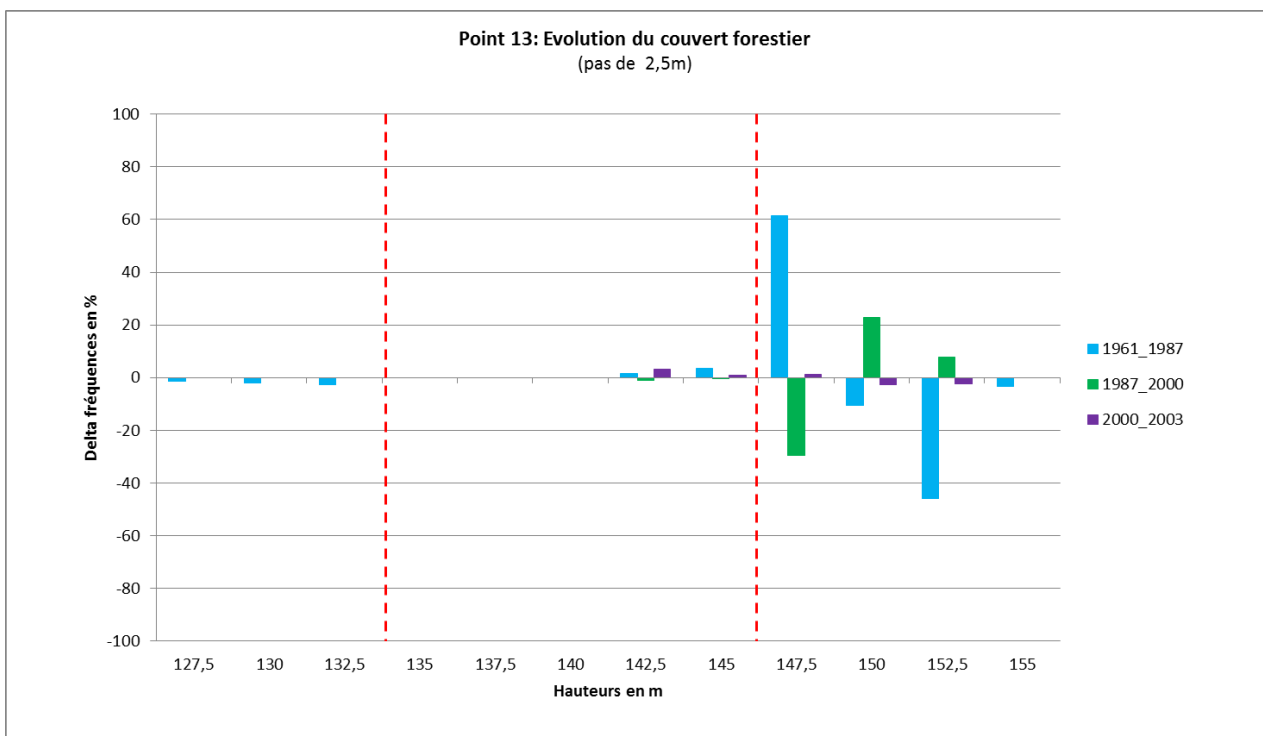
Σ fréquences de la zone tampon : 1947



Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 13)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	-126	0	0
130				
132,5				
135	H. Moy.	93	-20	73
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	33	20	-73
150				
152,5				
155				

1961-1987 ; 1987-2000 ; 2000-2003 :

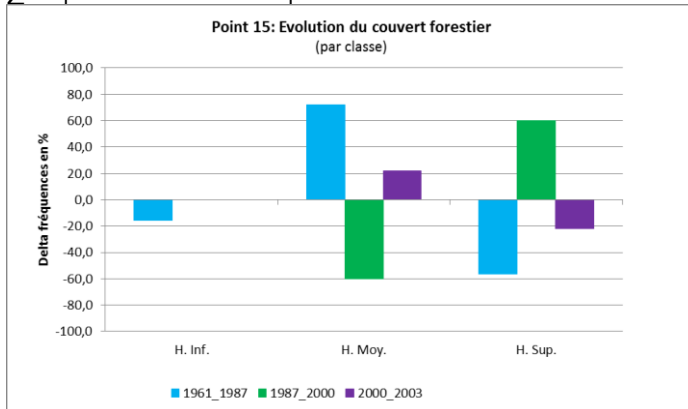
H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



Il est intéressant de constater sur le graphique d'évolution du couvert au pas de 2,5 m que des modifications existent uniquement sur la classe H. Sup.. Ainsi pour la période 1961-1987 des arbres de la classe 152,5 m ont disparu alors qu'en classe 147,5 m ils apparaissent en nombre important. Pour la période 1987-2000 des évolutions qui peuvent refléter une croissance.

Point 15

Σ fréquences de la zone tampon : 1951



Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
125	H. Inf.	-307	0	0
127,5				
130				
132,5	H. Moy.	1404	-1172	432
135				
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-1097	1172	-432
150				
152,5				
155				
157,5				

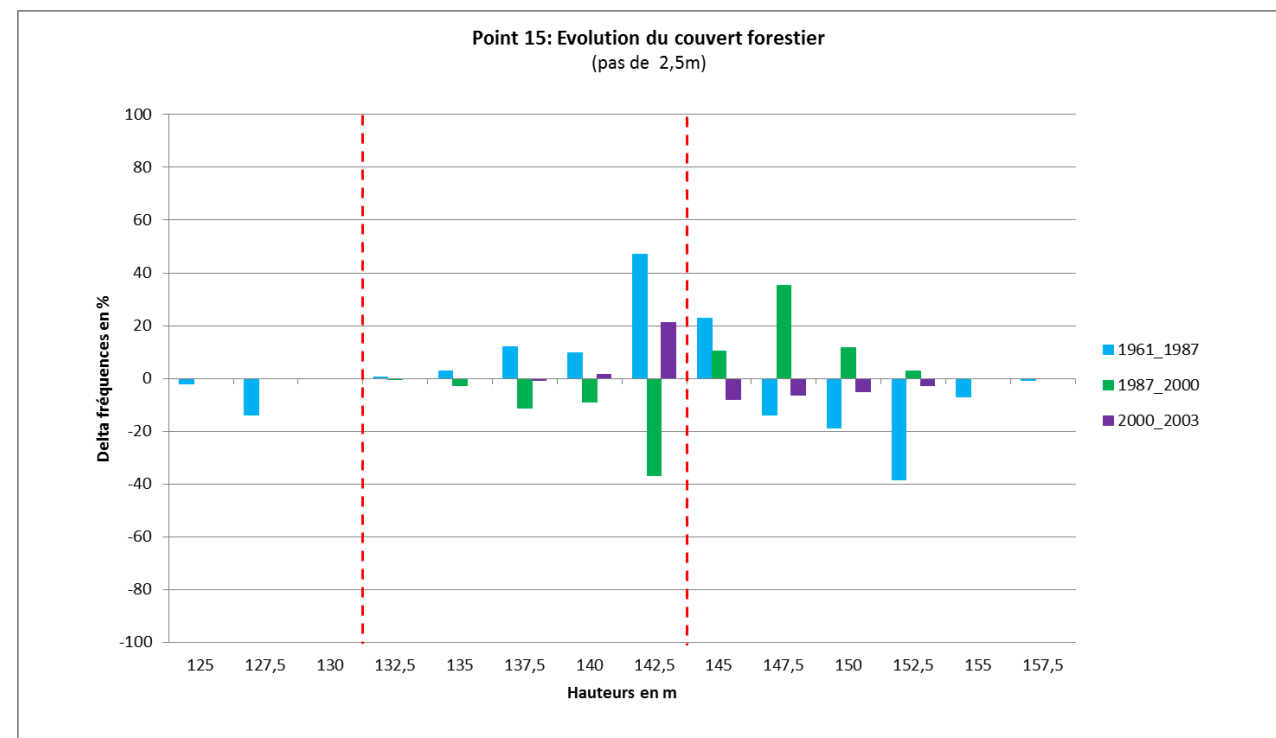
**1961-1987** : Diminution de la classe H. Sup, un éclaircissage peut être supposé.

H. Inf. < 0 → **comblement trouée**.

**1987-2000** : Augmentation de la classe H. Sup. et diminution de la classe H. Moy. montre une croissance des arbres.

H. Inf. = 0, H. Moy. < 0 → **comblement de trouée superficielle**.

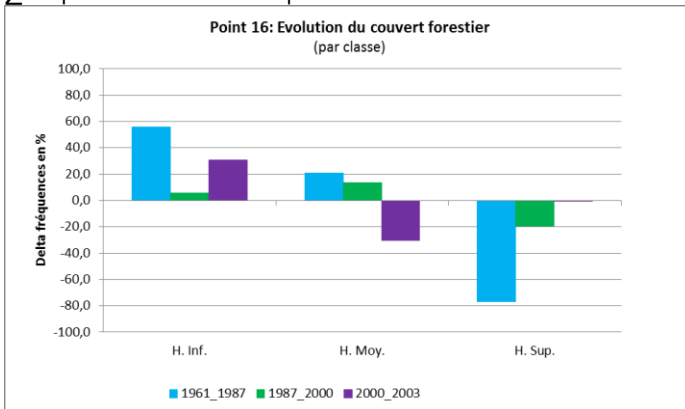
**2000-2003** : H. Inf. = 0, H. Moy. ≥ 0, H. Sup. ≤ 0 avec H. Moy. ≥ | H. Sup. | → **trouée superficielle**.



**Interprétation orthophotos** : pas de changement notable sur la période 1961 à 2003.

## Point 16

Σ fréquences de la zone tampon : 1950



Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 16)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
117,5	H. Inf.	1091	111	596
120				
122,5				
125	H. Moy.	407	264	-590
127,5				
130				
132,5				
135				
137,5	H. Sup.	-1498	-375	-6
140				
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5				

**1961-1987** : diminution de la classe H. Sup. et augmentation de la classe H. Inf.

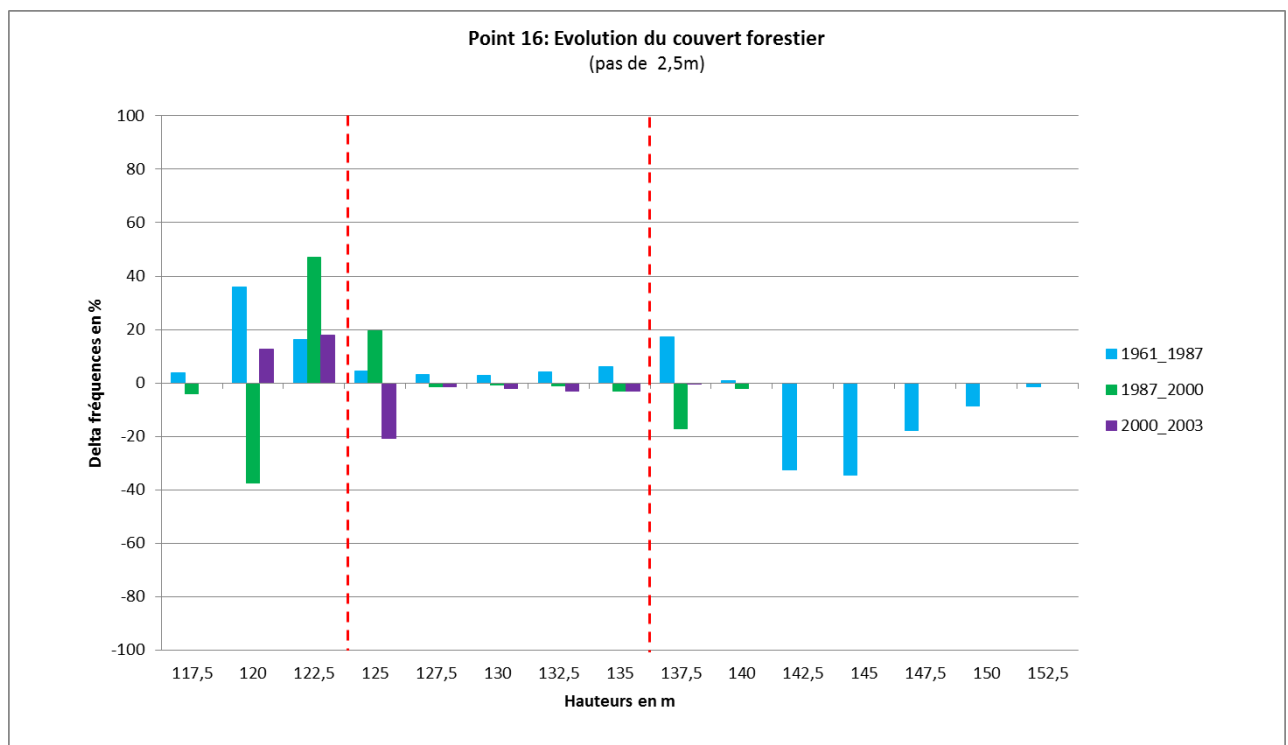
- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.
- H. Inf. > 0 et H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % de | H. Moy. | → **trouée profonde**.

**1987-2003** : faible diminution de la classe H. Sup.

H. Inf. > 0 → très légère ouverture de trouée.

**2000-2003** : Apparition de la classe H. Inf. et disparition des classes H. Moy. et H. Sup.

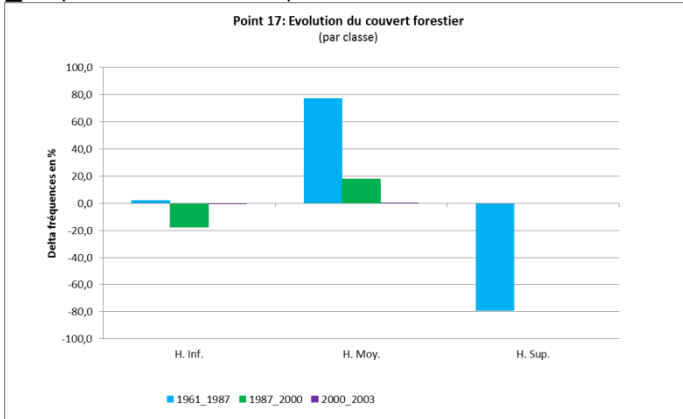
H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.

**Interprétation orthophotos :**

- 1961-1987 : faible diminution des hauteurs.
- 1987-2000 : apparition d'une petite trouée.
- 2000-2003 : apparition d'une large trouée.

Point 17

Σ fréquences de la zone tampon : 1954

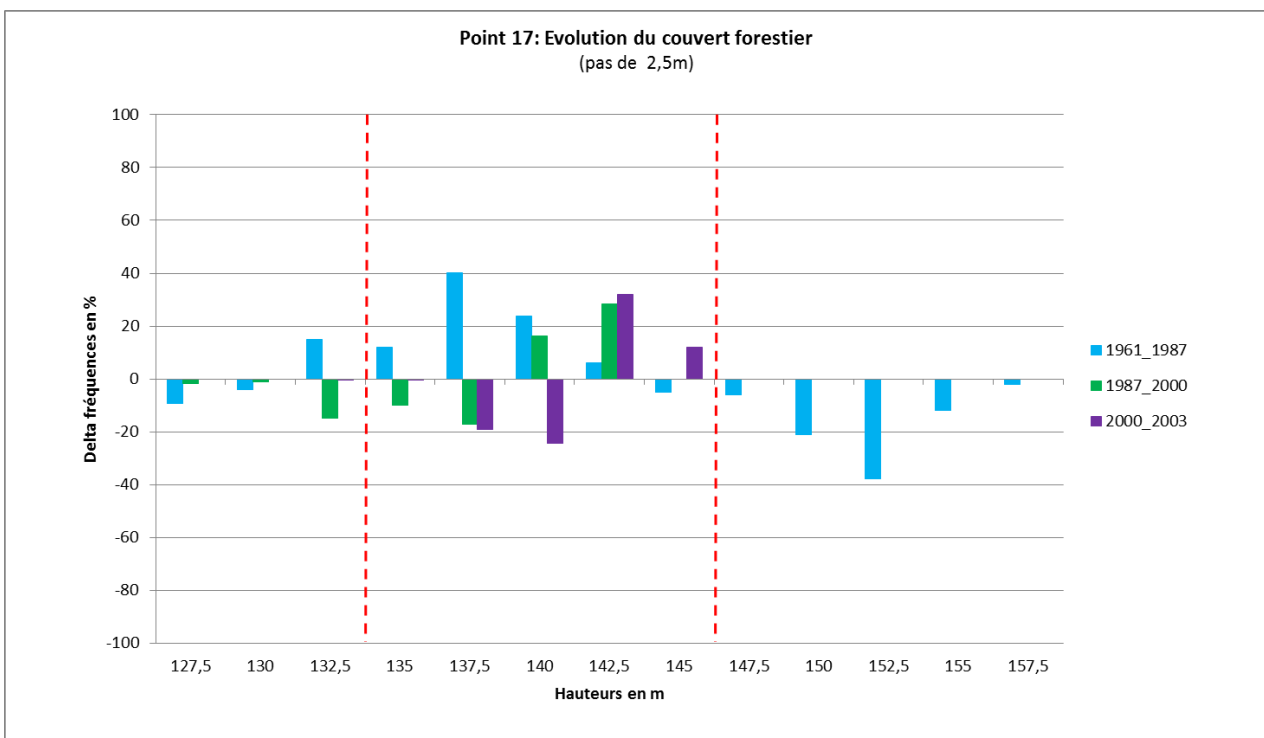


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 17)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	35	-345	-2
130				
132,5				
135	H. Moy.	1511	345	2
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-1546	0	0
150				
152,5				
155				
157,5				

**1961-1987** : H. Inf. > 0 → ouverture trouée.

**1987-2000** : H. Inf. < 0 → comblement de trouée.

**2000-2003** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → absence d'évolution.



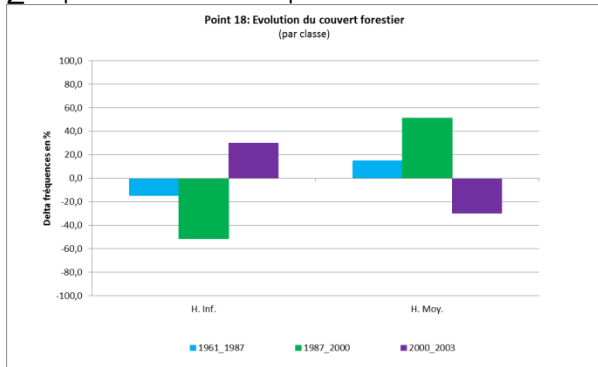
2000-2003 : croissance des arbres.

