



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

MASTER FAGE  
Biologie et Ecologie pour la Forêt, l'Agronomie et  
l'Environnement

Spécialité  
Fonctionnement et gestion des Ecosystèmes

**Allongement annuel du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de  
l'Erable (*Acer pseudoplatanus* L.) en fonction de différentes  
quantités de lumière dans la forêt primaire Badin (Slovaquie)**

Mária HAVAŠOVÁ

Mémoire de stage, soutenu à Nancy le 07/09/2011

*Maître de stage :* Prof. Ing. Milan SANIGA, DrSc.

*Tuteur universitaire :* Bruno FERRY, Enseignant-chercheur MC  
AgroParisTech

*Structure d'accueil :*

Département de sylviculture  
Faculté de Foresterie  
Université Technique de Zvolen

Ul. T. G. Masaryka 24  
960 53 Zvolen  
Slovenská republika



## **REMERCIEMENTS :**

Je tiens à remercier tout particulièrement mon maître de stage, Prof. Ing. Milan SANIGA, DrSc. pour m'avoir admise en stage dans le cadre de sa recherche sur les forêts primaires en Slovaquie. Je voudrais également remercier le consultant principale, Ing. Stanislav KUCBEL, PhD. pour les nombreuses consultations effectuées, ses conseils et sa patience lors de nos entretiens. Pour les analyses statistiques je souhaite remercier Ing. Benjamin JARCUSKA, PhD. et spécialement mes collègues Lucka et Lenka. Je remercie aussi les autres collègues qui m'ont aidé pendant les travaux de terrain, tout particulièrement pour leur accueil chaleureux. Je remercie également mon tuteur universitaire Bruno FERRY pour ses remarques et son encouragement ainsi que mademoiselle Mathilde BESSON pour les moments agréables passés à Zvolen et la relecture du texte.

## **ABBREVIATIONS**

### **Organismes :**

TU Zvolen : Université Technique de Zvolen (Technická univerzita vo Zvolene)

IUFRO : Union internationale des instituts de recherches forestières

PROSILVA : Association de forestiers réunis pour promouvoir une sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature (SICPN).

KPL : Département de sylviculture (Katedra pestovania lesa)

APVV : Agence de science et de recherche

### **Variables :**

ISF : indirect site factor : radiations solaires diffusées

DSF : direct site factor : radiations solaires directes

Openness = ouverture de la canopée : proportion des ouvertures dans la voûte (établit à partir des photographies hémisphériques)

Microsite : répartition des incréments suivant les valeurs médianes de DSF et ISF

Subparcelle : partie de transect de taille 1×1 m

# SOMMAIRE

1	Présentation de l'organisme de l'accueil .....	1
1.1	Missions confiées : .....	1
2	Etude bibliographique .....	2
2.1	Définitions des termes.....	2
2.2	Stades d'évolution des forêts primaires en Europe Centrale.....	2
2.3	Trouées forestières.....	3
2.4	Lumière dans le peuplement et son influence à la régénération naturelle .....	4
2.5	Objectifs poursuivis .....	5
3	Méthodologie.....	6
3.1	Caractéristiques de lieu de recherche .....	6
3.2	Parcelles de recherche.....	7
3.3	Allongement de la tige réduit de la régénération naturelle.....	7
3.4	Création des photographies hémisphériques .....	8
3.5	Traitement statistique des données.....	9
4	Résultats et discussion.....	11
4.1	Caractéristique des trouées forestières (gaps).....	11
4.1.1	Incrément en hauteur réduit (ihR).....	11
4.1.2	Distribution de la lumière dans les trouées forestières.....	12
4.1.3	Relation entre les radiations directes, indirectes et l'ouverture de voûte.....	13
4.2	relation entre l'allongement de la tige et la quantité de radiations solaires.....	13
4.2.1	Effet des radiations solaires sur l'allongement de tige sur les différents microsites.....	15
4.3	Comparaison de la quantité de lumières en fonction des points cardinaux d'une trouée .....	17
4.4	Rapport entre l'incrément en hauteur et l'orientation du transect.....	18
5	Conclusion .....	21
5.1	Caractéristique de la régénération naturelle et répartition de la lumière dans une trouée .....	21
5.2	Relation entre l'incrément en hauteur et la quantité de radiations incidentes .....	21
5.3	quantité de lumière suivant l'orientation du transect.....	22

5.4 Taille de l'incrément suivant l'orientation du transect .....	22
6 Bibliographie .....	23
7 Annexe.....	25

# 1 PRESENTATION DE L'ORGANISME DE L'ACCUEIL

En Slovaquie, la forêt couvre plus que 40 % de surface du territoire (31.12.2009)<sup>1</sup>, d'où vient la nécessité de bien s'occuper de la richesse de ce pays. La Faculté forestière<sup>2</sup> de l'Université technique de Zvolen a été fondée pour former les futurs sylviculteurs d'origine slovaque et étrangers en formation de Foresterie, Management et financement des entreprises forestiers, Ecologie de forêt, Zoologie appliqué et la vénerie. La Faculté forestière fait partie d'organisations comme IUFRO (International Union of Forest Research Organizations) et PRO SILVA Association de forestiers réunis pour promouvoir une sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature (SICPN). Elle propose la formation en Licence, Masteur et Doctoral. Le Département de sylviculture<sup>3</sup> propose l'enseignement des métiers La dendrologie forestière, Sylviculture, Sylviculture proche de nature, l'analyse de sylviculture, Dendrologie de paysage. Le département de sylviculture se consacre à la recherche de graineterie, aux méthodes progressives de plantation du matériel planté, étudie les espèces rares des plantes ligneuses, des forêts naturelles et les méthodes d'optimisation des technologies de boisement selon les différentes fonctions de forêt. Depuis longtemps, les recherches entreprises dans ce service se concentrent sur la structure et les processus de croissance en forêts naturelles et semi-naturelles de Slovaquie. Ses connaissances sont par la suite appliquées aux propositions de modèles de plantation du peuplement avec différentes fonctions.

La recherche sur l'influence des radiations solaires directes et indirectes sur la croissance annuelle verticale des deux espèces des ligneux fait partie de la recherche nationale APVV (Agentúra pre vedu a výskum; Agence de science et de recherche) n°0286-10. Ce projet, mis en place depuis le 1 mai 2011, est surnommé « Structure et régime de perturbations dans les forêts primaires sélectionnées en Slovaquie (Structure and disturbance regime of selected old-growth forests in Slovakia). Le but principal de cette recherche est d'analyser la structure en épaisseur de peuplement suivant les stades de développement, la reconnaissance de la taille des trouées forestières et leurs origines. Mais cela permet également de décrire la structure de la régénération naturelle dans les forêts primaires que ce soit pour le hêtre ou l'épicéa, qui se différencient de leur environnement.