**Interprétation orthophotos** : Pas de changement notable.



Point 18

Σ fréquences de la zone tampon : 1958

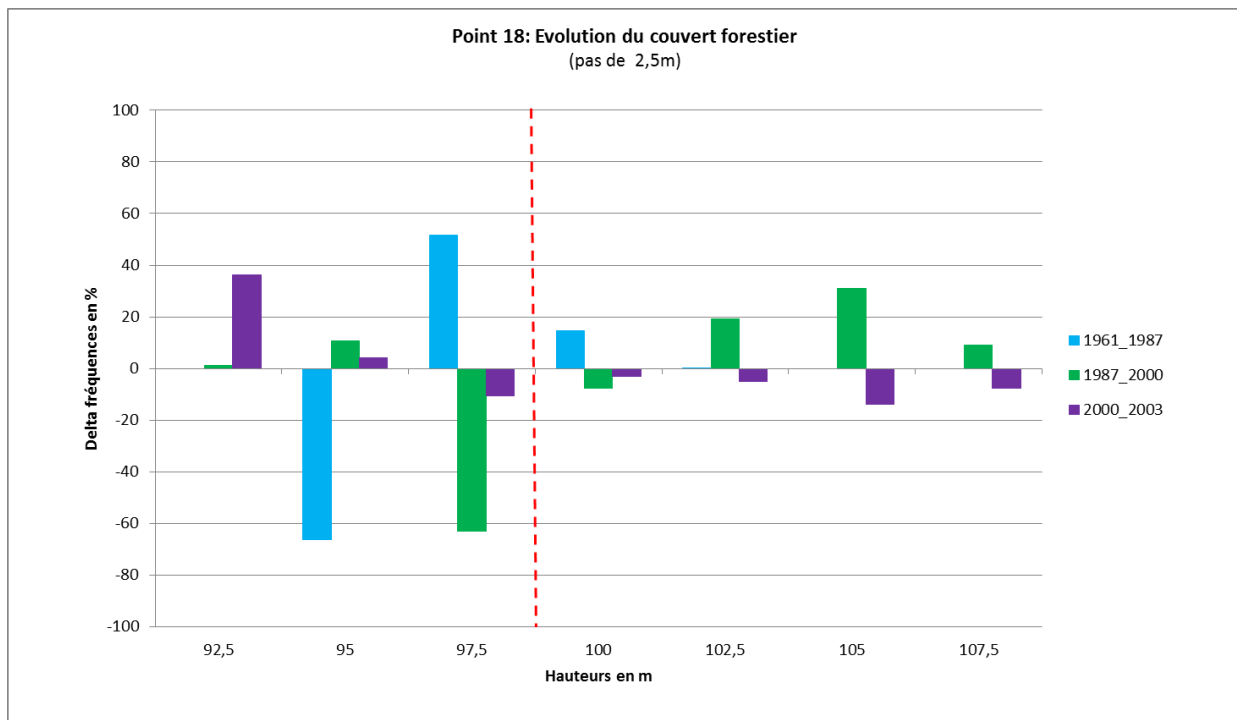


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 18)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
92,5	H. Inf.	-290	-1004	584
95				
97,5				
100	H. Moy.	290	1004	-584
102,5				
105				
107,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

**1987-2000** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

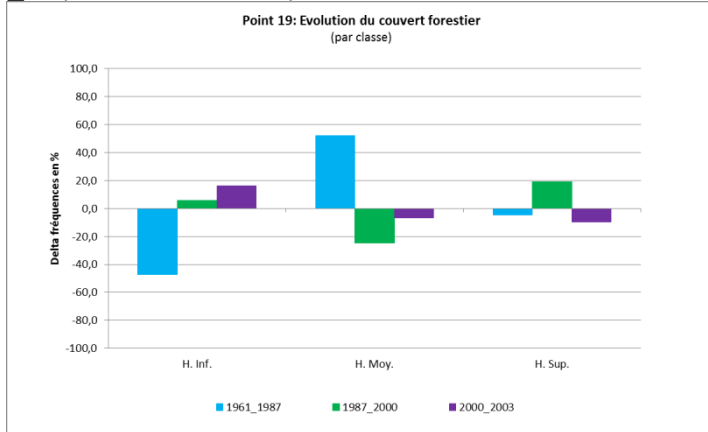
**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**



**Interprétation orthophotos** : une hypothèse, la croissance des arbres sur la période de 1961 à 2000. Sur la période 2000-2003 apparition d'une petite trouée.

Point 19

Σ fréquences de la zone tampon : 1954

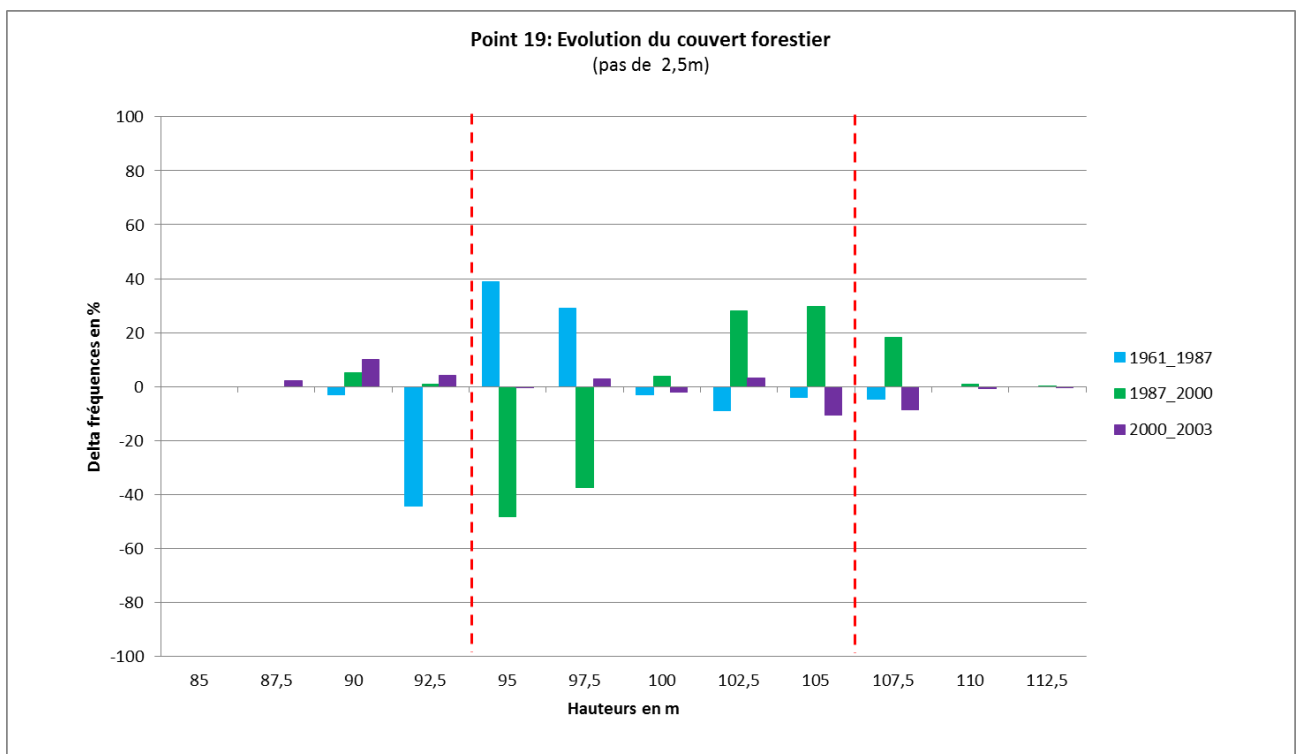


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 19)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
87,5	H. Inf.	-927	115	319
90				
92,5				
95	H. Moy.	1021	-486	-132
97,5				
100				
102,5				
105				
107,5	H. Sup.	-94	371	-187
110				
112,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

**1987-2000** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**

**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**

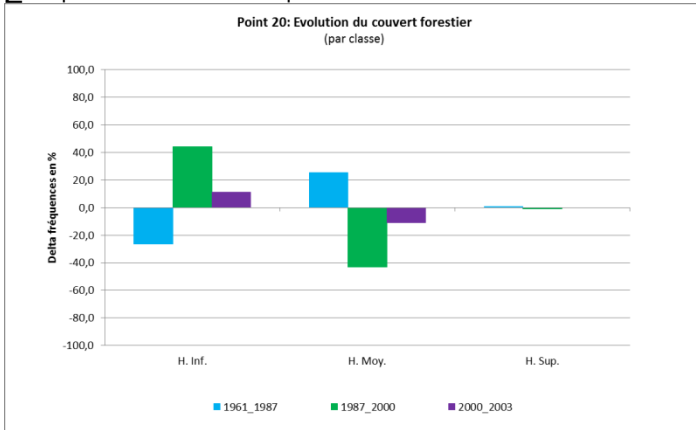


**Interprétation orthophotos** : Entre 1961 et 1987, croissance des arbres.

Entre 1987 et 2003, très peu de changement sont à noter.

Point 20

Σ fréquences de la zone tampon : 1964

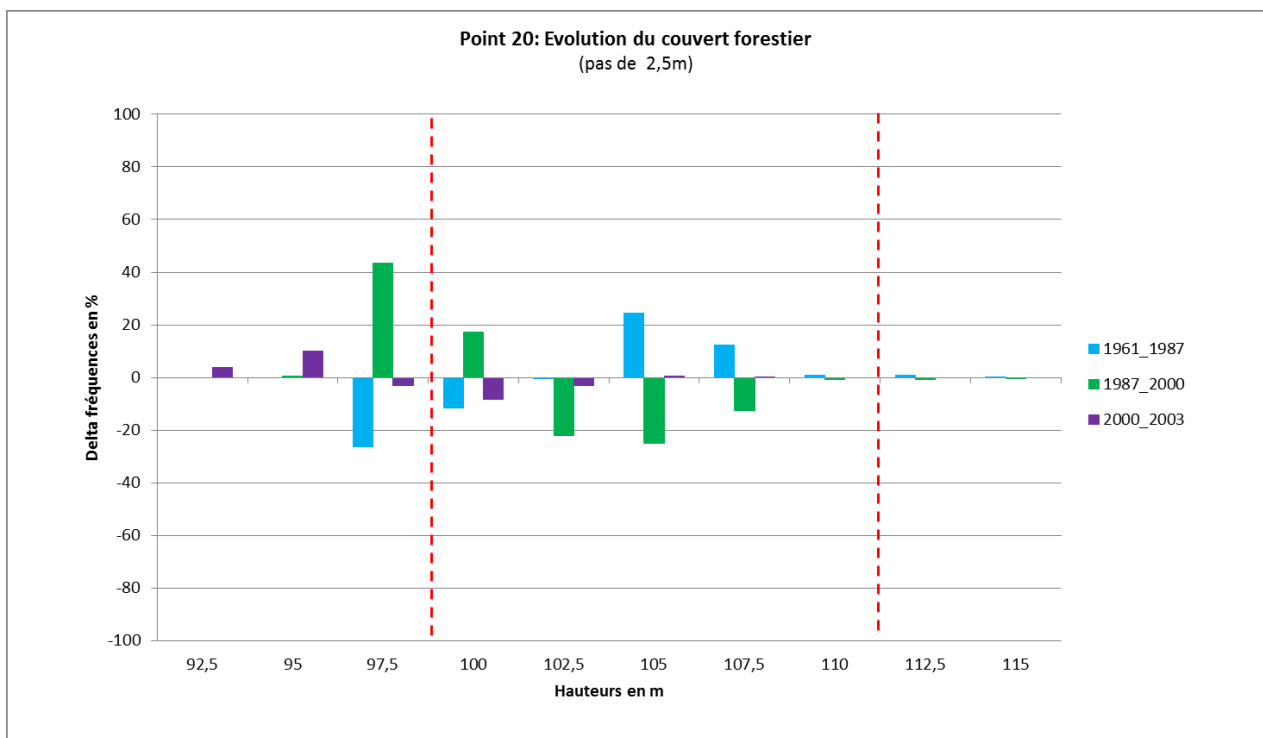


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 20)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
92,5	H. Inf.	-520	864	216
95				
97,5				
100	H. Moy.	502	-846	-216
102,5				
105				
107,5				
110				
112,5	H. Sup.	18	-18	0
115				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

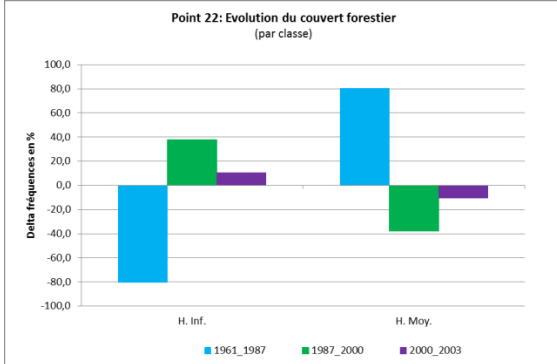
**1987-2000** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**

**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**



Point 22

Σ fréquences de la zone tampon : 1951



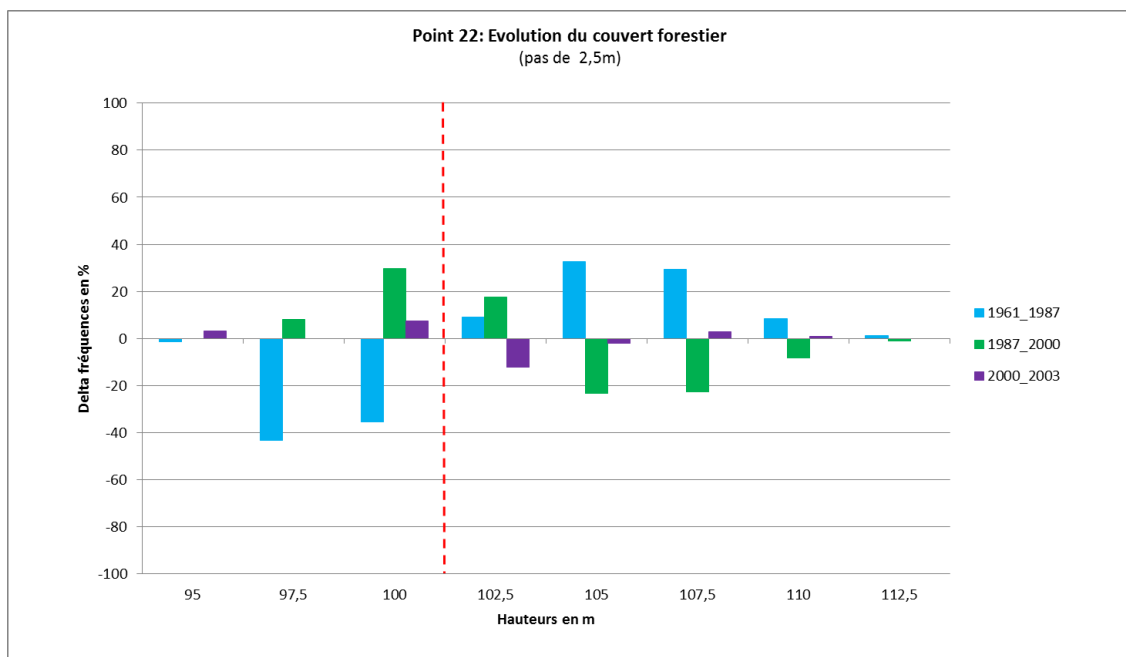
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 22)				
Hauteurs en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
95	H. Inf.	-1564	742	206
97,5				
100				
102,5	H. Moy.	1564	-742	-206
105				
107,5				
110				
112,5				

**1961-1987** : diminution de la classe H. Inf. et augmentation de la classe H. Moy. → croissance probable des arbres.

H. Inf. < 0 → **comblement de trouée**.

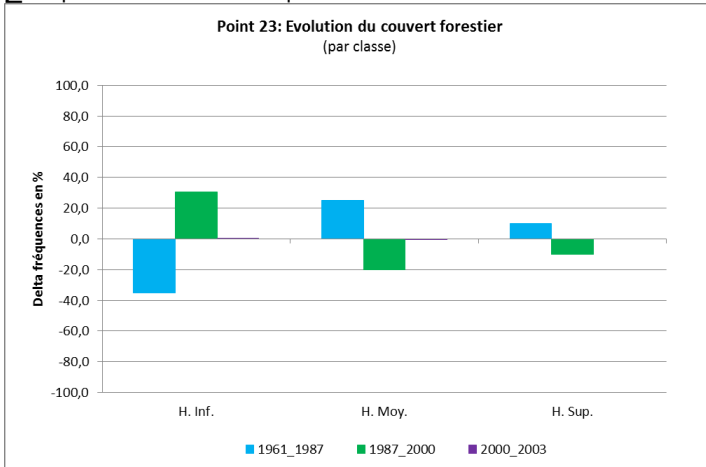
**1987-2000** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.

**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.



## Point 23

Σ fréquences de la zone tampon : 1950

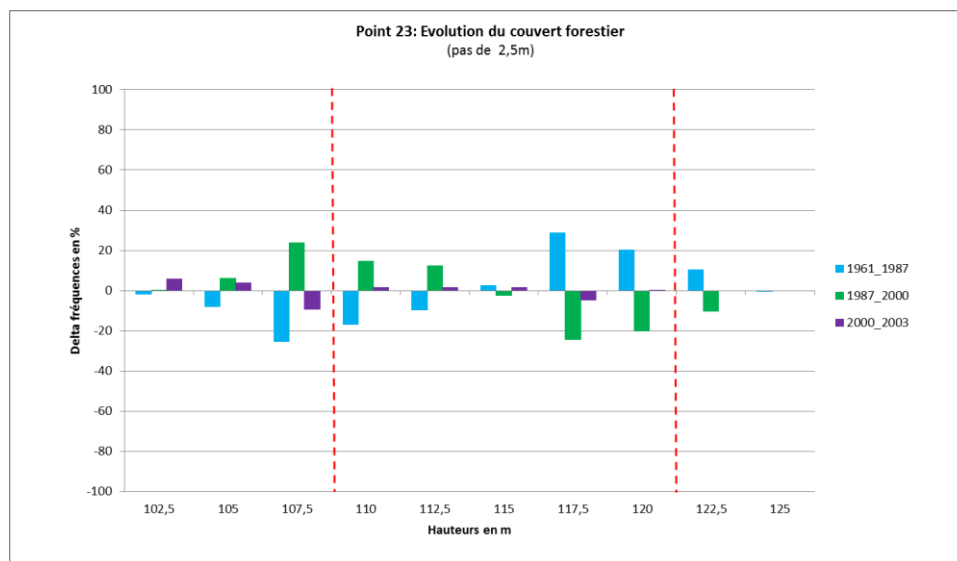


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 23)				
Hauteurs en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
102,5	H. Inf.	-687	591	3
105				
107,5				
110	H. Moy.	488	-391	-3
112,5				
115				
117,5				
120				
122,5	H. Sup.	199	-200	0
125				

**1987-1961** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

**1987-2000** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**

**2000-2003** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



**Interprétation orthophotos :**

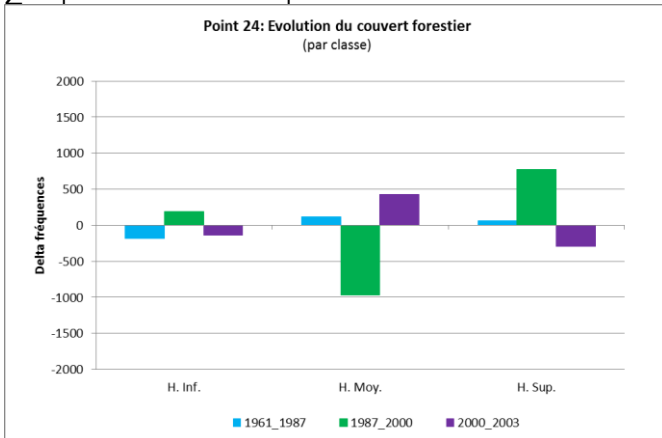
1961-1987 : croissance des arbres.

1987-2000 : diminution de la hauteur des arbres.

2000-2003 : peu de changement.

Point 24

Σ fréquences de la zone tampon : 1960



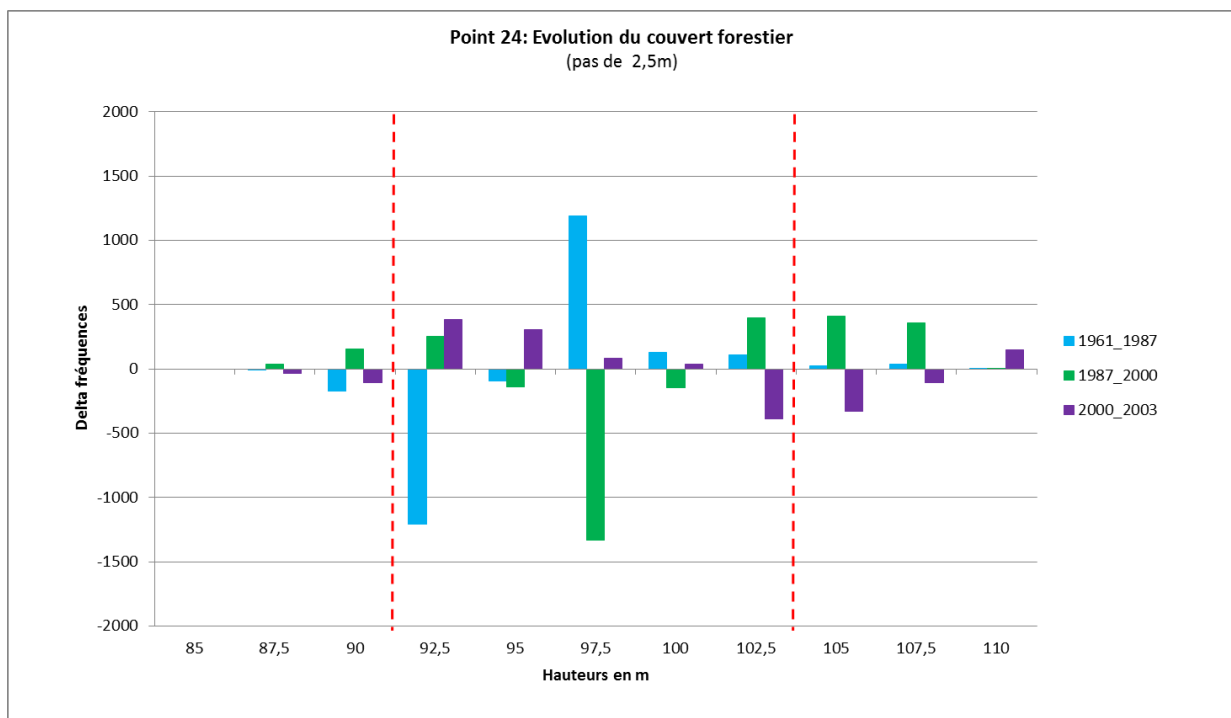
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 24)				
Hauteurs en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
85	H. Inf.	-185	194	-142
87,5				
90				
92,5	H. Moy.	118	-966	432
95				
97,5				
100				
102,5	H. Sup.	67	772	-290
105				
107,5				
110				

**1961-1987** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup.  $\approx 0 \pm 10\%$  de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

**1987-2000** : H. Inf.  $> 0$  → **ouverture trouée.**

**2000-2003** :

- H. Inf.  $< 0$  → éventuellement une **amorce de comblement de trouée** (H. Inf. = 7,2 %).
- H. Inf.  $\approx 0 \pm 10\%$  de la somme des fréquences de la zone tampon, H. Moy.  $\geq 0$ , H. Sup.  $\leq 0$  avec H. Moy.  $\geq |H. Sup.|$  → **trouée superficielle.**



**Interprétation orthophotos :**

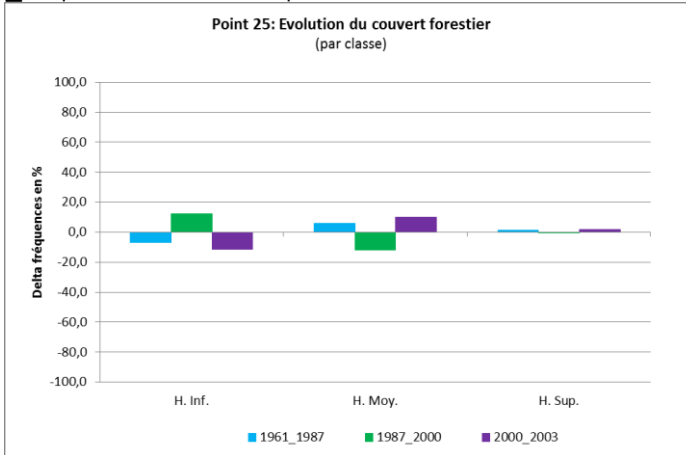
1961-1987 : croissance faible des arbres.

1987-2000 : croissance des arbres.

2000-2003 : peu de changement.

## Point 25

Σ fréquences de la zone tampon : 1949

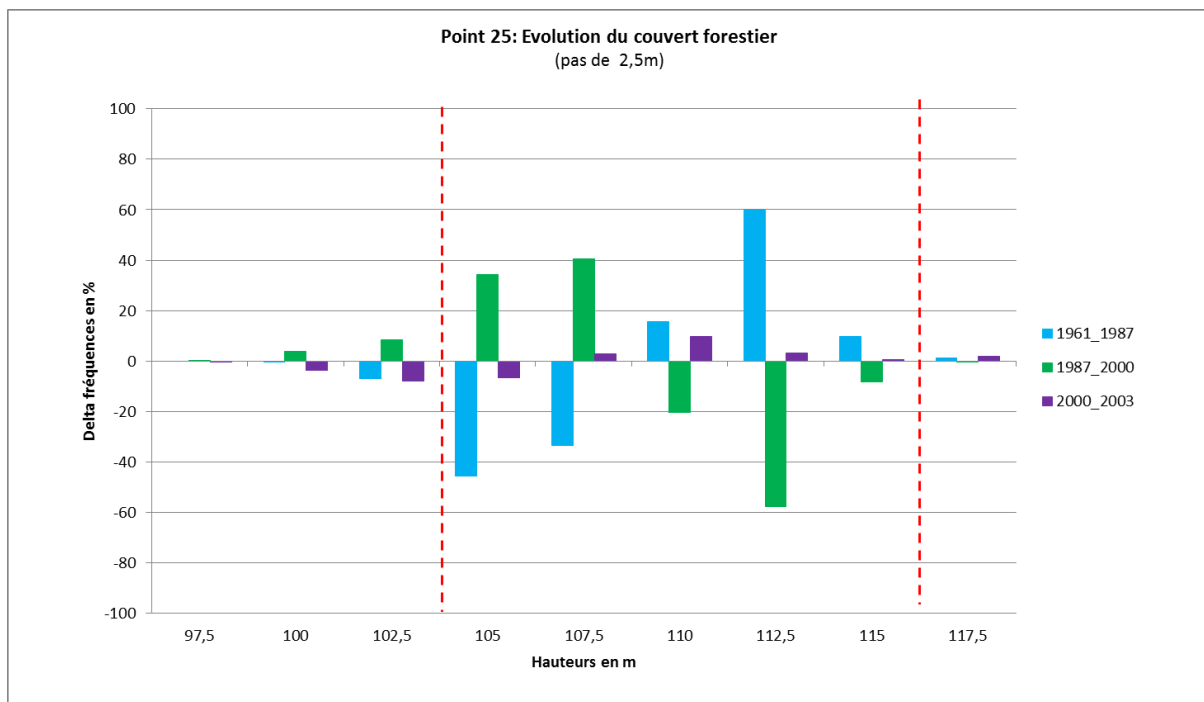


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 25)				
Hauteurs en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
97,5	H. Inf.			
100		-136	239	-227
102,5				
105	H. Moy.	113	-230	192
107,5				
110				
112,5				
115	H. Sup.			
117,5		23	-9	35

**1987-2000** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup.  $\approx 0$  +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution**.

**1987-2000** : H. Inf. > 0 → **faible ouverture de trouée** (12,3 %).

**2000-2003** : H. Inf. < 0 → **faible comblement de trouée**.



**1961-1987** : à partir du graphique au pas de 2,5 m il est possible de dire que des changements sont concentrés sur les hauteurs moyennes avec une augmentation des hauteurs.

**1987-2000** : à partir du graphique au pas de 2,5 m il est possible de dire que les changements sont concentrés sur les hauteurs moyennes avec une régression des hauteurs sur la période.

**Interprétation orthophotos :**

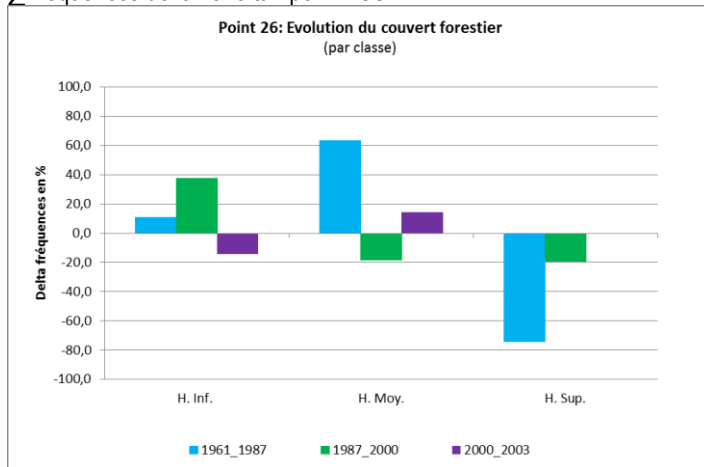
1961-1987 : apparition de petits arbres.

1987-2000 : peu de changement.

2000-2003 : pas de changement.

## Point 26

Σ fréquences de la zone tampon : 1957



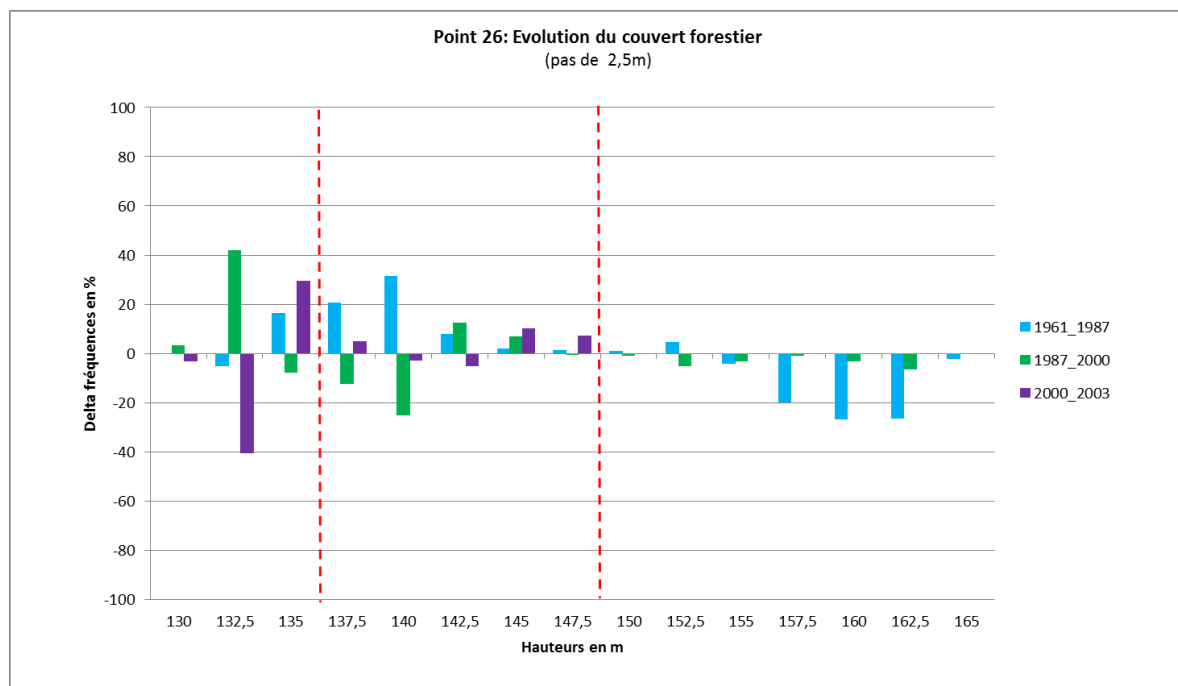
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 26)				
Hauteurs en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
130	H. Inf.	214	731	-278
132,5				
135				
137,5	H. Moy.	1233	-357	278
140				
142,5				
145				
147,5				
150	H. Sup.	-1447	-374	0
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				

**1961-1987 :**

- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**
- H. Inf. > 0, H. Sup. ET | H. Sup. | > 50 % de | H. Moy. | → **trouée profonde.**

**1987-2000 :** H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**

**2000-2003 :** H. Inf. < 0 → **ouverture trouée.**



**2000-2003 :** à l'analyse du graphique au pas de 2,5 m il semble que la trouée soit en amorce de comblement : classe 132,5 m – et classe 135 m +.

**Interprétation orthophotos :**

1961-1987 : pas de changement.

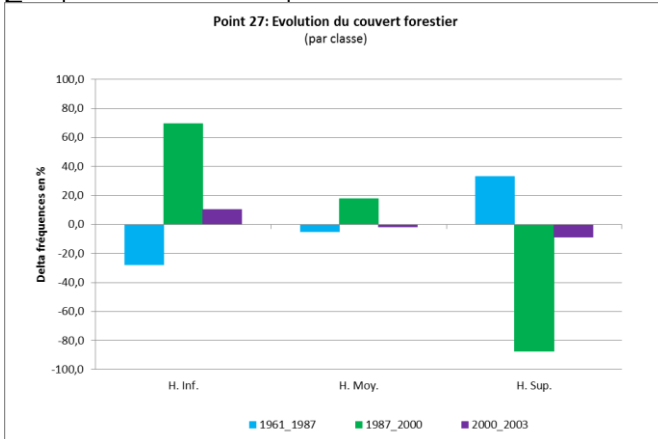
1987-2000 : apparition d'une trouée.

2000-2003 : globalement peu de changement.



## Point 27

Σ fréquences de la zone tampon : 1952



Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 27)				
Hauteurs en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	-544	1361	205
130				
132,5				
135	H. Moy.	-101	347	-33
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	645	-1708	-172
150				
152,5				
155				
157,5				

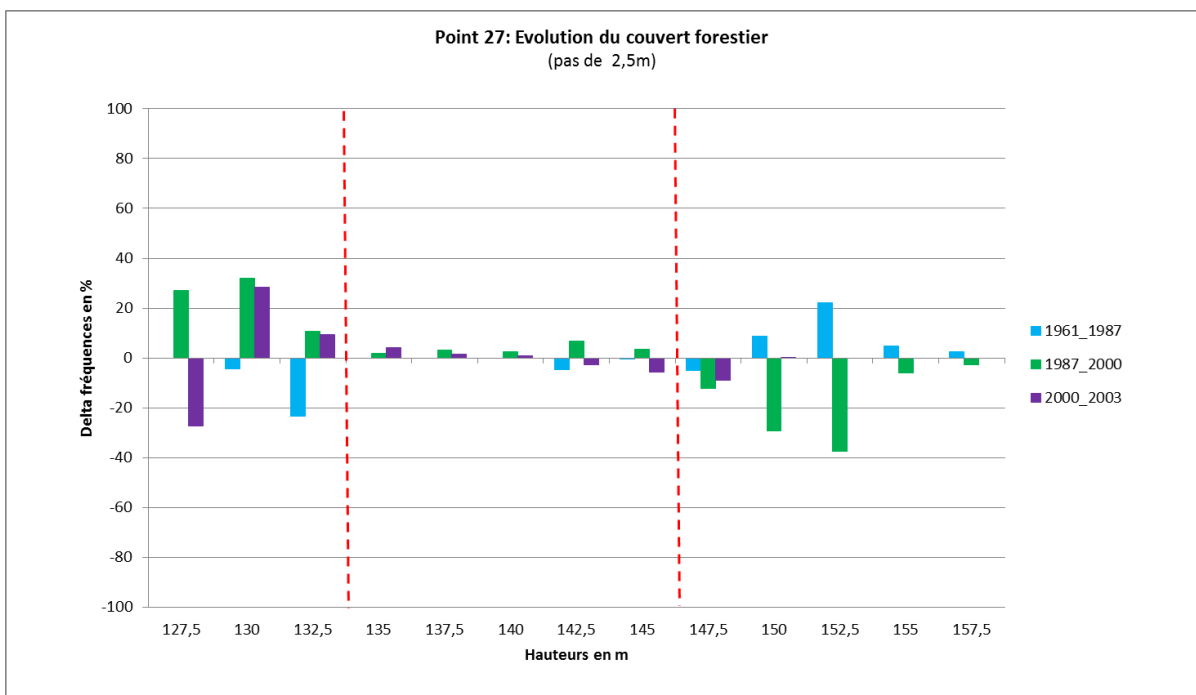
**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

**1987-2000** :

- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**
- H. Inf. > 0 ET | H. Inf. | > 70 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **trouée étendue.**
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % de | H. Moy. | → **trouée profonde.**

**2000-2003** :

- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée** mais moins prononcée (10,5 %) que sur la période précédente.
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % de | H. Moy. | → **trouée profonde.**



**2000-2003** : à partir du graphique au pas de 2,5 m en ciblant la catégorie H. Inf. il est envisageable de dire qu'il se dessine un comblement de trouée.

**Interprétation orthophotos :**

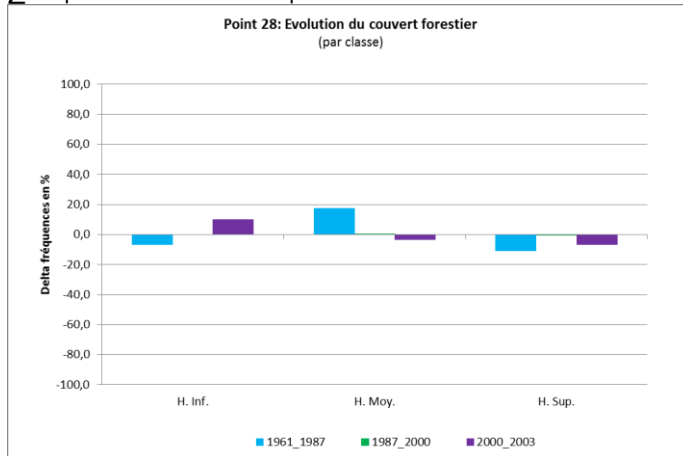
1961-1987 : pas de changement notable.

1987-2000 : apparition d'une trouée.

2000-2003 : pas de changement notable.

## Point 28

Σ fréquences de la zone tampon : 1950



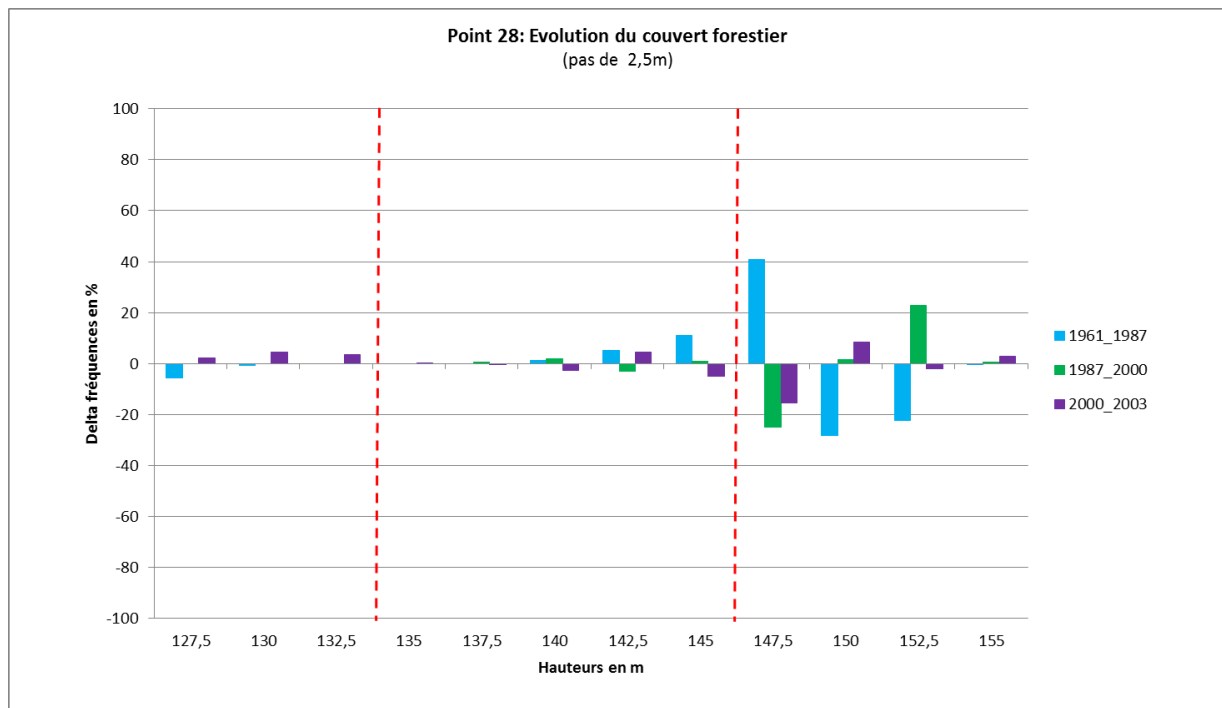
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 28)				
Hauteurs en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	-129	0	196
130				
132,5				
135	H. Moy.	337	5	-65
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-208	-5	-131
150				
152,5				
155				

**1961-1987** : H. Inf.  $\approx 0 \pm 10\%$  de la somme des fréquences

de la zone tampon, H. Moy.  $\geq 0$ , H. Sup.  $\leq 0$  avec H. Moy.  $\geq |$  H. Sup.  $| \rightarrow$  **trouée superficielle.**

**1987-2000** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup.  $\approx 0 \pm 10\%$  de la somme des fréquences de la zone tampon  $\rightarrow$  **absence d'évolution.**

**2000-2003** : H. inf.  $> 0 \rightarrow$  **légère ouverture de trouée (10 %).**



**1961-1987** : à partir du graphique au pas de 2,5 m en ciblant la catégorie H. Sup. il est possible de voir que les plus grands arbres de la classe ont disparu mais avec une progression de ceux proches de la borne inférieure.