## 1.1 MISSIONS CONFIEES :

Plusieurs missions m'ont été confiées tout au long de mon stage :

- Les mesures de terrain; détermination des espèces d'arbres rencontrés; mesure de leurs hauteurs et l'allongement de la tige principale
- La visualisation des trouées forestières, prise des photographies hémisphériques
- Les analyses statistiques des données, relever l'influence de la lumière sur la croissance de semences de hêtre et d'érable; répartition de lumière dans une trouée forestière

---

<sup>1</sup>[http://www.forestportal.sk/forestportal/lesne\\_hospodarstvo/info\\_o\\_lesoch/zakladne\\_informacie/vymera\\_slovensko/vymera\\_slovensko.html](http://www.forestportal.sk/forestportal/lesne_hospodarstvo/info_o_lesoch/zakladne_informacie/vymera_slovensko/vymera_slovensko.html) (téléchargé le 27/04/2011)

<sup>2</sup>[http://www.tuzvo.sk/sk/organizacna\\_struktura/lesnicka\\_fakulta/o\\_fakulte/profil/profil.html](http://www.tuzvo.sk/sk/organizacna_struktura/lesnicka_fakulta/o_fakulte/profil/profil.html)

<sup>3</sup>[http://www.tuzvo.sk/sk/organizacna\\_struktura/lesnicka\\_fakulta/organizacne\\_clenenie/katedry/katedra\\_pestovania\\_lesa/profil\\_katedry/profil\\_katedry.html](http://www.tuzvo.sk/sk/organizacna_struktura/lesnicka_fakulta/organizacne_clenenie/katedry/katedra_pestovania_lesa/profil_katedry/profil_katedry.html)

## 2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### 2.1 DEFINITIONS DES TERMES

Même à notre époque nous n'arrivons pas à unifier la terminologie concernant les forêts primaires. Les divers termes nomment l'influence différente de l'homme sur les forêts. La forêt primaire (Korpel, 1989), forêt qui n'a subis aucune destruction humaine, représente la forme la plus conservée de forêt naturelle, par sa composition floristique et faunistique qui correspond aux potentialités naturelles du milieu, et qui se renouvellent exclusivement par des processus sylvigénétiques autonomes. La forêt secondaire d'après Mayer (1980, Greslier, 1995) est une forêt issue d'une dynamique de végétation secondaire, qui s'est développée après destruction d'origine humaine de la forêt préexistante. Celui-ci définit également la forêt naturelle comme une forêt primaire dont la composition, la structure et les êtres vivants ont été soustraits à l'action de l'homme, exception faite d'un prélèvement par cueillette et d'une pression de chasse très légère. Sa pérennité est assurée par la régénération naturelle à partir des semenciers en place. La définition de forêt subnaturelle (semi-naturelle) provenant de même auteur peut être primaire ou secondaire mais surtout porte la trace de l'homme. Les interventions humaines n'ont pas modifié directement ou indirectement la composition ou la structure des peuplements. La forêt a donc été peu influencée par l'homme ou abandonnée par lui depuis longtemps.

### 2.2 STADES D'EVOLUTION DES FORETS PRIMAIRES EN EUROPE CENTRALE

La vie de forêt primaire existe en interaction en cycle intégrale entre tous les composants de l'environnement. Grâce à ce phénomène la forêt peut exister même sur les sites très pauvres. Au contraire, une perturbation d'une de ses parties peut provoquer un affaiblissement de tout l'écosystème. Dans la forêt naturelle il est possible de distinguer deux cycles d'évolution (Korpel, 1989) ou de transformations de forêt (Otto, 1998):

- Cycle d'évolution à long terme
- Cycle d'évolution à court terme

Pendant la transformation de la forêt à long terme (Annexe, Figure 15), la forêt se régénère après une catastrophe naturelle (incendie, tempête etc.) ou artificielle et se développe alors sur le sol vierge. La terre est colonisée par les plantes pionnières, puis les buissons apparaissent. Les premiers arbres héliophytes poussent (*Sorbus*, *Betula*, *Salix caprea* etc.) et forment la forêt pionnière et puis la forêt intermédiaire. A l'abri sous ces différentes espèces, les plantes sciophytes trouvent les meilleures conditions propices à leur développement (*Fagus*, *Quercus*,...). Ceux-ci vont finalement évincer les espèces héliophytes et vont créer la forêt terminale ou une communauté climacique

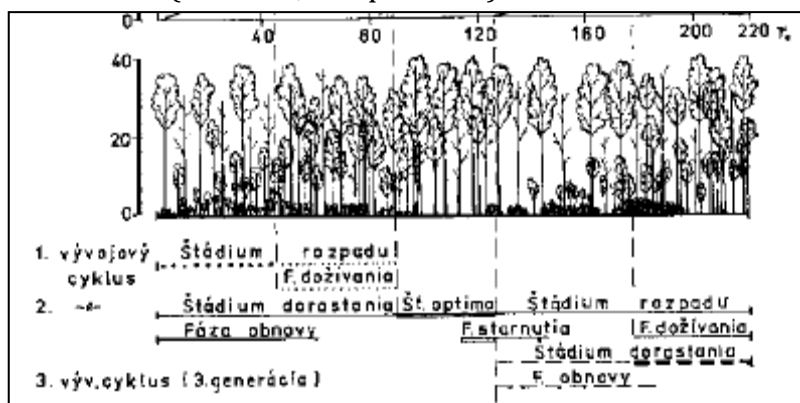


Figure 1: Cycle de développement en forêt climacique (Korpel, 1992)



(Otto, 1998). Cette communauté vit en équilibre avec son environnement. La restitution des ligneux dans la forêt terminale (Figure 1) est effectuée par le cycle d'évolution à court terme, répartis en 3 stades : stade d'aggradation, stade optimal et stade de désagrégation, qui sont eux-mêmes divisés en phases d'évolution. Le stade d'aggradation est caractérisé par la différenciation importante du diamètre des arbres, de leurs tailles et de leur distribution spatiale, par petite mortalité des arbres appartenant à la couche supérieure une trouée est créée quand un arbre meurt. A la fin de ce stade, les arbres atteignent à peu près la même hauteur qui est caractéristique du stade optimale. Il est donc possible d'y distinguer deux phases : structure cathédrale (création d'une seule couche, plus grande quantité d'approvisionnement) et phase de vieillissement (début de mortalité des plus vieux arbres). Si la quantité d'arbres mourant devient plus marquante nous entrons dans le stade de désagrégation. Approvisionnement en bois diminue, mais les trouées forestières créées par les arbres morts améliorent la pénétration de lumière dans le peuplement, ainsi la régénération naturelle, poussée en avance, a la possibilité de se développer. La surface des zones de stades d'évolutions est environ 0,10 ha et les fluctuations d'approvisionnement pendant le cycle à court terme sont, en forêt primaire de hêtre, au maximum de 30% (Korpel, 1989).

## 2.3 TROUEES FORESTIERES

La régénération naturelle des plantes ligneuses est, dans une forêt climacique, assurée par la présence de grandes ou petites perturbations. Les perturbations sont causées par les agents biotiques (insectes, etc.) ou abiotiques (vent, incendie, etc.) et peuvent exister en grande ou petite échelle. La mortalité des arbres produit des trouées forestières auxquelles la régénération naturelle est attachée. La création des trouées forestières et l'apparition de nouveaux individus de forêt terminale peut être surnommée dynamique des trouées ou bien « gap dynamics » (Yamamoto, 2000). Les trouées forestières sont créées par la chute des arbres appartenant au niveau supérieur de forêt, ils sont ainsi nommés « gapmaker ». De même, la perte des branches diminue la couverture des cimes et permet l'augmentation de l'infiltration lumineuse. Le changement des conditions microclimatiques améliore la diversité des plantes et même l'apparition de ligneux héliophytes. La couche supérieure, que nous appellerons Canopée se réfère en hauteur

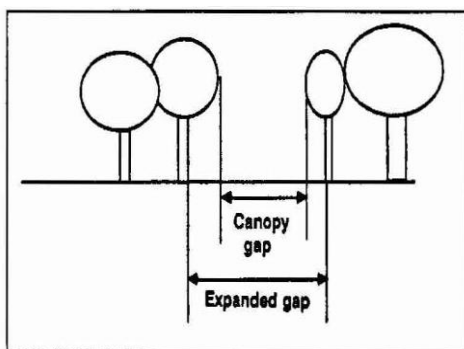


Figure 2: Schéma d'une trouée étendue (expanded gap) et d'une trouée de canopée (canopy gap) d'après Runkle (1992)

supérieure à 2/3 de la hauteur des arbres (Runkle J., 1992). Cet auteur distingue deux types de trouées : trouées étendue (expanded gap) et trouée de canopée (canopy gap), cette dernière est définie comme la projection verticale de l'ouverture de la voûte sur la surface au sol. Son apparition est liée à la mort d'un ou plusieurs arbres de couche supérieure. La surface de la trouée étendue est limitée par les bases des troncs des arbres adjacents à la trouée de canopée. Toute la surface de la trouée étendue est influencée par la lumière passant par l'ouverture de la voûte.