**1987-2000** : à partir du graphique au pas de 2,5 m en ciblant la catégorie H. Sup. il est possible de voir la progression en croissance de cette classe (5 m).

**Interprétation orthophotos :**

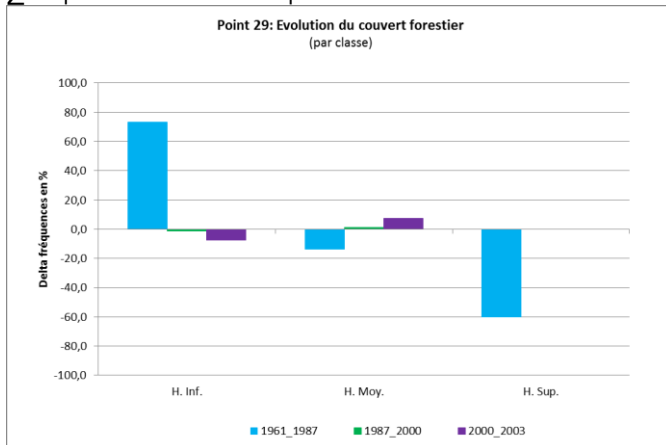
1961-1987 : pas de changement.

1987-2000 : apparition de petites trouées.

2000-2003 : pas de changement.

## Point 29

Σ fréquences de la zone tampon : 1950



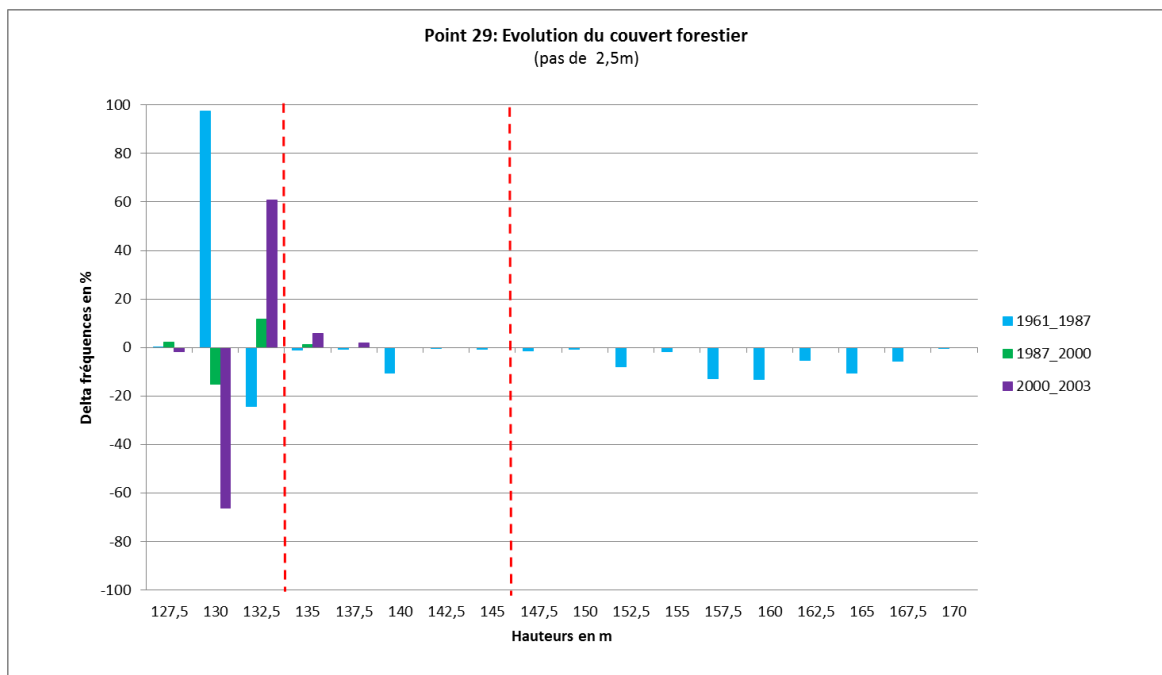
**1961-1987 :**

- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % de | H. Moy. | → **trouée profonde.**
- H. Inf. > 0 ET | H. Inf. | > 70 % de la somme des fréquences → **trouée étendue.**

**1987-2000 :** H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

**2000-2003 :** H. Inf., H. Moy. et H. Sup. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 29)				
Hauteurs en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	1431	-23	-144
130				
132,5				
135	H. Moy.	-263	23	144
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-1168	0	0
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170				



**2000-2003 :** à partir du graphique au pas de 2,5 m en ciblant la catégorie H. Inf. il est envisageable de dire qu'il se dessine un **comblement de trouée.**

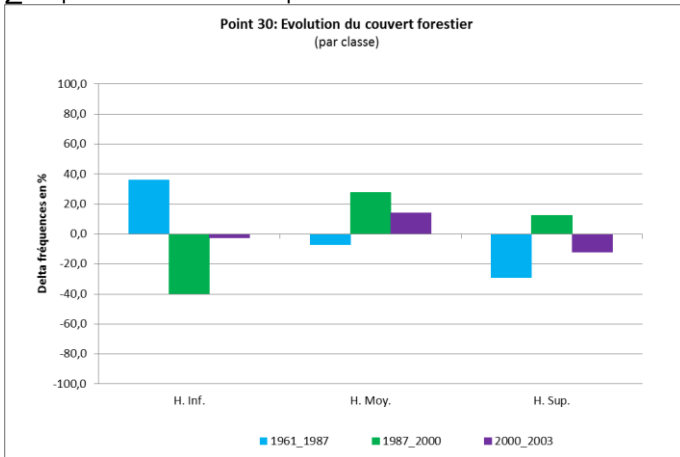
**Interprétation orthophotos :**

1961-1987 : apparition trouée.

1987-2003 : pas de changement.

Point 30

Σ fréquences de la zone tampon : 1951



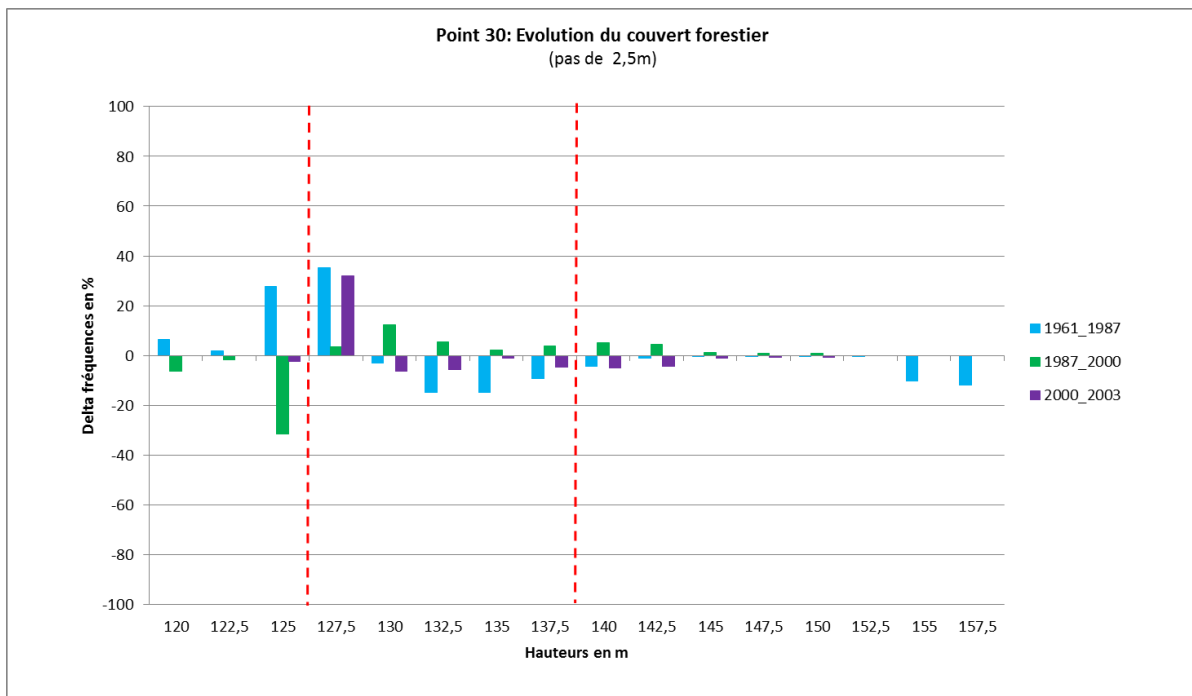
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 30)				
Hauteurs en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
120	H. Inf.	702	-778	-45
122,5				
125				
127,5	H. Moy.	-140	539	278
130				
132,5				
135				
137,5				
140	H. Sup.	-562	239	-233
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5				
155				
157,5				

**1961-1987 :**

- H. Inf. > 0 → **ouverture de trouée.**
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET | H. Sup. | > 50 % | H. Moy. | → **trouée profonde.**

**1987-2000 :** H. Inf. < 0 → **comblement de trouée.**

**2000-2003 :** H. Inf. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon, H. Moy. ≥ 0, H. Sup. < 0 avec H. Moy. ≥ | H. Sup. | → **trouée superficielle.**



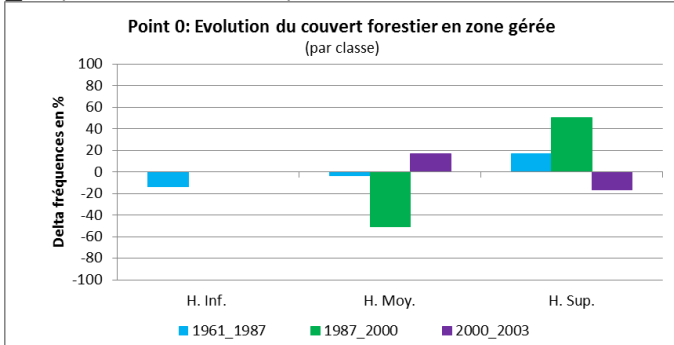
**Interprétation orthophotos :**

- 1961-1987 : apparition d'une trouée.
- 1987-2000 : croissance faible des arbres.
- 2000-2003 : trouée.

**Annexe 23- Analyse des séries temporelles centrées sur les points GNB.**

**Point 0**

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

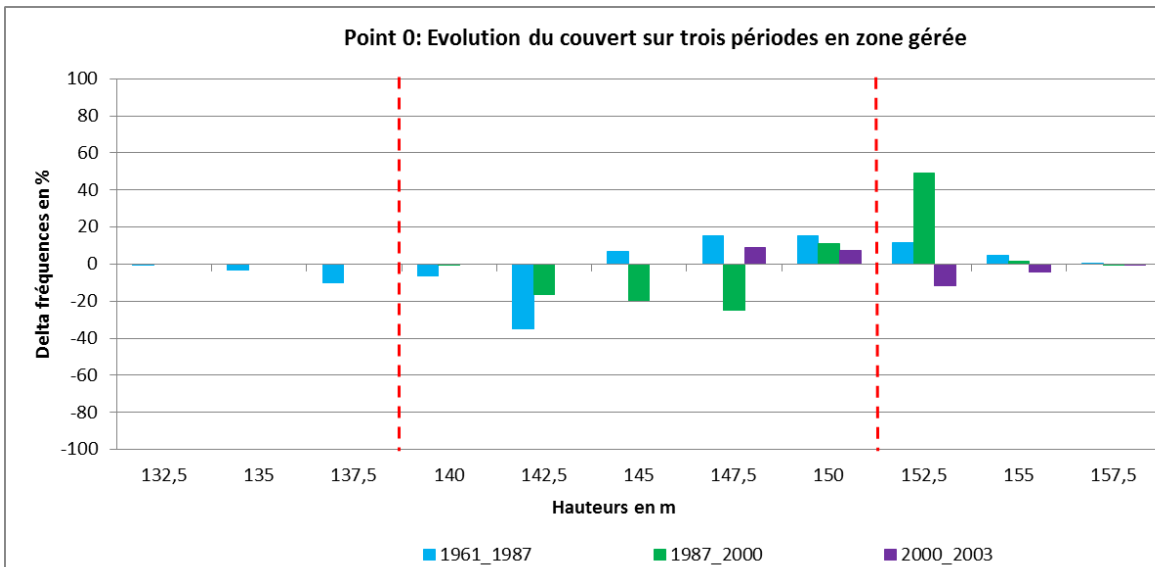


Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
132,5	H. Inf.	-268	0	0
135				
137,5				
140	H. Moy.	-70	-998	327
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5	H. Sup.	338	998	-327
155				
157,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement de trouée.**

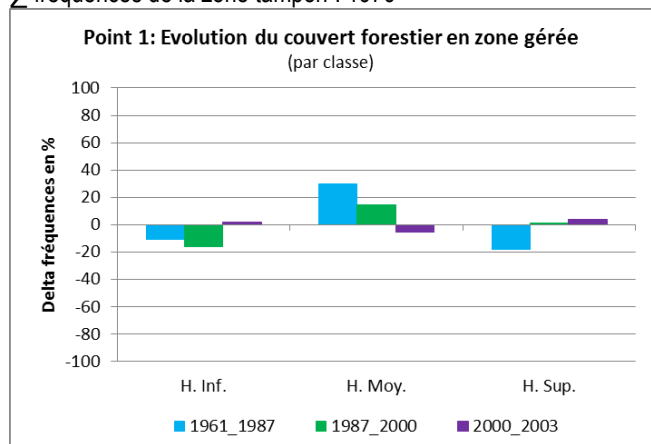
**1987-2000** : H. Inf. = 0 et H. Moy. < 0 → **comblement de trouée superficielle.**

**2000-2003** : H. Inf. = 0, H. Moy. > 0 et H. Sup. < 0 → **trouée superficielle.**



Point 1

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

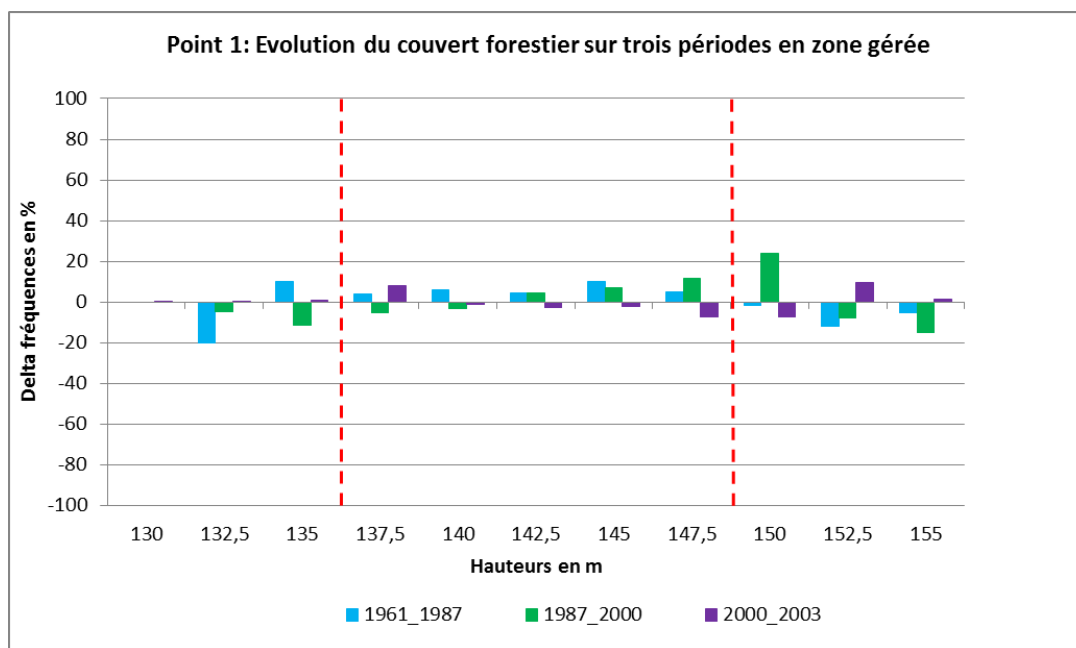


Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
130	H. Inf.	-128	-419	183
132,5				
135				
137,5	H. Moy.	479	868	-402
140				
142,5				
145				
147,5				
150	H. Sup.	-351	-449	213
152,5				
155				

1961-1987: H. Inf. = 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon et Moy. ≥ 0, H. Sup. < 0 avec H. Moy. ≥ |H. Sup.| → **trouée superficielle**.

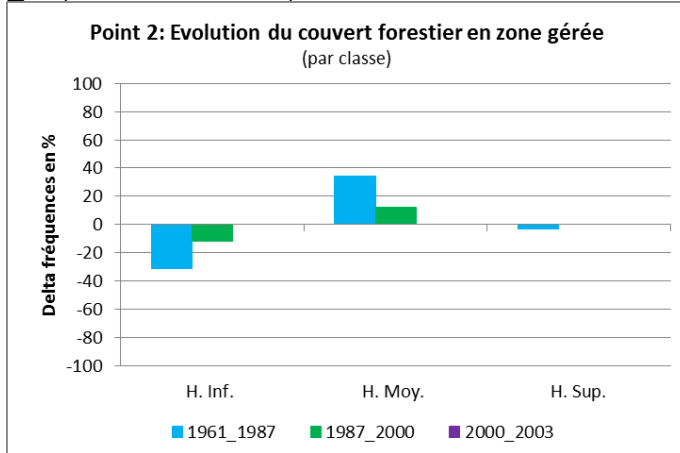
1987-2000: H. Inf. < 0 → léger **comblement de trouée**.

2000-2003: H. Inf. > 0 → ouverture trouée.



Point 2

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

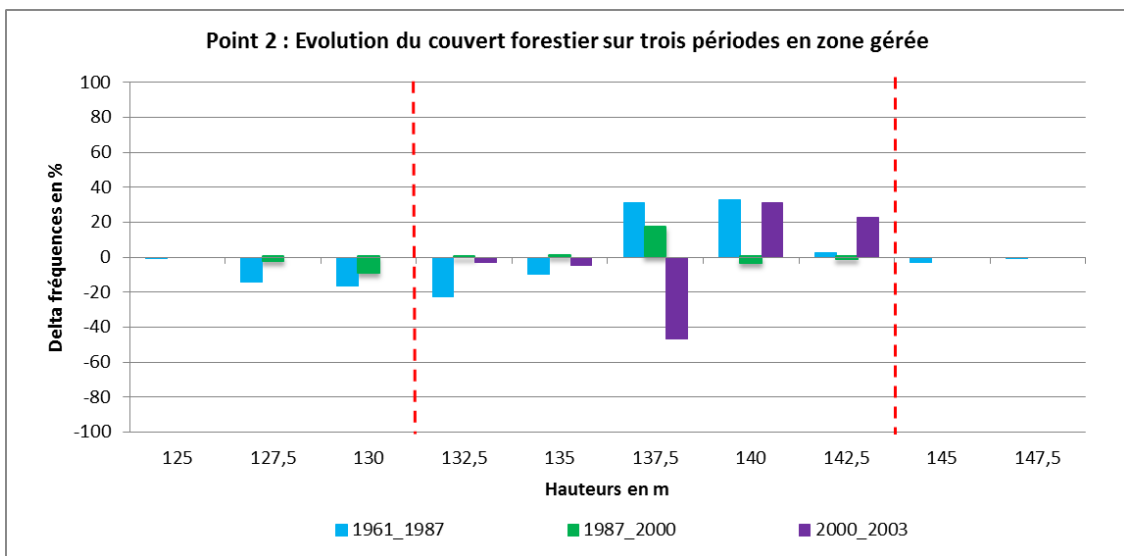


Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
125	H. Inf.	-619	-240	0
127,5				
130				
132,5	H. Moy.	683	240	0
135				
137,5				
140				
142,5				
145	H. Sup.	-64	0	0
147,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement de trouée.**

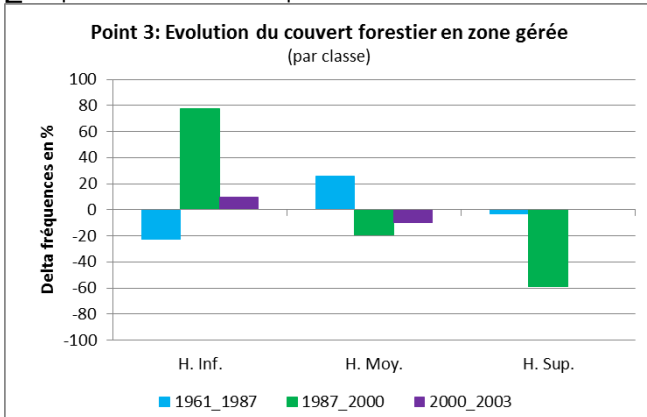
**1987-2000** : H. Inf. < 0 → **comblement de trouée.**

**2000-2003** : H. Inf., H. Moy. et H. Sup. = 0 → **absence d'évolution.**



Point 3

Σ fréquences de la zone tampon : 1976



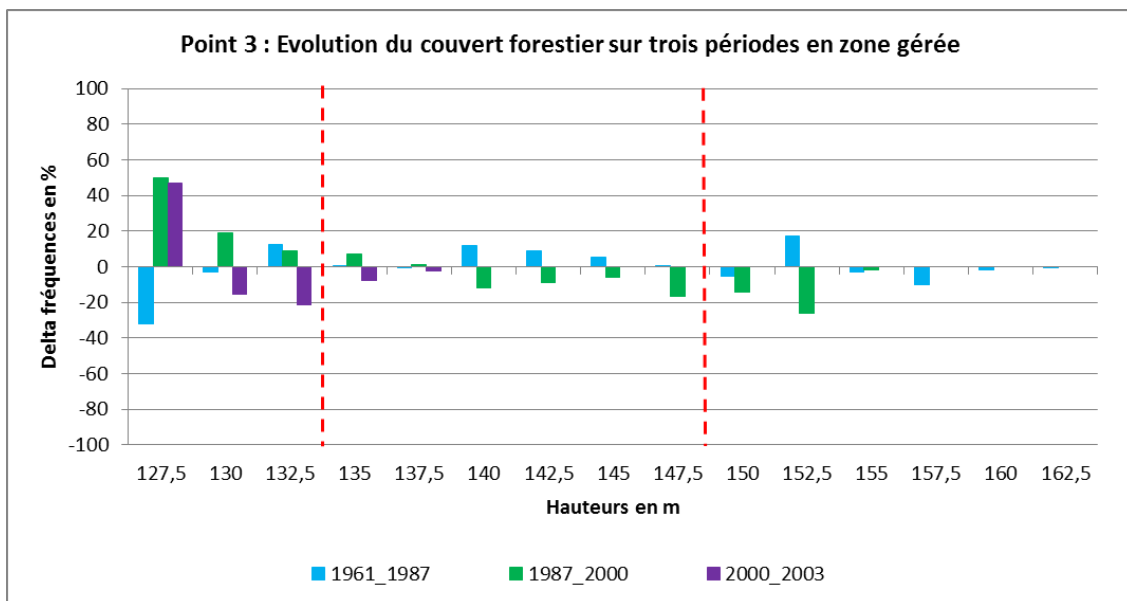
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 3)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	-447	1537	195
130				
132,5				
135	H. Moy.	509	-377	-195
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-62	-1160	0
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement de trouée.**

**1987-2000** :

- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**
- H. Inf. > 0 ET |H. Inf.| > 70 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **trouée étendue.**
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET |H. Sup.| > 50 % de |H. Moy.| → **trouée profonde.**

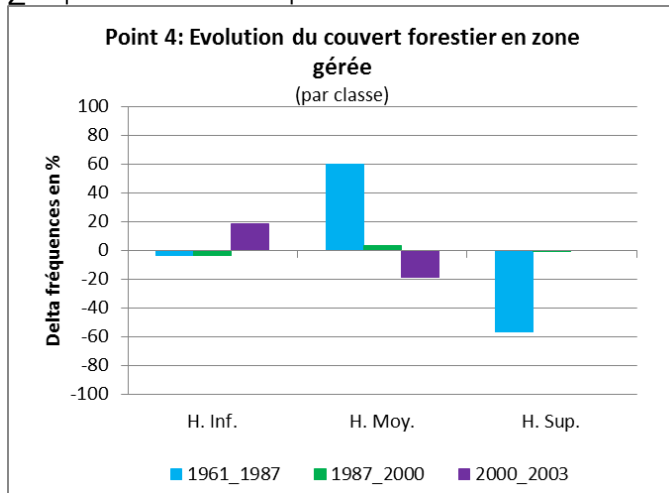
**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**





## Point 4

$\Sigma$  fréquences de la zone tampon : 1976

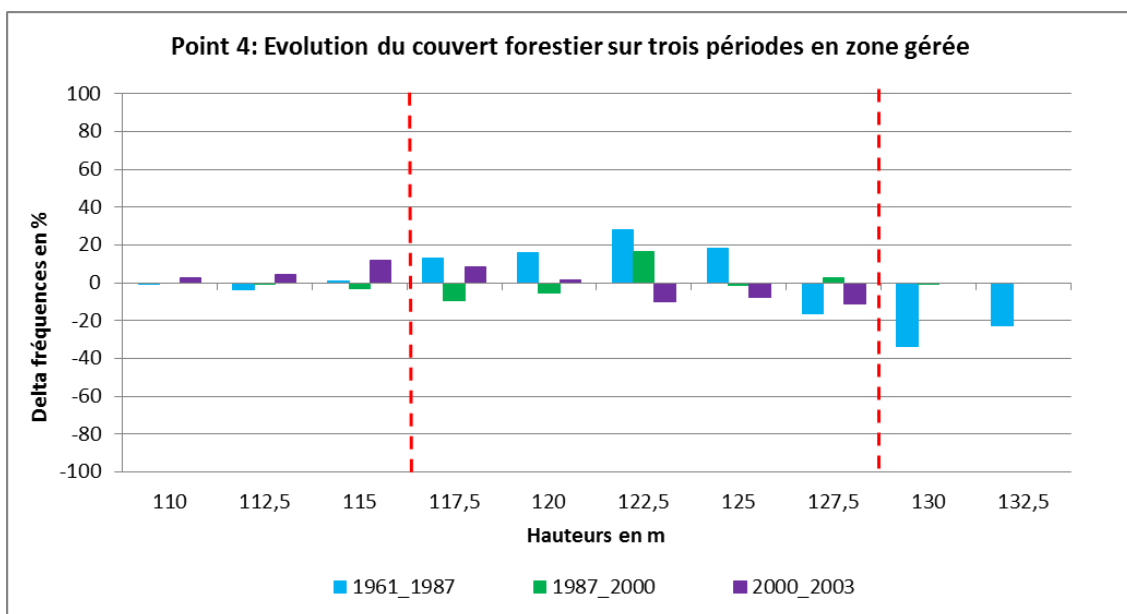


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 4)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
110	H. Inf.	-67	-62	373
112,5				
115				
117,5	H. Moy.	1178	64	-373
120				
122,5				
125				
127,5				
130	H. Sup.	-1111	-2	0
132,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0, mais  $|H. Inf. | \approx 0 \pm 10\%$  de la somme des fréquences de la zone tampon avec H. Moy.  $\geq 0$  et H. Sup.  $\leq 0$  → **trouée superficielle**.

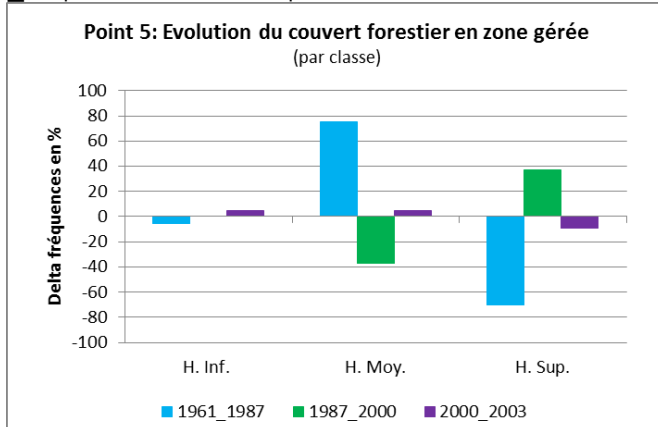
**1987-2000** : les classes  $|H. Inf. |$ ,  $|H. Moy. |$  et  $|H. Sup. | \approx 0 \pm 10\%$  de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution**.

**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.



Point 5

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

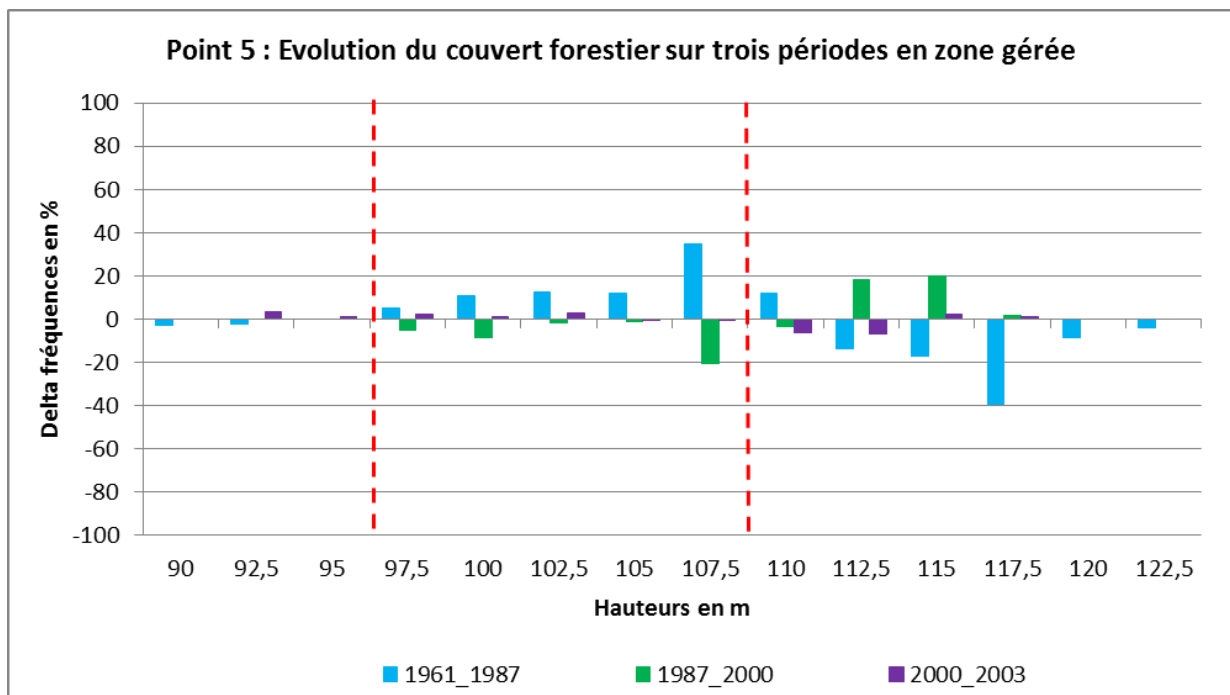


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 5)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
90	H. Inf.	-104	0	92
92,5				
95				
97,5	H. Moy.	1491	-727	97
100				
102,5				
105				
107,5				
110	H. Sup.	-1387	727	-189
112,5				
115				
117,5				
120				
122,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 mais inclus dans l'intervalle ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon avec H. Moy. ≥ 0 et H. Sup. ≤ 0 avec H. Moy. ≥ |H. Sup.| → **trouée superficielle**.

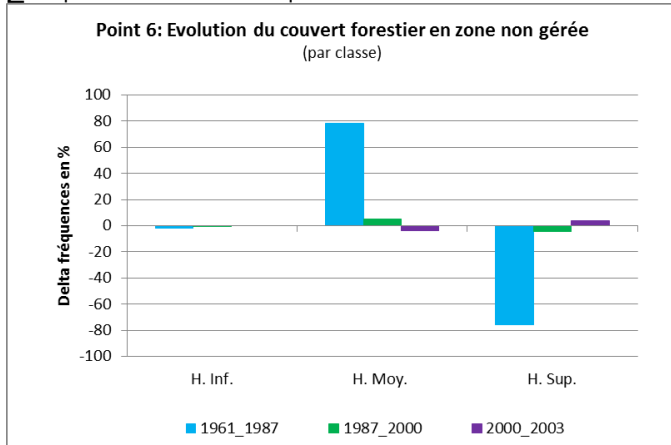
**1987-2000** : H. Inf. = 0, H. Moy. < 0 → **comblement de trouée superficielle**.

**2000-2003** : les classes |H. Inf.|, |H. Moy.| et |H. Sup.| ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution**.



Point 6

Σ fréquences de la zone tampon : 1976



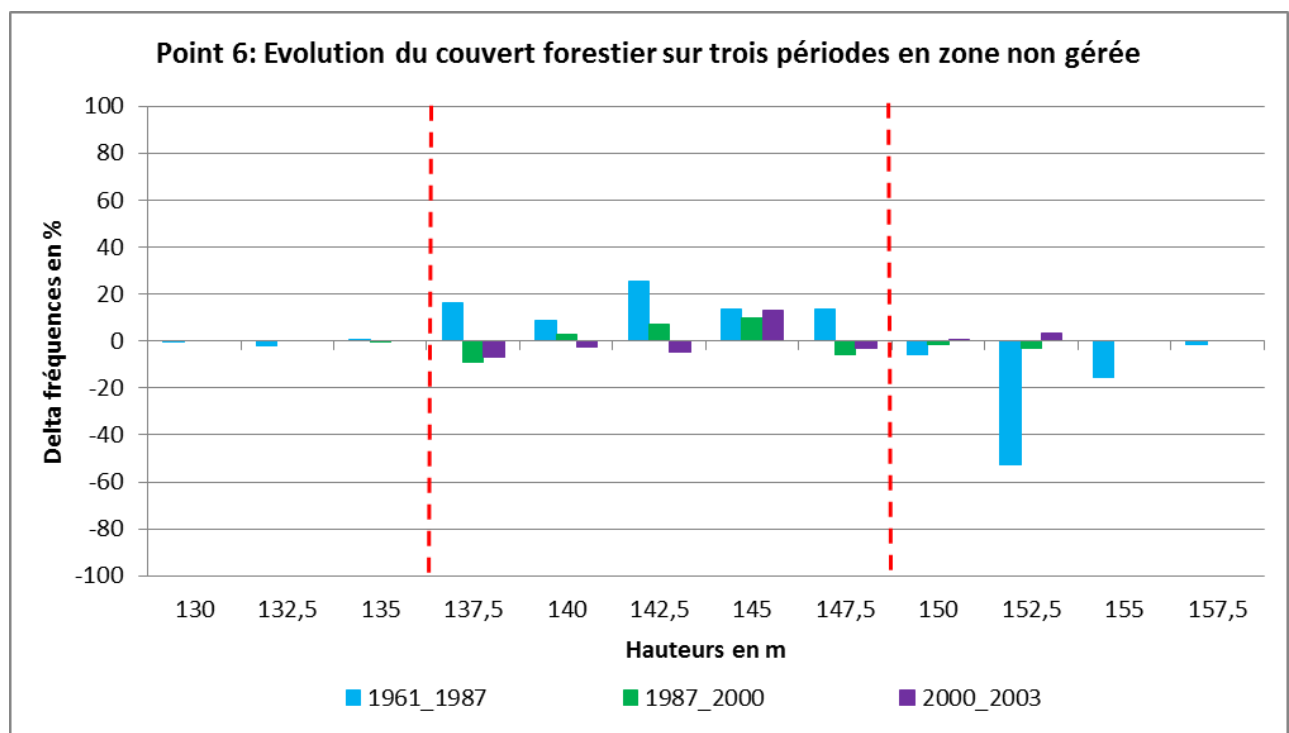
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 6)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
130	H. Inf.	-43	-8	0
132,5				
135				
137,5	H. Moy.	1541	100	-75
140				
142,5				
145				
147,5				
150	H. Sup.	-1498	-92	75
152,5				
155				
157,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 mais inclus dans l'intervalle  $\approx 0 \pm 10$

% de la somme des fréquences de la zone tampon avec de plus H. Moy.  $\geq 0$  et H. Sup.  $\leq 0$  avec H. Moy.  $\geq |H. Sup.$  |  
 → **trouée superficielle.**

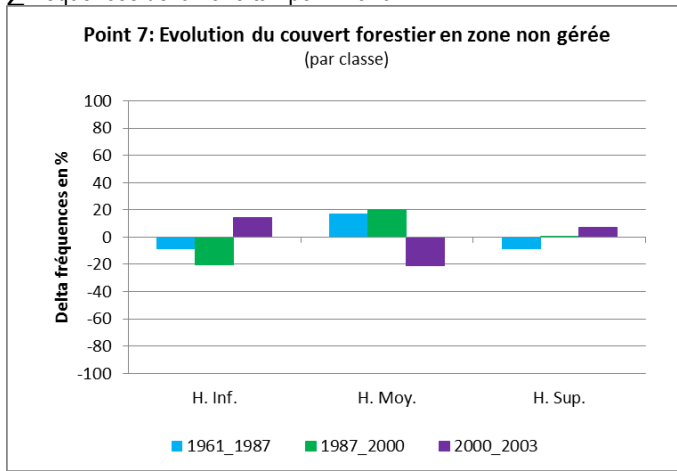
**1987-2000** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. |  $\approx 0 \pm 10$  % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

**2000-2003** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. |  $\approx 0 \pm 10$  % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



Point 7

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

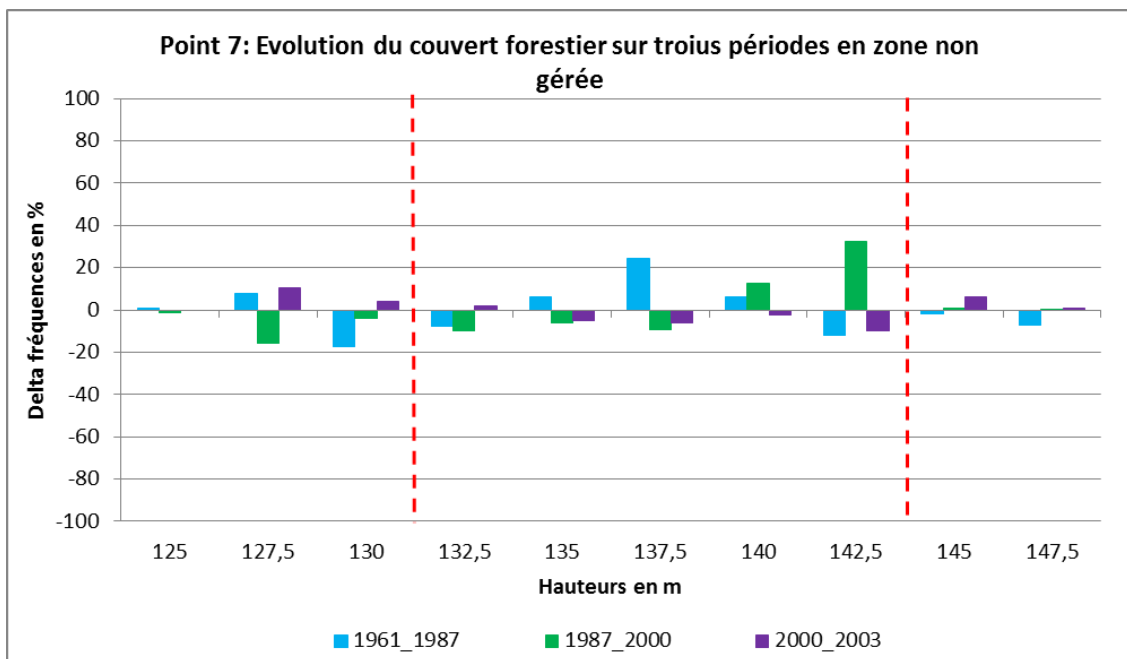


Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
125	H. Inf.	-167	-408	282
127,5				
130				
132,5	H. Moy.	339	393	-419
135				
137,5				
140				
142,5				
145	H. Sup.	-172	15	137
147,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 mais inclus dans l'intervalle ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon avec de plus H. Moy. ≥ 0 et H. Sup. ≤ 0 avec H. Moy. ≥ | H. Sup. | → **trouée superficielle**.