D'après quelques études effectuées dans la forêt naturelle Badin, nous avons constaté que 66,7% des trouées étendues ont approximativement une surface de 100-400m<sup>2</sup>, et que la surface de la majorité d'entre elles se situe entre 100-200m<sup>2</sup>. Presque 70% des trouées de canopée ont une surface inférieure à 100m<sup>2</sup>. La hauteur de la couche supérieure a été défini à 28 m donc il est possible de considérer que la trouée sera refermée dès que la régénération

naturelle au sein de cette-ci aura atteint la hauteur de 15 m. Les trouées de petites tailles sont créées par la nécrose de 1 à 3 arbres et sont très rapidement renfermés par croissance latérale des arbres adjacents. Cependant l'existence de la régénération naturelle au sein d'une trouée ne dépend pas uniquement d'intensité de lumière passant par la trouée mais aussi de s'il y avait des semences bien avant l'ouverture de la voûte.

## 2.4 LUMIERE DANS LE PEUPEMENT ET SON INFLUENCE A LA REGENERATION NATURELLE

Les radiations solaires sont indispensables pour la création et l'existence de la vie sur la Terre. On distingue plusieurs types de radiations : les radiations directes (rayons n'ayant pas subis de diffusion), les radiations diffusées (indirectes) et les radiations totales (globales). La valeur de radiations solaires directes varie très fortement en fonction des coordonnées géographiques du site, de la saison, ou bien de l'altitude ou de l'exposition, etc. Les radiations diffusées dépendent de la pénétrabilité de l'atmosphère, mais aussi de l'heure, de la date, du lieu de mesure, etc. Les radiations solaires indirectes sont plus avantageuses pour les plantes car ces rayons se compose de 50 à 60 % de rayonnement ayant une longueur d'onde comprise entre 565 et 740 nm (lumière jaune-rouges) et sont nécessaires au bon développement des plantes.

Pour les mesures d'ensoleillement, que ce soit dans la forêt, sur les plaines ou bien dans le milieu urbain, les photographies hémisphériques sont très souvent utilisées. (vous trouverez plus d'informations sur ces photographies dans la partie « Méthodologie »). Celles-ci offrent des données concernant la quantité de lumière directe ou facteur de site direct (Direct site factor, DSF) et indirecte ou facteur de site indirect (Indirect site factor, ISF). Ces données ne donnent pas les valeurs réelles de la quantité de lumière atteignant le sol, mais, grâce à un calcul mathématique, elles nous en donnent une estimation. Les DSF et ISF sont définis comme le quotient de radiation indirecte (ou directe) au-dessus de la canopée et sous la canopée (Gómez, 2004). La quantité de radiations totales (total/global site factor TSF/GSF) est la somme des quotients de DSF et ISF en fonction des modèles de météo (Wagner, 1994).

Au moment où un des arbres appartenant à la couche supérieure meurt (il peut rester sur pied ou allongé), la couronne des cimes se libère et laisse entrer plus de lumière dans le peuplement. Les conditions microclimatiques commencent à changer (réchauffement de sol, augmentation de la transpiration, changement de circulation de l'air, etc.), l'intensité de la radiation accroît. Les plantes héliophytes apparaissent et l'incrément de la régénération avancée s'agrandit. D'après Whitmore (1989) il est possible de distinguer deux associations de ligneuses : les espèces de la première association sont capables de germer même lorsque la canopée est complètement fermée et peuvent, durant les premières années, survivre à l'ombre ; c'est ce qu'on appelle les plantes « pionnières (climacique) ». Les espèces de l'autre association ne peut pas germer sans avoir une quantité de lumière suffisant, plus communément appelées plantes « pionnières », et sont indispensable pour la colonisation des trouées de grandes tailles. Un autre auteur indique que l'accessibilité de la lumière n'est pas déterminante pour la germination des semences, mais elle est nécessaire pour la vitalité/viabilité? des nouvelles plantes dans les prochaines années (Szwargyk, 2001). Sur les sites ayant un rayonnement solaire de 9-15% il est possible d'y trouver une quantité de semences plus élevée. Si cette quantité de lumière n'était que 4% la banque des semis deviendrait instable. Les semences n'ont pas survécu si la lumière directe était inférieure à 4%.

Collet (2001) confirme que les semences des arbres climaciques sont capables, durant plusieurs années, d'attendre dans le sous-bois et d'y pousser très lentement. Si à cette époque une trouée vient de se former, leurs incréments en hauteur et en diamètre vont régulièrement augmenter dans les années suivantes. L'âge des individus n'influence pas la dynamique de cette croissance (Collet C., 2002), mais l'importance de quantité de lumière grandit avec l'âge des individus. L'allongement en hauteur est influencé par plusieurs facteurs. Après de nombreuses études, nous supposons que l'effet de lumière diffusée est l'un des principaux effets de la croissance (Jarčuška, 2010). L'incrément en hauteur chez les ligneuses héliophytes (*Acer*) augmente parallèlement à la quantité de lumière. Chez le hêtre, les chercheurs parlent de limite de croissance dès que les radiations diffusées atteignent 35% (Petritan, 2009).

Pour la germination du hêtre, nous n'avons pas trouvé d'informations sur la valeur limite de lumière. Cependant, il semble être plus bénéfique pour les jeunes plantes que l'ouverture (openness) de la canopée laisse entrer 11-27% de radiations journalières (Tabari, 2008).

Dans les trouées forestières nous constatons plus grande quantité de lumière que dans le peuplement ainsi plus grand nombre de régénération naturelle. La densité la plus forte et les individus les plus grands sont concentrés dans le « cône de régénération » (regeneration cone) situé dans la partie nord et centrale de trouée. Les allongements les plus importants sont sur les sites ayant une grande capacité de lumière diffusée et peu de radiations directes (Diaci, 2005). Si la trouée est de dimension très importante (35-40m) et, de ce fait, reçoit trop de lumière, la végétation ombrage améliore les conditions de site (Mihók, 2005)

## 2.5 OBJECTIFS POURSUIVIS

Le but de notre recherche est de déterminer :

- Les relations entre l'ouverture de la canopée et la quantité de radiations directes et indirectes
- La dépendance de l'allongement de la tige principale de hêtre et d'érable (pendant l'année 2010) par rapport aux radiations directes et diffusées (établies par les photographies hémisphériques)
- La distribution spatiale des radiations solaires au sein de trouée forestière

### 3 METHODOLOGIE

#### 3.1 CARACTERISTIQUES DE LIEU DE RECHERCHE

La forêt primaire de Badin se trouve dans les montagnes Kremnicke vrchy (48°41'N, 19°03'E), dans la région de Banska Bystrica, à peu près 7 km direction nord-ouest du village Badin, en Slovaquie Centrale. Sa superficie est d'environ 30 ha, avec une bande de protection de 123 ha, elle se situe à 690-875 m d'altitude. Cette réserve naturelle nationale est l'une de plus ancienne de Slovaquie, elle était déclarée en 1913. Actuellement elle est protégée par la loi<sup>4</sup> §22 ods. 4. Zak. NR SR c. 543/2002 Z.z. o ochrane

prirody a krajiny (Loi de la protection de nature et de paysage), qui empêche quiconque d'y exercer des activités sylvicultrices et la consacre à la recherche non destructive des phases naturelle du développement de la forêt primaire. Géologiquement, le sol est constitué par des corps de lave, des roches pyroclastiques, comme des tufs, et des agglomérats d'andésites pyroxéniques, mais la roche-mère n'affleure pas en surface. Nous sommes en présence de sols bruns acides nourissants avec une forte production d'humus, mais la profondeur physiologique est assez limitée (40-45 cm) et le système racinaire ne peut pas pénétrer dans le sol à cause de roche-mère. Les températures moyennes annuelles sont de 5,3 – 5,8 °C, avec des précipitations de 850-950 mm par an. La période de végétation est de 120-140 jours par an, et l'on peut observer une couverture de neige pendant environ 140-150 jours. Les eaux de ce territoire aliment Badínsky potok (Bublinec, 2001)

Dans le peuplement de Badínsky prales nous pouvons trouver les trois stades d'évolution de forêt primaire, c'est à dire le stade d'aggradation, le stade optimal et le stade de désagrégation<sup>i</sup>, qui ne sont cependant pas également répartis sur le territoire (Korpel', 1989). En plus des plantes ligneuses, nous trouvons des hêtres (*Fagus sylvatica*, L.), qui composent 85-88% du stockage de bois, et des sapins (*Abies alba*, Mill.), qui eux ne correspondent qu'à 10 % du stockage. Le hêtre, dont le cycle de développement dure 230-250 ans (Saniga, 1999), est donc l'espèce qui nous permettra de déterminer les différents stades d'évolution. Sur le terrain, on recense aussi des érables (*Acer pseudoplatanus*, L.), des frênes (*Fraxinus excelsior*, L.), orme de montagne (*Ulmus glabra*, Huds.) ce qui nous amène à constater l'association *Fagetum nudum*

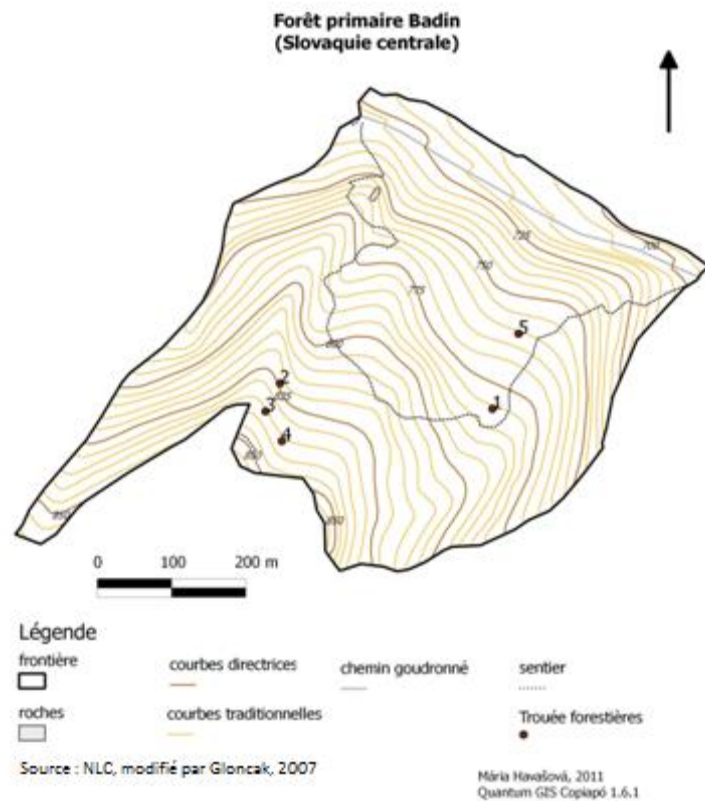


Figure 3: Lieu de recherche - Forêt primaire de Badin

<sup>4</sup> <http://www.vyvlastnenie.sk/predpisy/zakon-o-ochrane-prirody-a-krajiny/>

### 3.2 PARCELLES DE RECHERCHE

A Badínský prales, lieu de notre recherche, nous avons identifié et établis 5 trouées forestières avec de la régénération naturelle. Toutes les trouées ont des conditions écologiques très analogues, c'est à dire formées sur la même roche-mère. Nous y trouvons des brunisols (sols acides), les trouées choisies ont la même exposition au soleil et ont relativement la même pente, ce qui nous permet de pouvoir comparer les résultats obtenus. Du fait d'une petite surface, 30ha, nous pouvons constater la même influence des cervidés. Les trouées choisies étaient de petite surface, créées par d'un à trois arbres morts, soit sur pied, soit allongés. La taille et la position des arbres adjacents, la surface des trouées étendues et trouées de canopée ont été mesurées en utilisant technologie FieldMap. Dans chaque trouée étendue nous avons stabilisé et marqué par les piquets 2 transects d'un mètre de largeur passant par le centre de trouée qui est défini par « gapmaker », donc par la souche de l'arbre mort. Nous utilisons, pour ces transects, deux gradients : Nord-Sud et Est-Ouest. Ces transects sont divisés en carrées de 1m sur 1m. Les frontières de trouées étendues (expanded gaps) sont définies par la base des troncs de deux arbres voisins dont les houppiers sont enchaînés et qui forment l'étage supérieure (diamètre > 31 cm en DHP). En même temps nous distinguons la trouée dans la voûte, par laquelle la plus grande quantité de lumière peut infiltrer le peuplement. Dans le cas où le reste du tronc n'a pas été retrouvé, nous considérons le lieu à peu près au milieu de la trouée comme le centre (subjectivement définis). Pour la visualisation de configuration des arbres et de la canopée nous utilisons la technologie FieldMap. Les mesures étaient effectuées également per Vertex III, les points cardinaux étaient stabilisés par la boussole Suunto M3.

### 3.3 ALLONGEMENT DE LA TIGE REDUIT DE LA REGENERATION NATURELLE

Cette croissance verticale est mesurée sur les transects en gradients Nord-Sud et Est-Ouest comme nous l'avons mentionnés plus haut. Sur chaque mètre carré nous mesurons l'allongement de la tige principale au cours de l'année écoulée (2010), toutes espèces confondues, dont le diamètre ne dépasse pas 2 cm en dbh et la hauteur de chaque individu. Cet allongement est mesuré le long de scion lignifié de l'année précédente. Les résultats sont ultérieurement convertis en fonction de la taille de l'individu et de son espèce.

Pour éliminer l'influence de la taille de l'individu sur sa croissance annuelle nous nous sommes servis de calcul de l'allongement de tige principale annuelle d'après (Luscher, 1990) modifié par (Kuchel, 2006). Le principe de cette modification est posé en réduction linéaire de l'incrément en hauteur réduit à l'hauteur de 100 cm pour chaque individu suivant la formule :

$$i_{hR} = \frac{a + b \cdot 100}{a + b \cdot h} i_h$$

$i_{hR}$  – incrément en hauteur réduit (cm)

$a, b$  – paramètres de formule de régression

$h$  – taille de l'individu (h en 2011 – i2009)

$i_h$  – incrément en hauteur (pour l'année 2010)

L'ensemble de tous les individus pour les deux espèces étudiés (le hêtre et l'érable) était ultérieurement utilisé pour le calcul des paramètres  $a$ ,  $b$  d'équation de régression, en utilisant la hauteur des individus et leurs incréments (sous-chapitre 3.3). Ces incréments « modèles » ( $i_{hR}$ ) étaient utilisés pour toutes les analyses postérieures.

Les espèces les plus fréquentes (c'est-à-dire le hêtre et l'érable sycomore) ont été analysées séparément par rapport au rayonnement solaire incident. Avant le calcul de l'incrément en hauteur réduit nous avons exclu les individus de sapin puisque sur les transects nous n'en avons trouvé que quelques individus. Egalement nous avons exclu les individus de hêtre et d'érable qui ont été rongés ainsi il n'était pas possible de mesurer leurs allongements de tige principale. En tout, nous avons exclu 5,7% de tous les individus de hêtre et 17,2% d'érables. Sur les transects, il était possible d'y trouver les autres espèces de ligneuses comme l'orme de montagne (*Ulmus glabra*, Huds.), le sureau noir (*Sambucus nigra*, L.), le sorbier des oiseaux (*Sorbus aucuparia* L.) et le frêne élevé (*Fraxinus excelsior* L.). Ces données non plus n'étaient pas évaluées en raison de faible fréquence des individus.