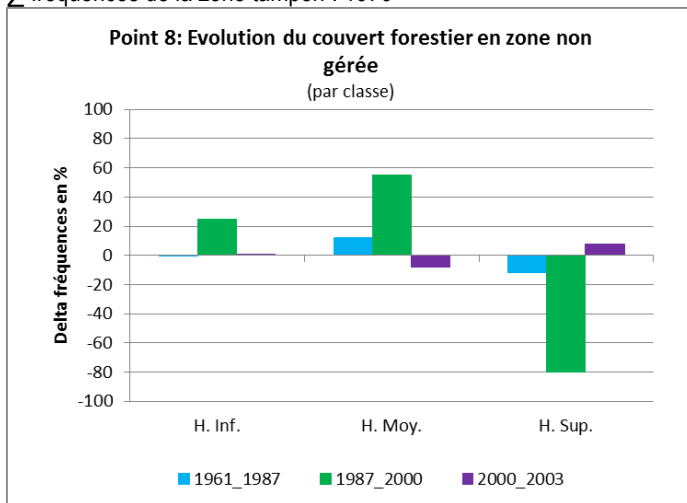
**1987-2000** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée**.

**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée**.



Point 8

Σ fréquences de la zone tampon : 1976



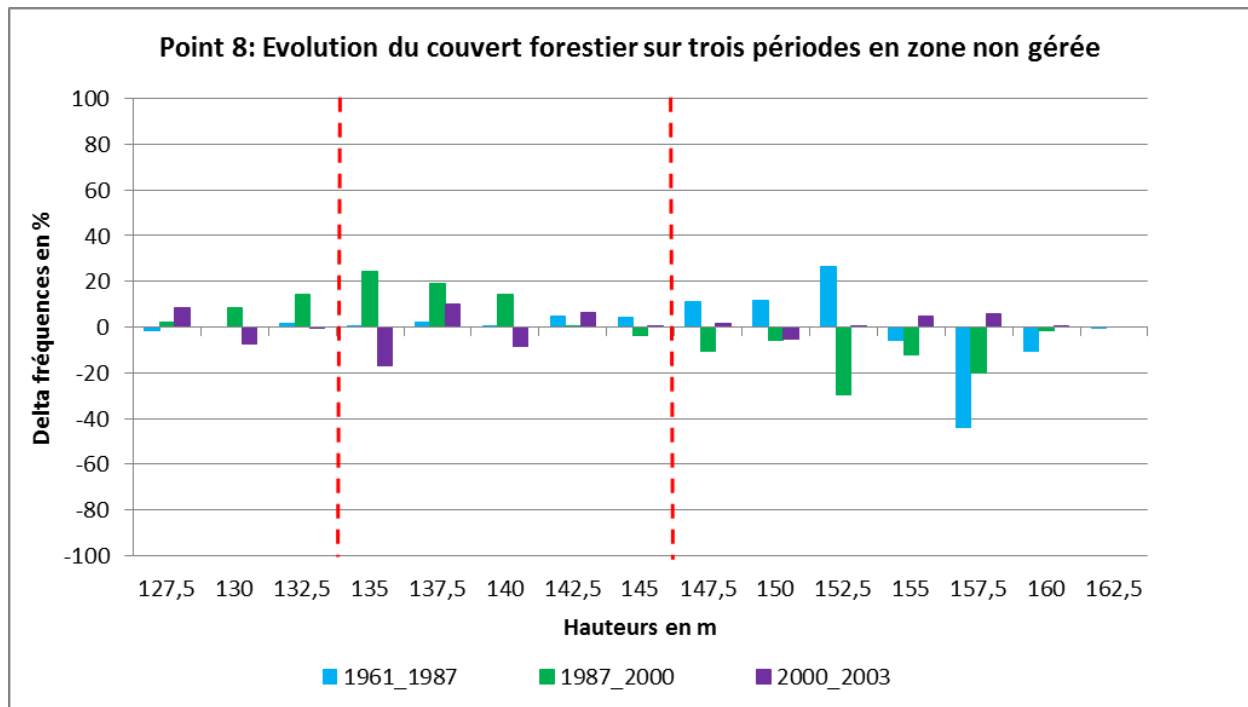
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 8)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	-4	494	12
130				
132,5				
135	H. Moy.	235	1090	-164
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-231	-1584	152
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0, mais inclus dans l'intervalle  $\approx 0 \pm 10\%$  de la somme des fréquences de la zone tampon avec de plus H. Moy.  $\geq 0$  et H. Sup.  $\leq 0$  avec H. Moy.  $\geq |H. Sup.$  → **trouée superficielle.**

**1987-2000** :

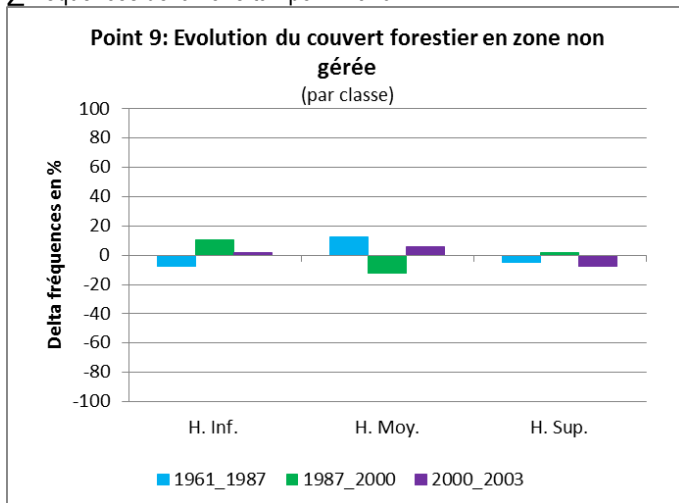
- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET  $|H. Sup.| > 50\%$  de  $|H. Moy.|$  → **trouée profonde.**

**2000-2003** : les classes |H. Inf. |, |H. Moy. | et |H. Sup. |  $\approx 0 \pm 10\%$  de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



## Point 9

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

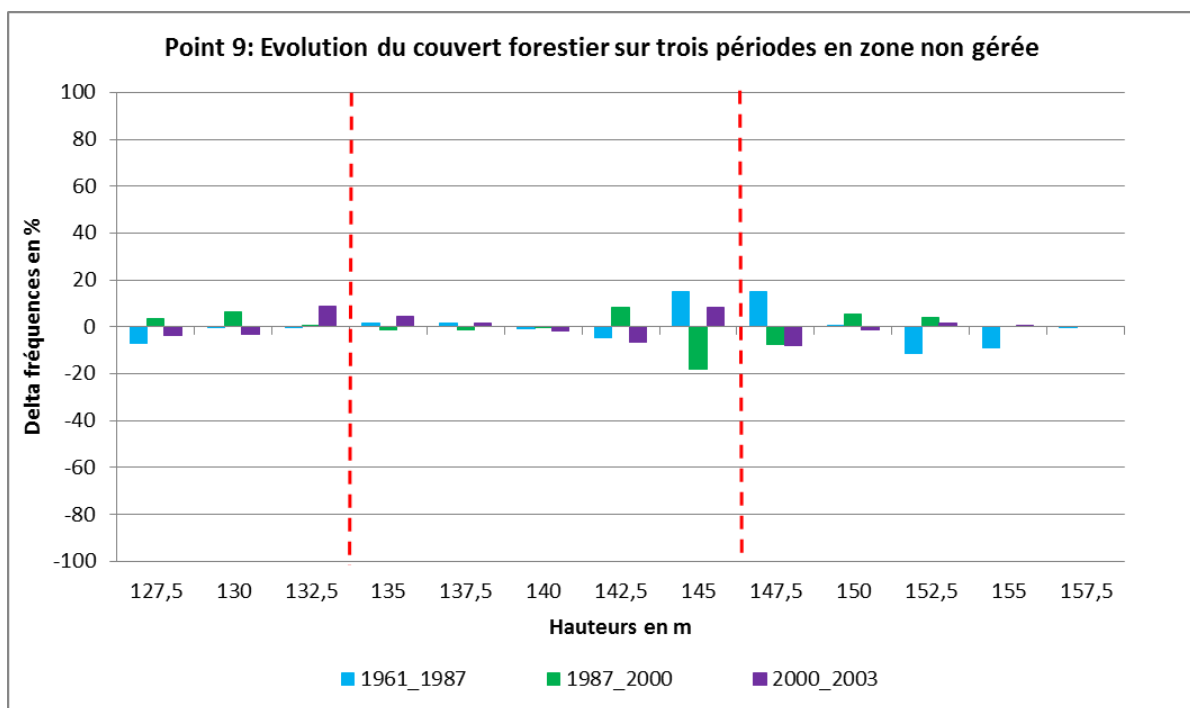


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 9)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
127,5	H. Inf.	-148	203	32
130				
132,5				
135	H. Moy.	245	-238	117
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	-97	35	-149
150				
152,5				
155				
157,5				

**1961-1987** : H. Inf.  $\approx 0$  +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon avec de plus H. Moy.  $\geq 0$  et H. Sup.  $\leq 0$  avec H. Moy.  $\geq |H. Sup.$  |  $\rightarrow$  **trouée superficielle**.

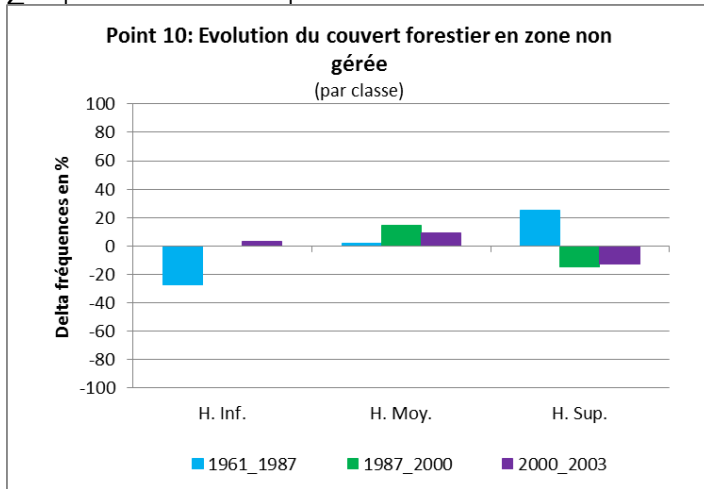
**1987-2000** : H. Inf.  $> 0 \rightarrow$  **ouverture de trouée**.

**2000-2003** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. |  $\approx 0$  +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon  $\rightarrow$  **absence d'évolution**.



Point 10

Σ fréquences de la zone tampon : 1976



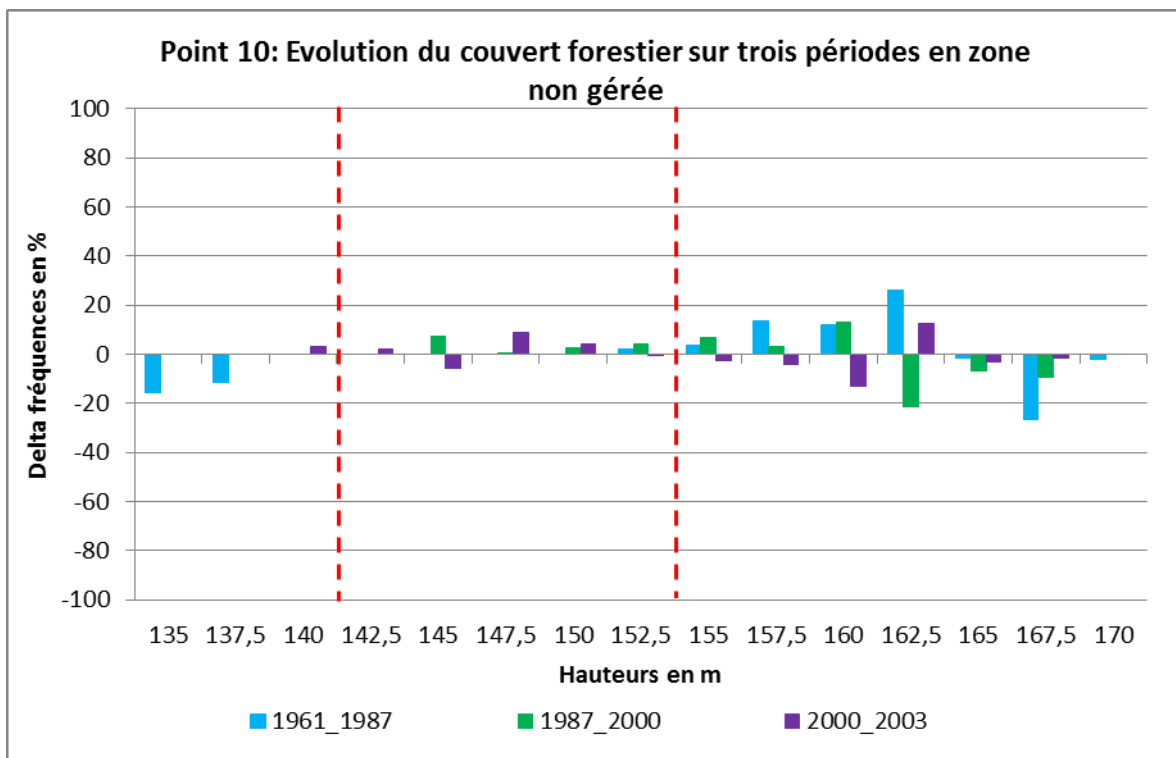
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 10)

Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
135	H. Inf.	-536	0	66
137,5				
140				
142,5	H. Moy.	43	284	184
145				
147,5				
150				
152,5				
155	H. Sup.	493	-284	-250
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

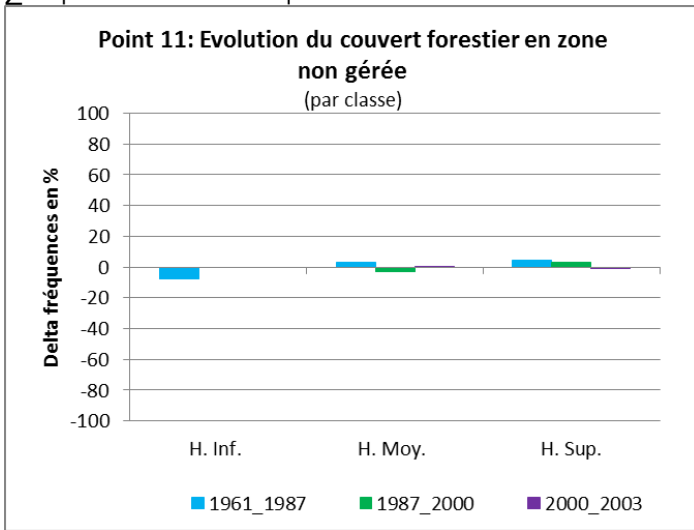
**1987-2000** : H. Inf. = 0, H. Moy. ≥ 0 et H. Sup. ≤ 0 → **trouée superficielle.**

**2000-2003** : H. Inf. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon, de plus H. Moy. ≥ 0 et H. Sup. ≤ 0 → **trouée superficielle.**



Point 11

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

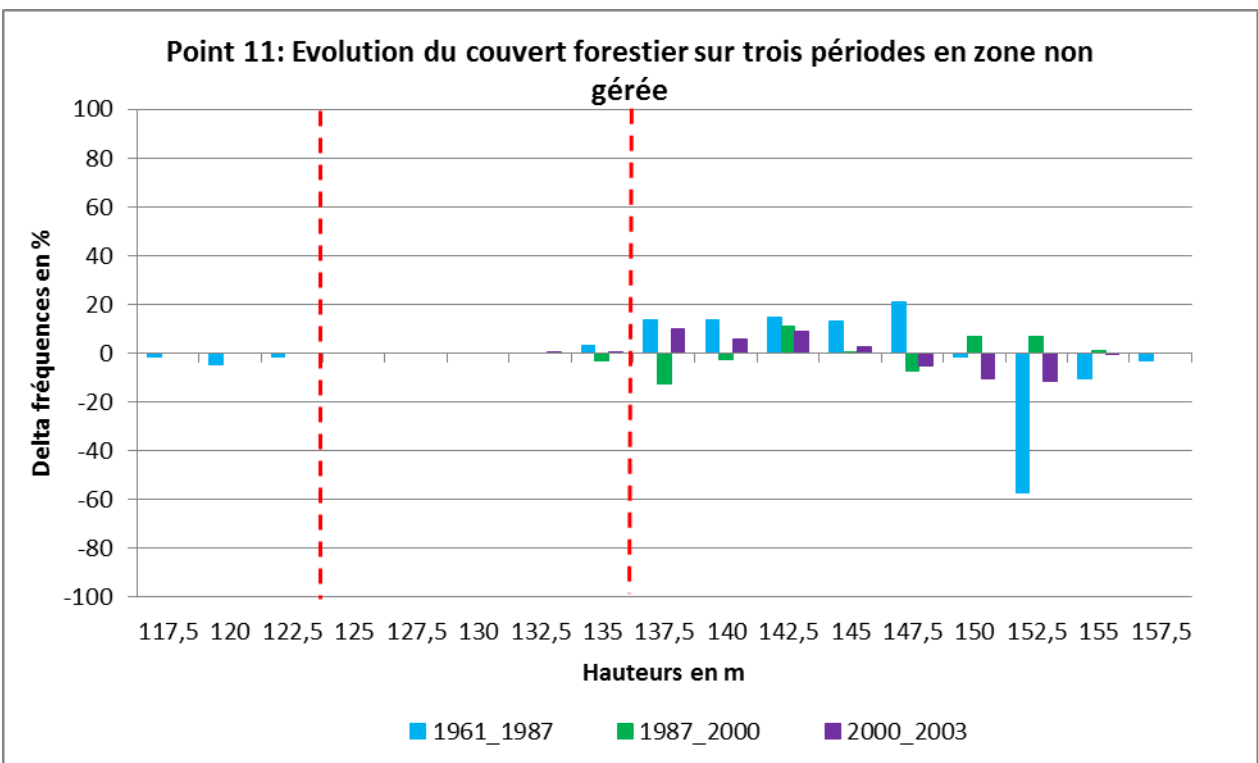


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 11)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
117,5				
120	H. Inf.	-151	0	0
122,5				
125				
127,5				
130	H. Moy.	60	-60	7
132,5				
135				
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5	H. Sup.	91	60	-7
150				
152,5				
155				
157,5				

**1961-1987** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. |  $\approx 0$  +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

**1987-2000** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. |  $\approx 0$  +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

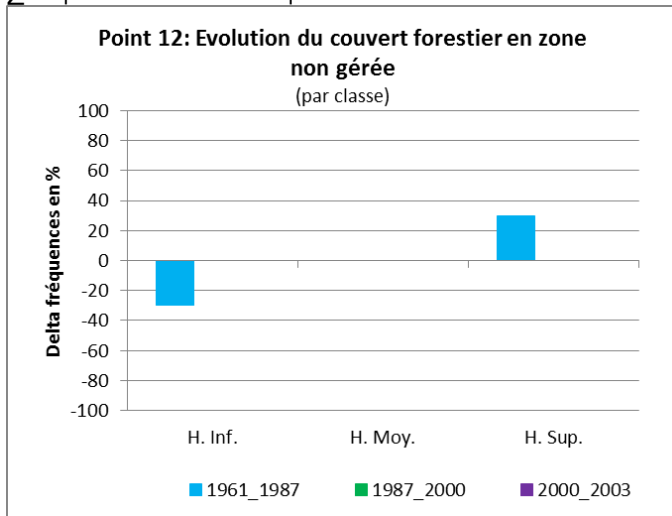
**2000-2003** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. |  $\approx 0$  +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**