### 3.4 CREATION DES PHOTOGRAPHIES HEMISPHERIQUES

Ensuite, des photographies hémisphériques, surnommées « *fish-eye* » ou « *œil de poisson* », ont été prises. Ce type d'objectif, ayant une distance focale de 8 mm ainsi qu'un « super grand angle », permet une vision de 180° d'un seul coup d'œil (Cornelis, 1996). L'appareil photographique utilisé est NIKON COOLPIX P5000. En utilisant le système Mid-OMount 10MP (firme Régent Instruments Inc.), l'appareil est automatiquement nivelé et placé à l'horizontal. La position du Nord est également fixée sur les clichés grâce au service North Finder. Les conditions climatiques

préférables pour ce type de mesure sont au moment où le ciel est bien couvert des nuages c'est à dire, en Europe centrale, avant le lever ou après le coucher du soleil. La raison pour laquelle nous prenons les photographies hémisphériques en ces conditions et pour avoir plus de contraste entre le ciel et les arbres, ce qui facilite les analyses par la suite La position de l'appareil-photo est définie au centre de chaque trouée et dans les intersections entre la trouée étendue et les transects en gradients N-S, E-O, à la hauteur de 1,3m, ainsi qu'en 5 points précis pour une seule trouée. 3 photographies avec différents variations d'IRIS ont été prises : 1. Automatique, 2. -0,7 et 3. +0,7, permettant d'éviter une surestimation de la lumière traversant les branches et les feuilles. Nous avons ensuite choisi la photographie avec la plus grande résolution entre la voûte et l'arrière-plan (le ciel), afin de l'analyser. Les photographies en couleurs sont ensuite mises en noir et blanc, le seuil de distinction des pixels appartenant au fond et aux arbres est ultérieurement défini automatiquement Les photographies sont ensuite mises en noir et blanc, procédé informatique permettant de distinguer les pixels appartenant au ciel de celles appartenant aux arbres. Nous avons utilisé le logiciel WinScanopy 2006 (Régent Instrument Inc.) pour effectuer ces analyses, il permet de retranscrire virtuellement la position du soleil sur les clichés au cours de l'année. La combinaison de cette trace solaire et la classification des pixels appartenant au ciel/aux arbres apporte les informations concernant la répartition des radiations solaires directes (direct site factor – DSF), diffusées (indirect site factor – ISF) et totales (total site factor – TSF), ainsi

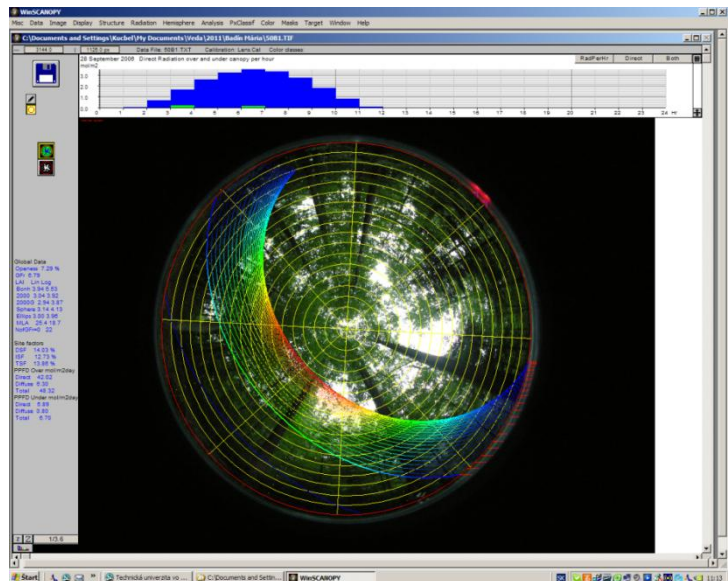


Figure 4 : Exemple de "output" de logiciel WinSCANOPY (Régent Instruments Inc.)

que sur l'ouverture (openness) de la voûte. Ces données étaient ensuite linéairement recalculées en obtenant les valeurs des radiations directes et indirectes pour chaque 1m<sup>2</sup> de nos transects. Même elles étaient associées à chaque allongement de la tige des individus.

La prise des photographies hémisphériques est limitée par l'intensité lumineuse du soleil. Il est donc nécessaire de les prendre avant le lever de soleil, vers 4-5 h de matin. Les rayons de soleil pénétrants par les feuilles peuvent provoquer l'apparition de « taches solaires » sur les clichés et empêcher de les analyser (le logiciel associe automatiquement les pixels au ciel et aux arbres, et en raison de la présence de ces tâches il peut prendre en compte des pixels appartenant initialement au ciel pour des pixels d'arbre. Au total, 75 photographies étaient prises, nous en avons sélectionné 25 qui nous ont semblé d'être de meilleure qualité, et les avons analysées (5 clichés pour chaque trouée). Grâce au logiciel WinScanopy (Figure 4) nous avons obtenu nos données caractérisant la quantité de radiations directes, indirectes et totales (définies dans le sous-chapitre 2.4) et l'ouverture de la canopée (openness). La valeur de l'ouverture de la canopée se distingue de celle de surface de trouée de canopée car l'« openness » comprend la voûte, y compris l'horizon. La trouée de canopée est définie par les couronnes des arbres adjacents et par notre vue, c'est à dire sous un angle de 60°.

### 3.5 TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

Tous les résultats ont été analysés avec le logiciel Statistica 7.0 pour Windows et l'Excel, des affichages visuels ont été réalisés avec ArcGIS 9.3 et QuantumGIS 1.6 Copiapo, et les trouées forestières ont été visualisées via l'application FieldMap.

Les marges de variation de toutes les variables ont été visualisées en utilisant la boîte à moustache et en déterminant leurs médianes. Pour la mise en évidence de l'existence de relation entre les deux variables et leur degré de dépendance, nous avons utilisé la régression linéaire simple. Celle-ci permet la création de droite de régression, laquelle exprime la relation entre les deux variables. Le changement de qualité d'une variable prend l'effet sur la qualité de l'autre suivant la formule :

$$y = a_{yx} + b_{yx} \cdot x$$

a, b – paramètres de formule de régression  
x, y – variables

La corrélation cherche à mesurer la force, la rigidité de la liaison statistique entre X et Y. La régression et la corrélation permettent toutes deux de savoir s'il existe un lien statistique entre les axes X et Y, quelle est la force de ce lien éventuel (corrélation) et quelle est la pente de la relation éventuelle (Poisot, 2004).