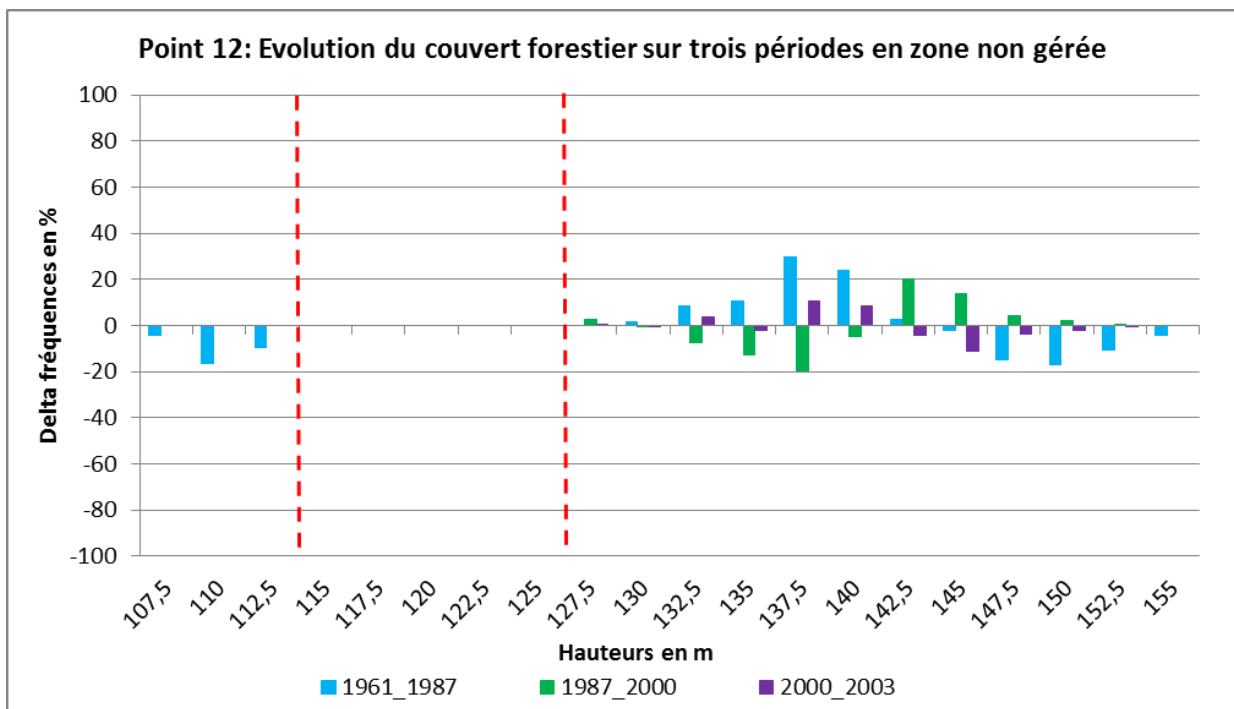
Point 12

Σ fréquences de la zone tampon : 1976



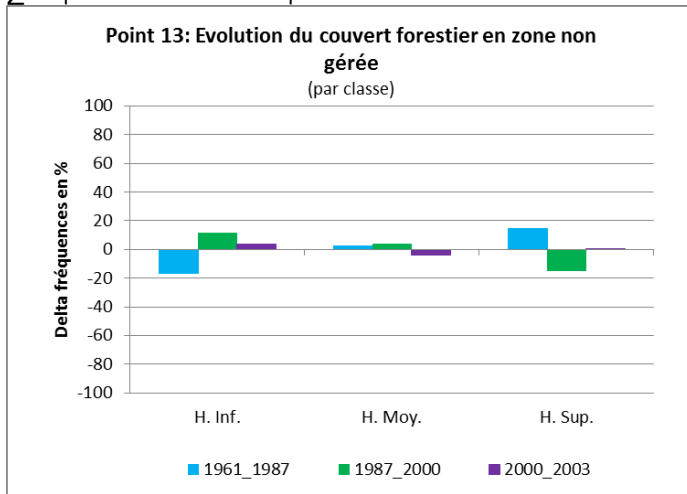
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 12)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
107,5	H. Inf.	-594	0	0
110				
112,5				
115	H. Moy.	0	0	0
117,5				
120				
122,5				
125				
127,5				
130	H. Sup.	594	0	0
132,5				
135				
137,5				
140				
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5				
155				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée**.  
**1987-2000** ; **2000-2003** : H. Inf., H.Sup. et H. Moy = 0 → **absence d'évolution**.



Point 13

Σ fréquences de la zone tampon : 1976



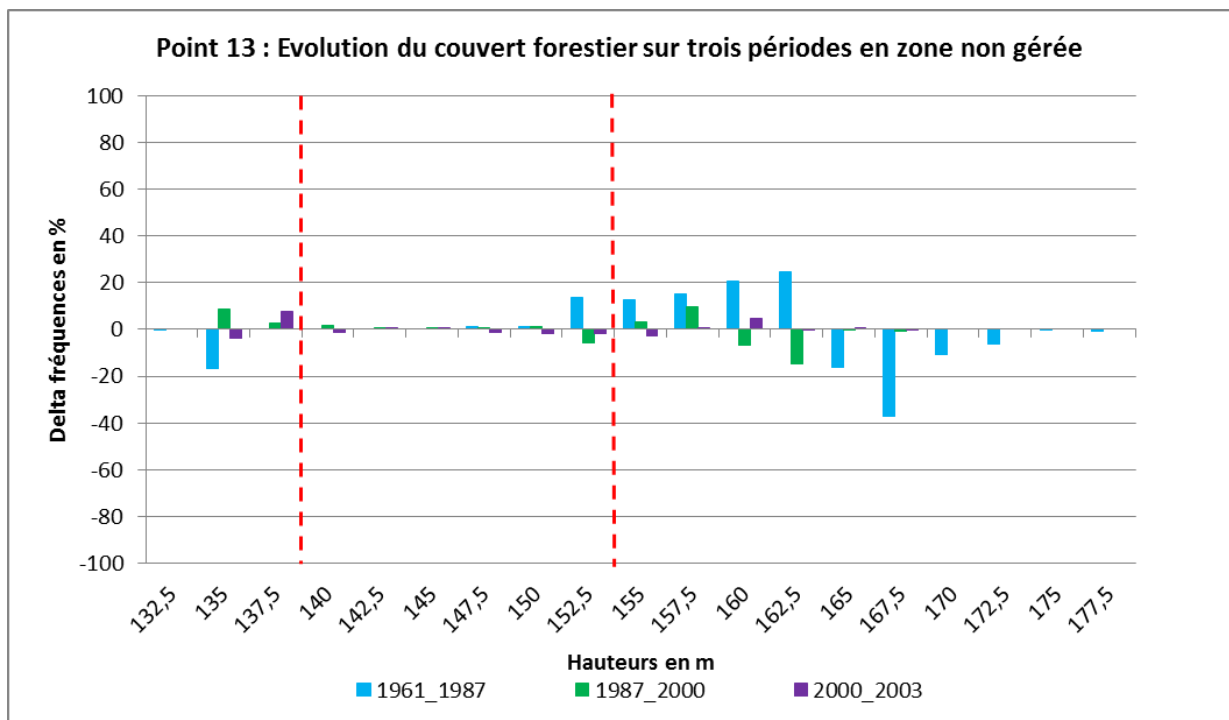
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 13)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
132,5	H. Inf.	-336	223	70
135				
137,5				
140	H. Moy.	52	72	-78
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5				
155	H. Sup.	284	-295	8
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170				
172,5				
175				
177,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

**1987-2000** :

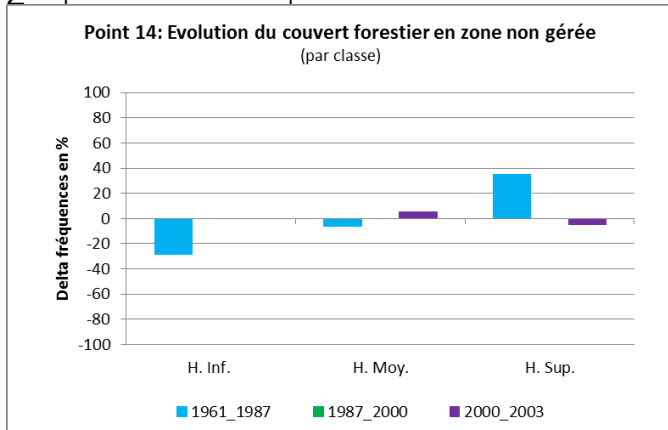
- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET |H. Sup.| > 50 % de |H. Moy.| → **trouée profonde.**

**2000-2003** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. | ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



Point 14

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

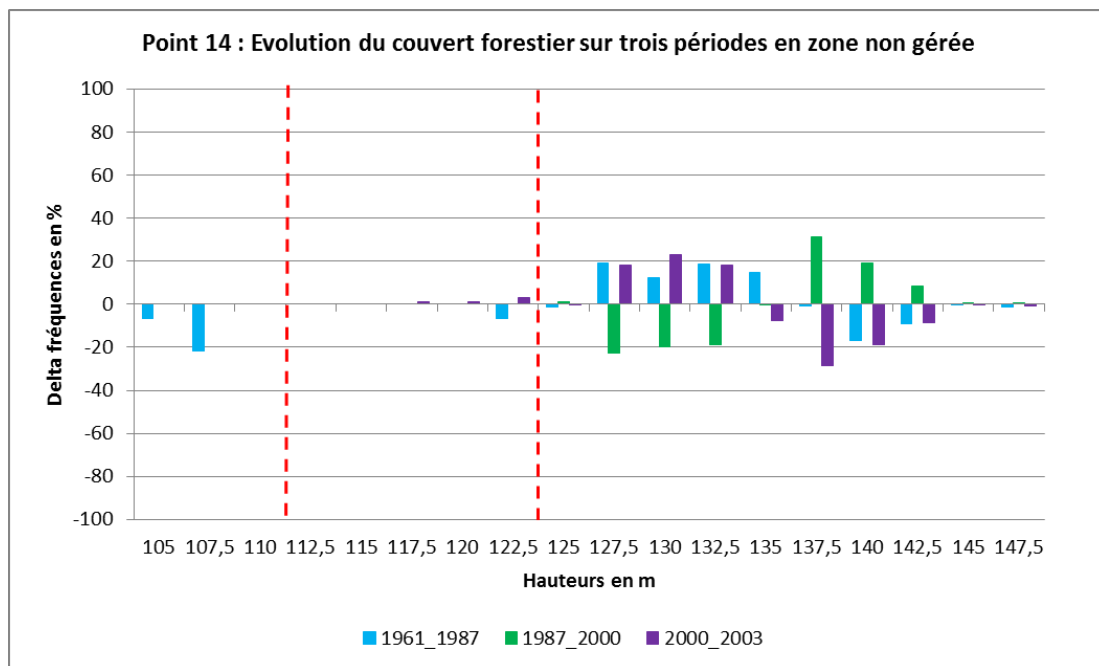


Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
105				
107,5	H. Inf.	-562	0	0
110				
112,5				
115				
117,5	H. Moy.	-127	0	102
120				
122,5				
125				
127,5				
130				
132,5				
135				
137,5	H. Sup.	689	0	-102
140				
142,5				
145				
147,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

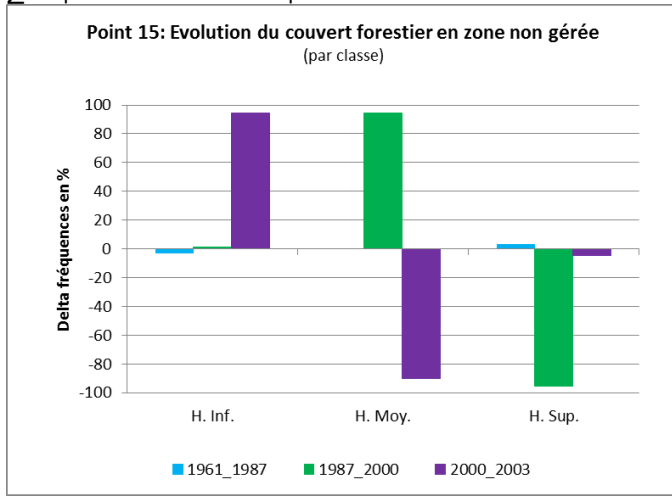
**1987-2000** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. | = 0 → **absence d'évolution.**

**2000-2003** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. | ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**



Point 15

Σ fréquences de la zone tampon : 1976



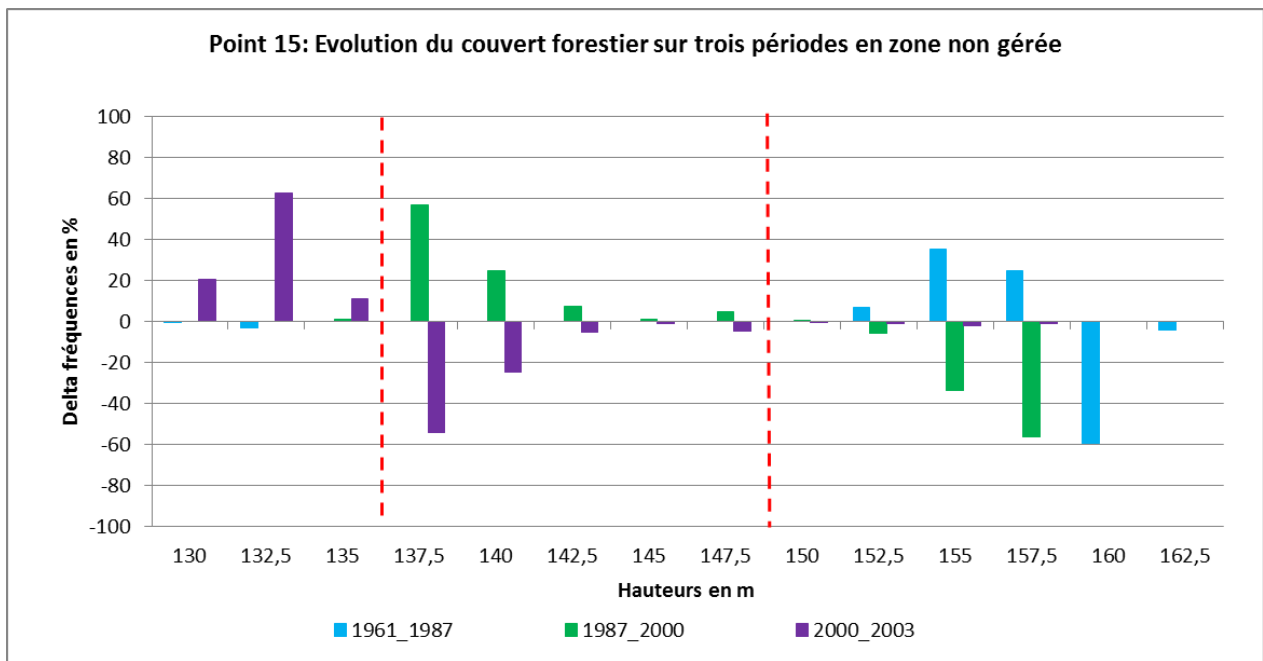
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 15)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
130	H. Inf.	-61	22	1865
132,5				
135				
137,5	H. Moy.	0	1867	-1778
140				
142,5				
145				
147,5				
150	H. Sup.	61	-1889	-87
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				

**1961-1987** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. | ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

**1987-2000** : H. Inf. ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon avec de plus H. Moy. ≥ 0 et H. Sup. ≤ 0 mais H. Moy. n'est pas strictement ≥ | H. Sup. | → toutefois la qualification de **trouée superficielle** est retenue.

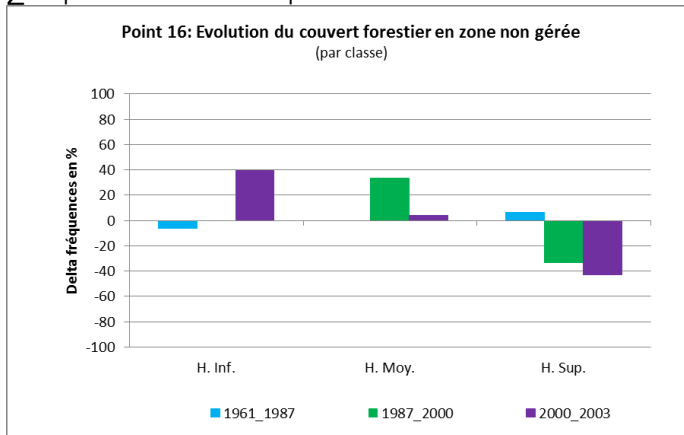
**2000-2003** :

- H. Inf. > 0 → **ouverture de trouée.**
- H. Inf. > 0 ET |H. Inf.| > 70 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **trouée étendue.**



Point 16

Σ fréquences de la zone tampon : 1976



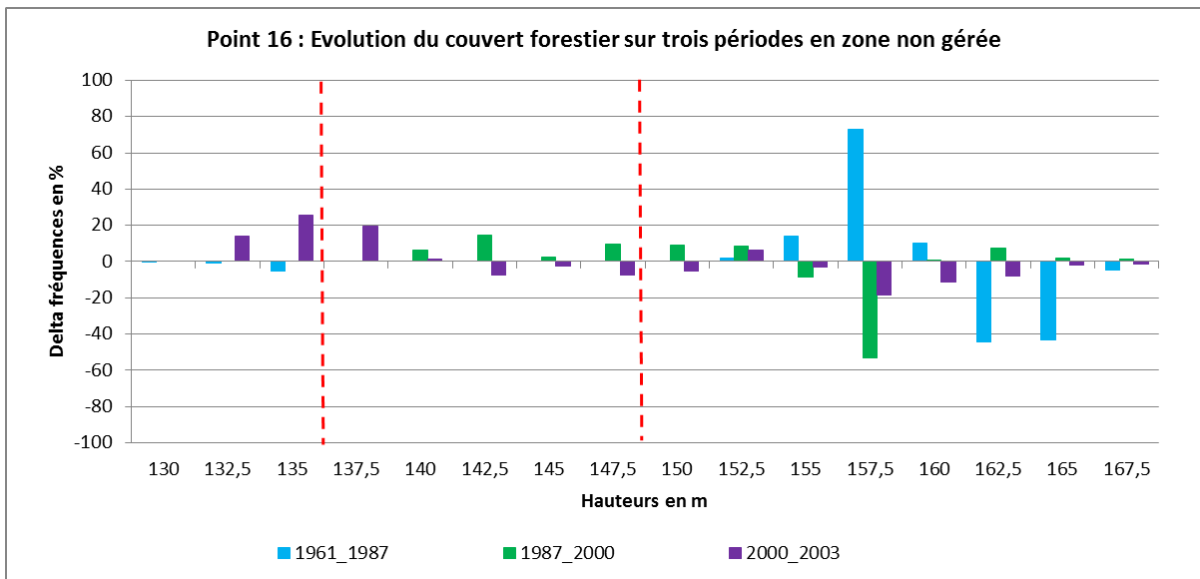
Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 16)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
130	H. Inf.	-127	0	775
132,5				
135				
137,5	H. Moy.	0	657	76
140				
142,5				
145				
147,5				
150	H. Sup.	127	-657	-851
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				

**1961-1987** : les classes | H. Inf. | , | H. Moy. | et | H. Sup. | ≈ 0 +/- 10 % de la somme des fréquences de la zone tampon → **absence d'évolution.**

**1987-2000** : H. Inf. = 0, H. Moy. ≥ 0 et H. Sup. ≤ 0 avec H. Moy. ≥ | H. Sup. | → **trouée superficielle.**

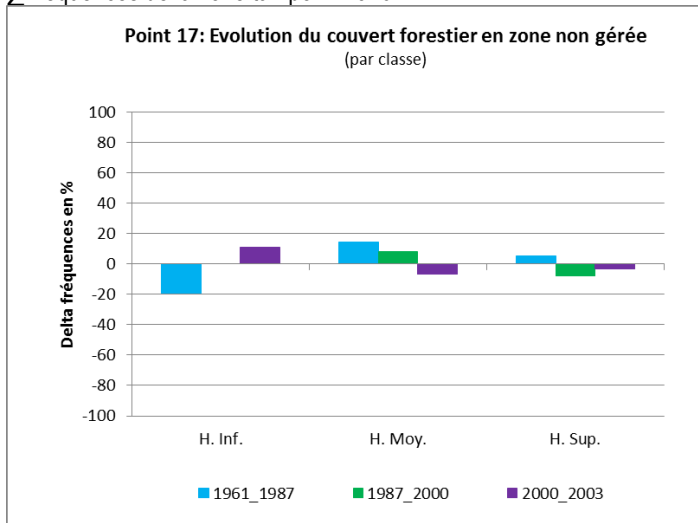
**2000-2003** :

- H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**
- H. Inf. > 0, H. Sup. < 0 ET |H. Sup.| > 50 % de |H. Moy.| → **trouée profonde.**