Pour l'analyse plus détaillée de l'impact des radiations incidentes sur l'allongement de la tige, nous avons utilisé l'analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs. Nous avons délimité les valeurs médianes de rayonnement diffus et direct pour les deux espèces d'arbres (hêtre et érable). Dans certaines trouées, la répartition des deux espèces étudiées était très inégale, c'est la raison pour laquelle on obtient des valeurs différentes de DSF et ISF pour les deux espèces de ligneux. Avec ces ajouts, nous avons divisés les incréments en hauteur en quatre intervalles - microsites, ces derniers sont ensuite comparés les uns aux autres (Diaci, 2005). Les valeurs de radiations solaires directes et indirectes de ces microsites sont considérées comme un des facteurs, le second étant l'espèce d'arbre présente. Pour la variable indépendante nous avons défini l'allongement de la tige réduit. Les résultats obtenus étaient traité par le post-hoc test de Tukey pour

un nombre inégal de variables. Pour le hêtre et l'érable nous avons défini ces valeurs limites de l'intervalle (Tableau 1):

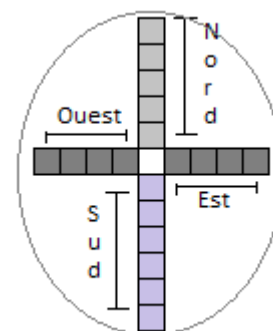
Fagus		
parcelle	ISF (%)	DSF (%)
A	>12,149	< 6,249
B	>12,149	> 6,249
C	<12,149	< 6,249
D	<12,149	> 6,249

Acer		
parcelle	ISF (%)	DSF (%)
A	>11,358	<2,465
B	>11,358	> 2,465
C	<11,358	<2,465
D	<11,358	> 2,465

**Tableau 1: Répartition des incréments de *Fagus* et d'*Acer* d'après ISF et DSF**

La répartition de lumière dans une trouée était également analysée en utilisant l'analyse de la variance à un facteur. Pour le facteur (variable indépendante), les points cardinaux ont été choisis, comme les variables, nous avons établis les valeurs des radiations solaires directes et diffusées exactement tel qu'elles ont été déterminées par le logiciel WinSCANOPY. Nous avons supprimé les données provenant des centres des trouées (subparcelle 1×1m) en se concentrant sur la relation entre le Nord-Sud, Ouest-Est sur les transects étudiés.

L'analyse de la variance à deux facteurs a été également utilisée lors de l'examinations de la relation entre la taille de l'incrément et l'orientation de transect dans une trouée (vers sud, nord, est, ouest). Pour la variable dépendante, nous avons choisi la moyenne de l'incrément en hauteur réduit de tous les individus de hêtre / d'érable situés dans la partie de transect orientée vers un des points cardinaux (les individus situés au centre – sur les microparcelles de 1×1m étaient exclus (Figure



**Figure 5 : Orientation des subparcelles de recherche (1×1m) vers les points cardinaux**

5). Pour les facteurs de cette analyse, nous avons défini l'orientation et l'espèce d'arbre. Le post-hoc test de Tukey a assuré l'homogénéité des groupes.



## 4 RESULTATS ET DISCUSSION

### 4.1 CARACTERISTIQUE DES TROUEES FORESTIERES (GAPS)

Malgré la lumière passant à travers les feuilles (comme vont le prouver les photographies hémisphériques), la trouée de canopée n°5 était tellement petite qu'il n'était pas possible de la visualiser. La trouée n°4 est la plus grande, avec une surface de plus de 417 m<sup>2</sup>, et un périmètre de 79 m. La trouée la plus petite est de 76m<sup>2</sup>, avec un périmètre de 35 m. Ces dimensions des trouées étendues correspondent au rang des dimensions des trouées de canopée. Dans la trouée n°5, comme mentionné plus haut, il était impossible de distinguer, via Fieldmap, la trouée de canopée. La Trouée n°4 est la plus grande trouée de canopée étudiée avec une surface de 167m<sup>2</sup> et un périmètre de 62 m. L'ouverture la plus petite est dans la Trouée n°1 où la surface de la trouée de canopée est seulement de 13m<sup>2</sup>. Toutes les trouées ont les mêmes conditions géomorphologiques (même exposition au soleil, pente) et géologiques. Nous pouvons trouver, dans toutes ces trouées, des individus de la régénération naturelle qu'il nous est possible de mesurer en utilisant les méthodes non-destructives. La visualisation des caractéristiques de base des trouées en forme de graphiques se trouve sur Figure 6(Annexe Tableau 5)

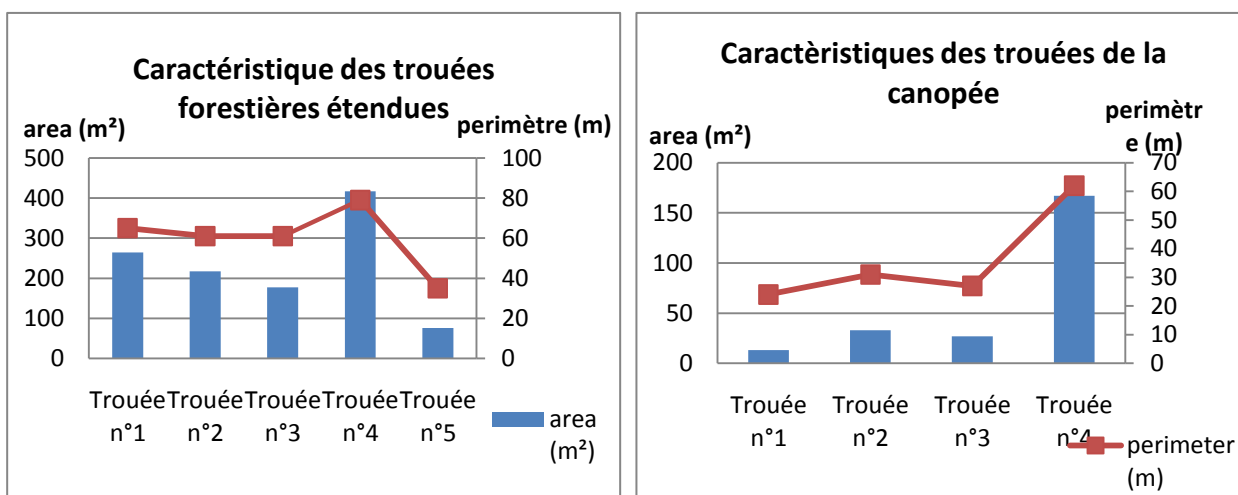
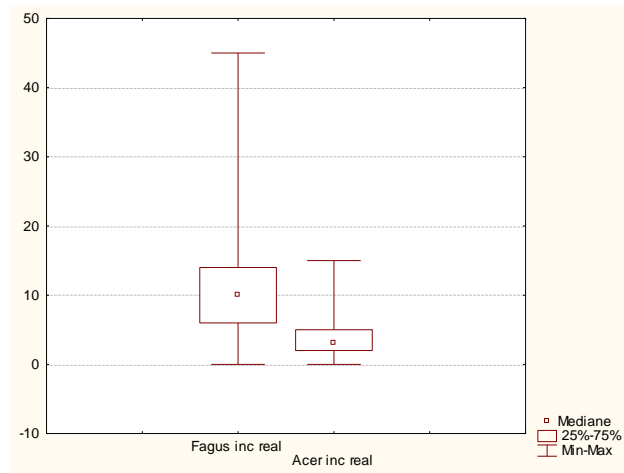


Figure 6 : Caractéristiques des trouées forestières étendues et trouées de canopée

#### 4.1.1 INCREMENT EN HAUTEUR REDUIT (IHR)

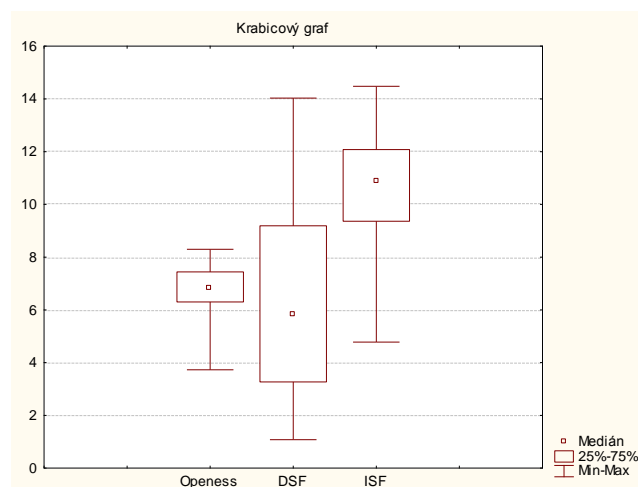
La marge de variation des allongements en hauteur réduits sont représenté sur la Figure 7 (Annexe Tableau 6). La valeur médiane de hêtre 11,2±4,5 cm, pour l'érable c'est 4,99±2,7 cm. Une moitié des allongements de hêtre est dans la gamme entre le 7 et 14 cm. Chez l'érable la marge de variation est plus serrée : la taille de 50% des allongements mesurées est entre 3 et 7 cm. L'incrément minimal pour toutes les deux espèces est 0 cm. L'incrément maximale pour le hêtre est 31 cm donc presque le double du gain le plus élevé pour l'érable – 16 cm. Globalement nous observons une plus grande variabilité des incréments en hauteur pour le hêtre.



**Figure 7: Distribution de variables et des médianes des incréments réduits pour le hêtre et l'érable (cm)**

#### 4.1.2 DISTRIBUTION DE LA LUMIERE DANS LES TROUEES FORESTIERES

Les valeurs obtenues se diffèrent largement. La majorité de données caractérisant l'ouverture de canopée (openness) varie de 6,30 à 7,44%, les valeurs minimales et maximales sont 3,73% et 8,30%, la moyenne est  $6,74 \pm 1,04\%$ . Une moitié emboîtée de caractéristiques des radiations diffusées (ISF) est plus élevée que celle de rayonnement direct (DSF). La marge de variation de celle-ci est plus importante que celle des radiations indirectes. La valeur minimale est 1,08%, maximale 14,03%, la moyenne est  $6,36 \pm 3,9\%$ . Par contre, toutes ces deux valeurs ont été mesurées au milieu de trouée où nous aurions supposé les valeurs plus élevées. La quantité de lumière diffusée varie de 4,78% à 14,48% (Figure 8, Annexe Tableau 7) avec la moyenne de  $10,54 \pm 2,15\%$ . Une moitié de valeurs est regroupée dans l'intervalle de 9,36 à 12,08%. Bien que la valeur du rayonnement direct atteigne la marge de variation plus importante que ceux de rayonnement diffusé, celle-ci dans la plupart de cas atteint les valeurs supérieures aux radiations directes. Ces valeurs très différenciées peuvent être expliquée par la structure de peuplement adjacent. L'effet ombrage est capturé par l'utilisation des photographies hémisphériques.



**Figure 8 : Distribution des variables et de leurs médianes pour l'ouverture de la canopée (openness), des radiations solaires directes (DSF) et diffusées (ISF)**

### 4.1.3 RELATION ENTRE LES RADIATIONS DIRECTES, INDIRECTES ET L'OUVERTURE DE VOÛTE

La régression linéaire simple (Figure 9, Annexe Tableau 8) a prouvé l'existence de relation entre la quantité de radiations diffusées et directes et l'ouverture de la canopée. La force de ces liaisons est par contre bien différente. Une faible corrélation ( $p=0,0244$ ,  $r=0,4489$ ) était détectée entre les radiations directes et indirectes. Le coefficient de corrélation caractérisant la relation entre le rayonnement direct et l'ouverture de la canopée est aussi faible ( $p=0,0166$ ,  $r=0,4742$ ). Les quantités de lumière diffusée et directe ne devons pas nécessairement dépendre l'une de l'autre. Les résultats montrent que ces deux types de radiation peuvent exister en différente combinaison des valeurs. La corrélation plus marquante se trouve en liaison entre l'ouverture de voûte et les radiations diffusées où le coefficient de corrélation égale 0,9061 ( $p=0,000001$ ). Grâce à forte corrélation entre l'ouverture de la canopée (établis grâce aux analyses des clichés hémisphériques) et la quantité des radiations diffusées nous pouvons dériver la quantité de ce type de rayonnement à partir de connaissance de l'ouverture de voûte. Cela nous permet de déterminer la quantité de rayonnement diffus qui est plus important pour la vie des plantes.

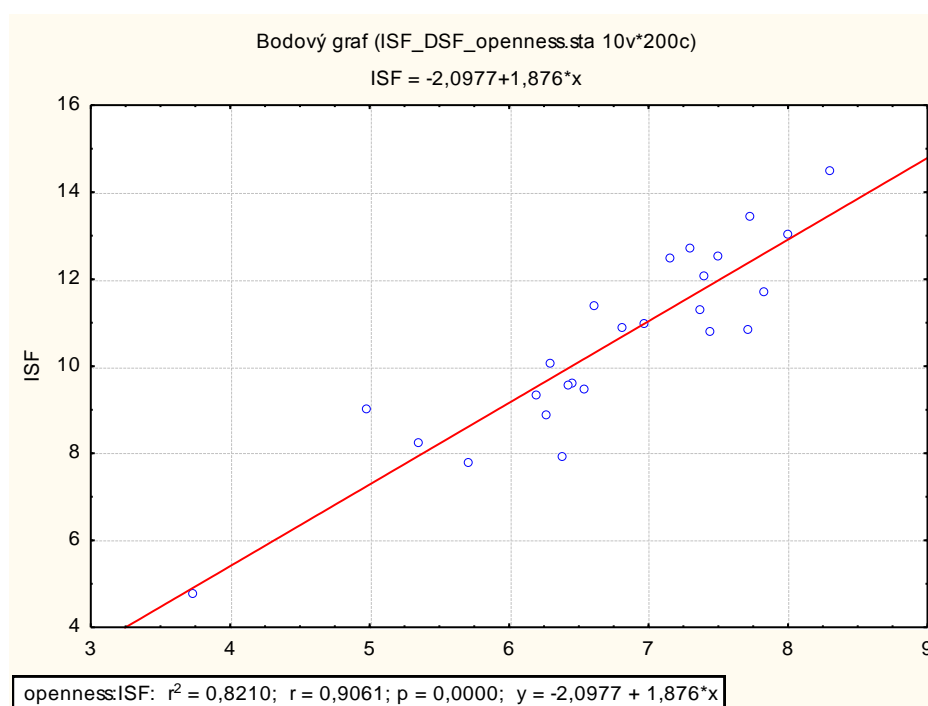


Figure 9 : Relation entre l'ouverture de voûte (openness) et radiations solaires diffusées (ISF)

### 4.2 RELATION ENTRE L'ALLONGEMENT DE LA TIGE ET LA QUANTITE DE RADIATIONS SOLAIRES

Pour toutes les relations étudiées (4 au total) le logiciel STATISTICA a trouvé une dépendance dont la force était très faible. Pour confirmer où bien infirmer l'existence de ces relations nous avons calculé les valeurs de « p-value ». Si la valeur de « p » obtenu va être inférieure au 0,05 (niveau de signification) nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle parlant de l'indépendance des variables. Cela indique l'existence d'une relation entre les deux variables. Si la valeur de « p » va être supérieure au 0,05 nous nous ne pouvons pas rejeter la hypothèse nulle. Dans ce cas nous ne pouvons pas parler de l'indépendance ni de dépendance des variables. Dans le cas de relation entre l'incrément de hêtre et les

radiations diffusées il n'est pas possible de rejeter la hypothèse nulle ( $p > 0,05$ ) qui prévoit l'indépendance des variables. La raison de cette conclusion peut être l'absence de relation ou bien la quantité insuffisante de données. La même situation existe en relation entre l'allongement d'érable et le rayonnement direct. En même temps nous avons confirmé une corrélation entre la croissance en hauteur de hêtre et les radiations directes et en relation entre la quantité des radiations indirectes et l'incrément d'érable. Ces dépendances sont quand même très faibles comme c'est indiqué par le coefficient de corrélation (ISF : ihR *Acer*  $r = 0,20$ , DSF : ihR *Fagus*  $r = 0,32$ ). Pour les conclusions plus amples nous nous sommes concentrés sur la pente de la droite de régression. L'analyse a prouvé l'impact négatif de quantité plus élevée de rayonnement direct sur la croissance verticale de hêtre (Figure 10).