Point 17

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

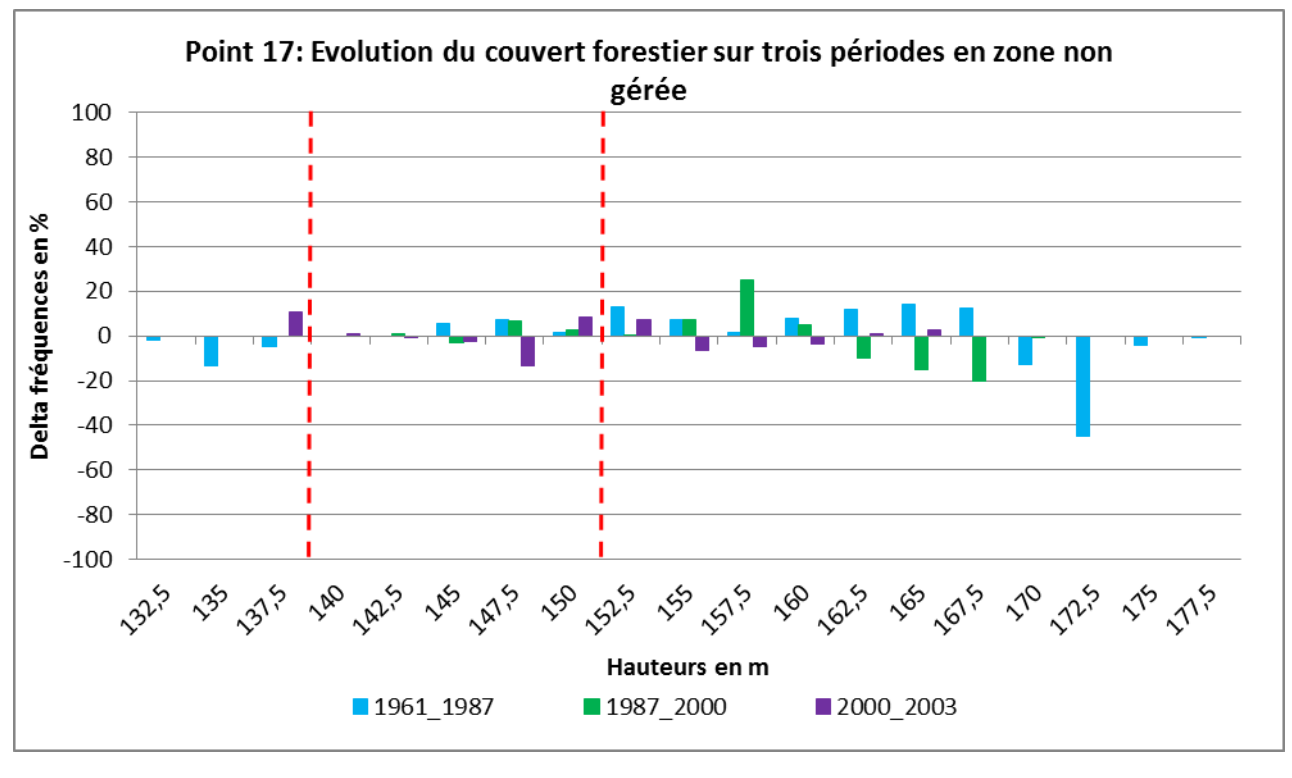


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 17)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
132,5	H. Inf.	-386	0	210
135				
137,5				
140	H. Moy.	282	154	-138
142,5				
145				
147,5				
150				
152,5	H. Sup.	104	-154	-72
155				
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170				
172,5				
175				
177,5				

**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

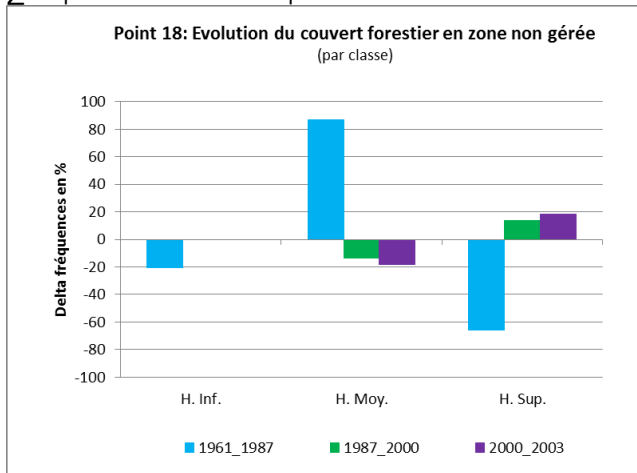
**1987-2000** : H. Inf. = 0, H. Moy. ≥ 0 et H. Sup. ≤ 0 avec H. Moy. ≥ H. Sup. → **trouée superficielle.**

**2000-2003** : H. Inf. > 0 → **ouverture trouée.**



Point 18

Σ fréquences de la zone tampon : 1976

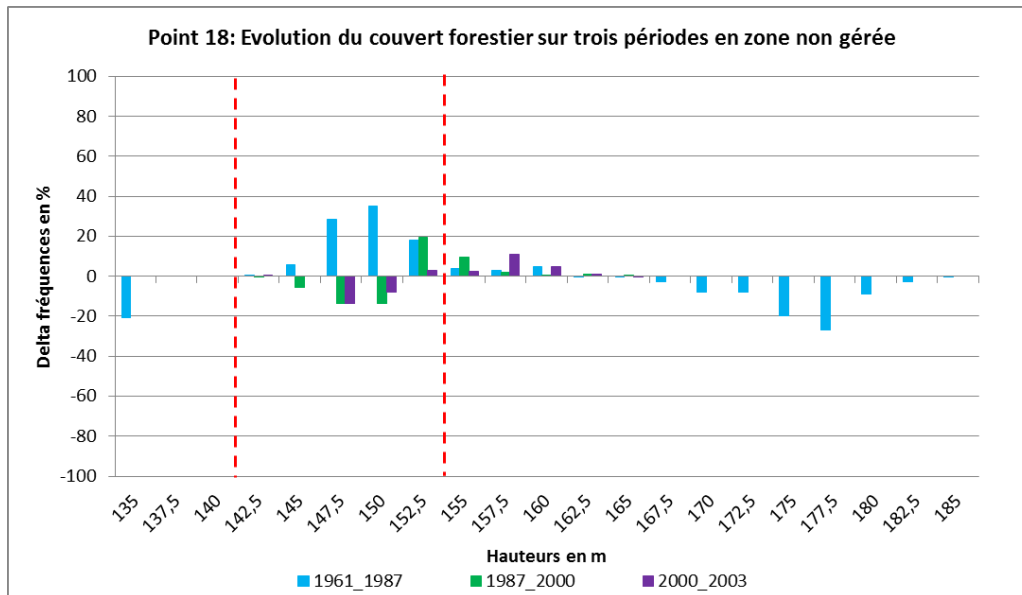


Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 18)				
Hauteur en m	Classe	1961_1987	1987_2000	2000_2003
135				
137,5	H. Inf.	-410	0	0
140				
142,5				
145				
147,5	H. Moy.	1717	-265	-362
150				
152,5				
155				
157,5				
160				
162,5				
165				
167,5				
170	H. Sup.	-1307	265	362
172,5				
175				
177,5				
180				
182,5				
185				

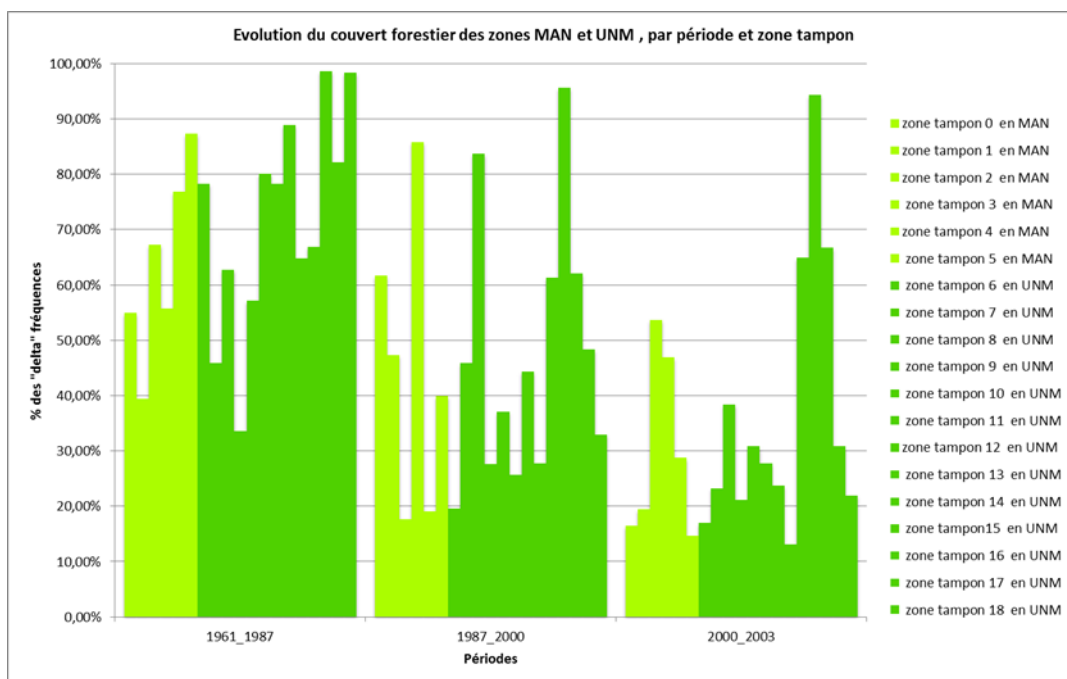
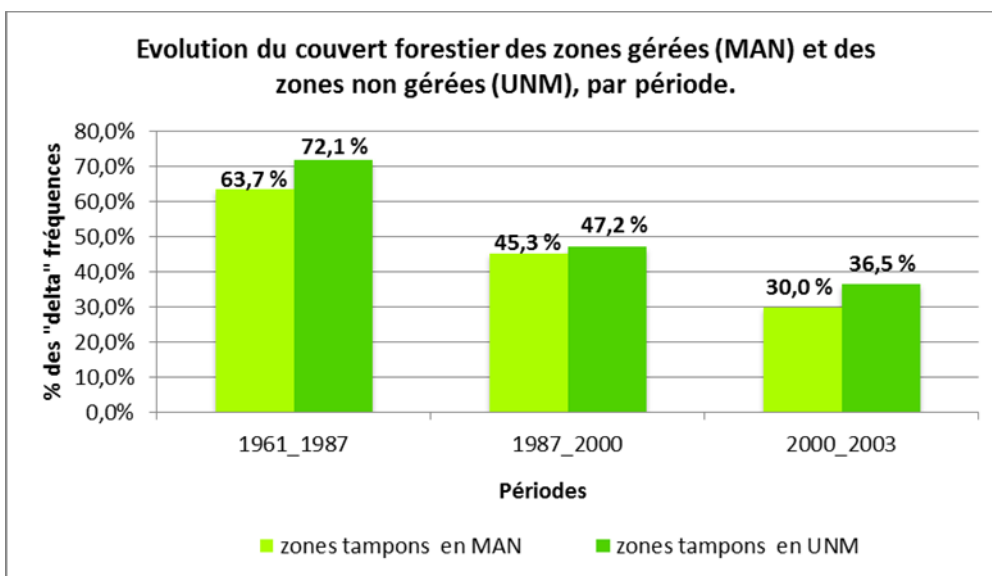
**1961-1987** : H. Inf. < 0 → **comblement trouée.**

**1987-2000** : H. Inf. = 0, H. Moy. < 0 → **comblement de trouée superficielle.**

**2000-2003** : H. Inf. = 0, H. Moy. < 0 → **comblement de trouée superficielle.**



Annexe 24- Comparaison des zones gérées et non gérées autour des points GNB.





## Annexe 25- Evolution du diamètre du houppier et de la hauteur des Chênes Sessiles en croissance libre

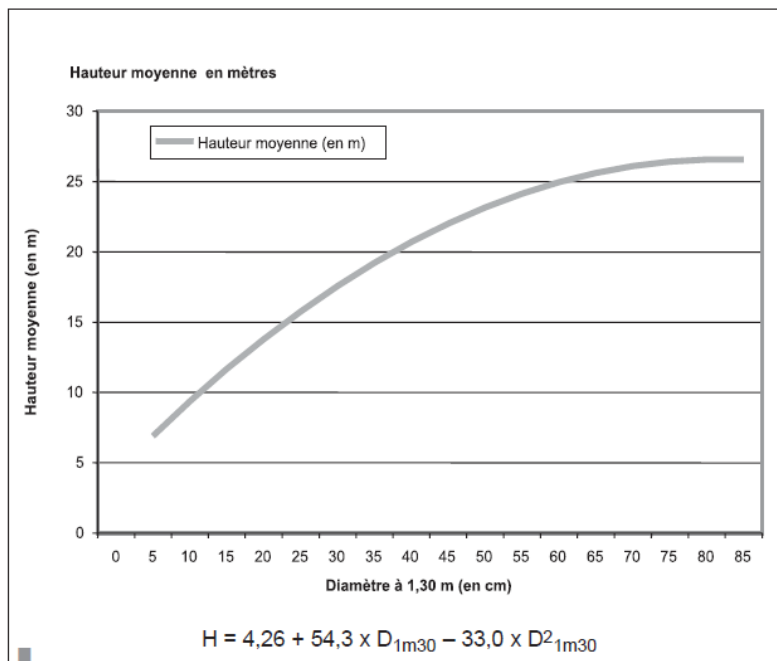


Figure F – Evolution de la hauteur moyenne en fonction du diamètre à 1,30 m des chênes sessiles en croissance libre (NEBOUT, 2006).

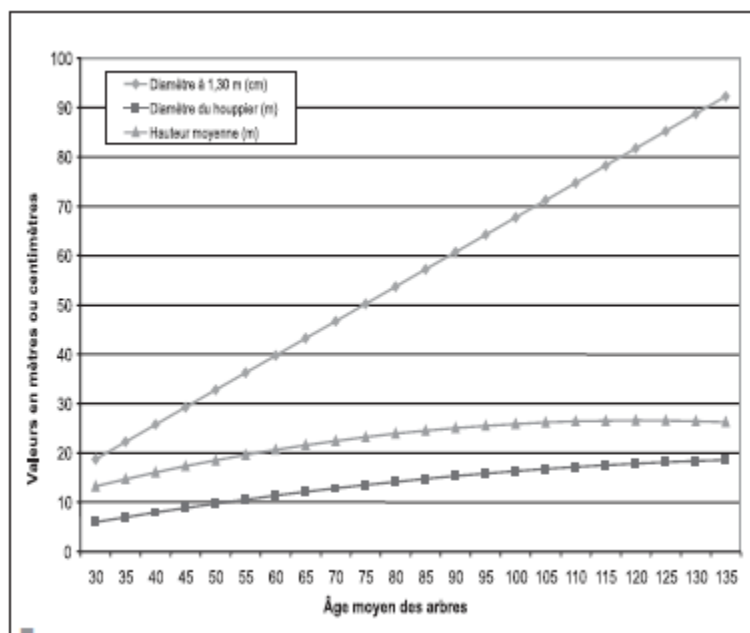


Figure G – Evolution du diamètre à 1,30 m du diamètre du houppier et de la hauteur moyenne en fonction de l'âge des chênes sessiles en croissance libre (NEBOUT, 2006).

<b>Annexe 1-</b>	<b>Bibliographie</b> .....	<b>II</b>
<b>Annexe 2-</b>	<b>Données en biodiversité : relevés de terrain et piégeages effectués</b> .....	<b>IV</b>
<b>Annexe 3-</b>	<b>Comparaison ERDAS LPS / Mic Mac d'après JOUANNE (2009)</b> .....	<b>V</b>
<b>Annexe 4-</b>	<b>Paramètres d'orientation interne</b> .....	<b>VI</b>
	Tableau A - Paramètres d'orientation interne .....	VI
<b>Annexe 5-</b>	<b>Paramètres retenus pour générer les MNS</b> .....	<b>VII</b>
<b>Annexe 6-</b>	<b>Méthode de correction des MNS.</b> .....	<b>VIII</b>
	Figure A - Passage de 32 bits à 8 bits.....	VIII
	Figure B - Identification des valeurs aberrantes sur les MNS.....	VIII
	Figure C - Correction des valeurs aberrantes (15 passages).....	IX
<b>Annexe 7-</b>	<b>Correction des zones d'ombre sur le MNS de 1961</b> .....	<b>X</b>
	Figure D - Modeler pour la correction des zones d'ombre sur MNS de 1961.....	X
<b>Annexe 8-</b>	<b>Emplacement des 31 points pour l'étude expérimentale.</b> .....	<b>XI</b>
<b>Annexe 9-</b>	<b>Exemple d'histogramme au point 0</b> .....	<b>XII</b>
<b>Annexe 10-</b>	<b>Emplacement des points GNB</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Annexe 11-</b>	<b>Zone tampon (0,2 ha) autour des 31 points</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Annexe 12-</b>	<b>Table attributaire de 1987 pour les 31 points</b> .....	<b>XV</b>
<b>Annexe 13-</b>	<b>Etat d'avancement du projet et diagramme de GANTT.</b> .....	<b>XVII</b>
	Tableau B - Ecart entre objectifs de départ et livrables .....	XIX
<b>Annexe 14-</b>	<b>Différents essais réalisés pour la génération du MNS de 1949</b> .....	<b>XXI</b>
	Tableau C- Coordonnées marques fiduciaires. ....	XXI
<b>Annexe 15-</b>	<b>MNS obtenus suite aux différents essais sur les photos de 1949</b> .....	<b>XXII</b>
<b>Annexe 16-</b>	<b>Emplacement des points pour comparer les deux versions d'ERDAS</b> .....	<b>XXV</b>
<b>Annexe 17-</b>	<b>Guide méthodologique de génération de Modèles Numériques de Surface sous ERDAS LPS 2011.</b>	<b>XXVI</b>
<b>Annexe 18-</b>	<b>Étapes pour cibler et enregistrer les valeurs des MNS sur chaque zone tampon étudiée</b> .....	<b>XXXV</b>
<b>Annexe 19-</b>	<b>Exemple de script sous le logiciel R.</b> .....	<b>XXXVI</b>
<b>Annexe 20-</b>	<b>Courbe de croissance en hauteur</b> .....	<b>XXXIX</b>
	Figure E - Evolution de la hauteur dominante du chêne sessile.....	XXXIX
<b>Annexe 21-</b>	<b>Situations spécifiques pour l'élaboration des règles de décision</b> .....	<b>XL</b>
	Graphique A –Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 8). ....	XL
	Tableau D - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 0).....	XL
	Graphique B - Evolution du couvert forestier au pas de 2,5 m (point 8). ....	XLI
	Graphique C - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 31). ....	XLII
	Tableau E - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 31).....	XLII
	Graphique D - Evolution du couvert au pas de 2.5m (point 31).....	XLII
	Graphique E - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 21). ....	XLIII
	Tableau F - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 21) .....	XLIII
	Graphique F - Evolution du couvert forestier au pas de 2,5 m (point 21).....	XLIII
	Graphique G - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 14). ....	XLIV
	Tableau G - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 14) .....	XLIV
	Graphique H- Evolution du couvert au pas de 2,5 m (point 14).....	XLIV
	Graphique I - Evolution du couvert forestier par classe de hauteurs (point 7).....	XLV
	Tableau H - Différentiels de fréquences par classe de hauteurs (point 7).....	XLV

<b>Annexe 22-</b>	<b>Analyse des différences d’histogrammes à partir de points positionnés manuellement. ....</b>	<b>XLVI</b>
<b>Annexe 23-</b>	<b>Analyse des séries temporelles centrées sur les points GNB.....</b>	<b>LXXII</b>
<b>Annexe 24-</b>	<b>Comparaison des zones gérées et non gérées autour des points GNB.....</b>	<b>XCI</b>
<b>Annexe 25-</b>	<b>Evolution du diamètre du houppier et de la hauteur des Chênes Sessiles en croissance libre</b>	<b>XCII</b>
	Figure F –Evolution de la hauteur moyenne en fonction du diamètre à 1,30 m des chênes sessiles en croissance libre (NEBOUT, 2006).....	XCII
	Figure G – Evolution du diamètre à 1,30 m du diamètre du houppier et de la hauteur moyenne en fonction de l’âge des chênes sessiles en croissance libre (NEBOUT, 2006).....	XCII