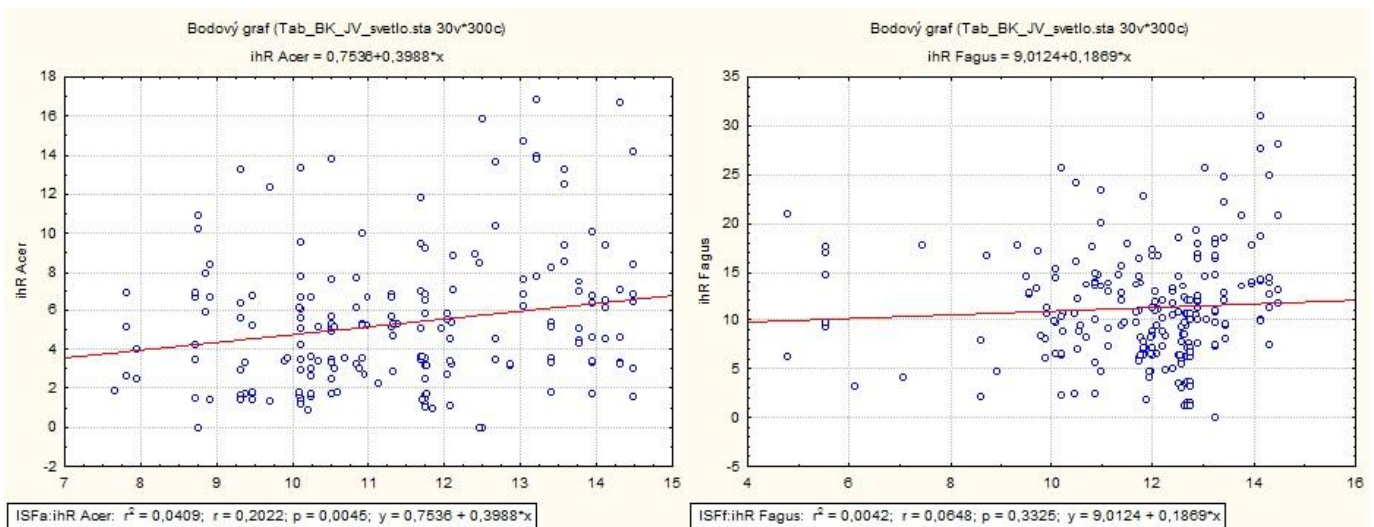


Figure 10 : Rapport entre l'incrément en hauteur et la radiation solaire indirecte (ISF) pour *Fagus sylvatica* (à gauche) et *Acer pseudoplatanus* (à droite)

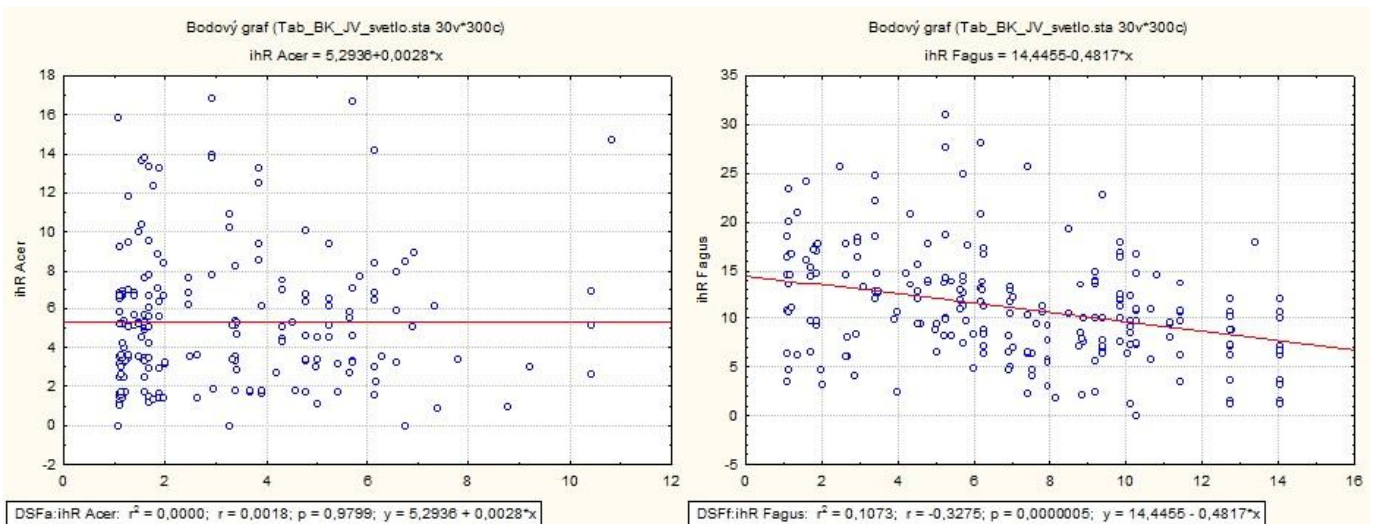


Figure 11: Rapport entre l'incrément en hauteur et la radiation solaire directe de site (DSF) pour *Fagus sylvatica* (à gauche) et *Acer pseudoplatanus* (à droite)

La Figure 11 (même si nous n'avons pas confirmé la relation entre l'ISF et l'allongement de hêtre, nous la supposons en raison des résultats de plusieurs auteurs) indique l'effet positif de radiation indirecte sur la croissance de hêtre. L'analyse a confirmé également la dépendance entre la quantité de lumière incidente directe et l'incrément d'érable (taille de l'incrément augmente avec la quantité de lumière). La régression linéaire visualisée sur la figure 11 ne montre pas l'effet significatif de rayonnement solaire direct sur l'augmentation de hauteur d'érable. Pour les deux espèces de l'arbre nous voyons l'impact favorable de rayonnement diffus. La lumière directe montre l'impact significatif sur la croissance de hêtre tandis que l'augmentation de quantité de lumière provoque la baisse de taille de l'incrément de cette espèce. Pour l'érable nous ne voyons pas d'effet significatif de lumière directe (Tableau 2).

régression	r <sup>2</sup>	r	p	y
DSFf:ihR Fagus	0,1073	-0,3275	0,0000005	14,4455 - 0,4817* $x$
ISFf:ihR Fagus	0,0042	0,0648	0,3325	9,0124 + 0,1869* $x$
DSFa:ihR Acer	0,0000	0,0018	0,9799	5,2936 + 0,0028* $x$
ISFa:ihR Acer	0,0409	0,2022	0,0045	0,7536 + 0,3988* $x$

**Tableau 2: Rapport entre l'incrément en hauteur et les radiations solaires (ISF, DSF) pour *Fagus sylvatica* et *Acer pseudoplatanus***

#### 4.2.1 EFFET DES RADIATIONS SOLAIRES SUR L'ALLONGEMENT DE TIGE SUR LES DIFFERENTS MICROSITES

L'analyse de la variance ANOVA a montré l'effet significatif sur les incréments en hauteur pour les deux facteurs : microsites (a, b, c, d) et l'espèce de l'arbre (annexe Tableau 9). En cette raison nous avons utilisé le post-hoc test de Tukey qui a signalé les groupes homogènes. L'allongement de tige moyen pour les deux espèces est plus élevé sur le microsite A - 11,2 $\pm$ 4,8 cm. L'allongement de tige moyen sur les microsites B, C, et D est 7,2 $\pm$ 3,2 cm. (Annexe Tableau 11). Le facteur „espèce“ a démontré les incréments moyens plus élevé pour le hêtre que pour l'érable. Le hêtre atteint la moyenne de l'incrément 11,2 $\pm$ 3,5 cm, l'érable 5 $\pm$ 3,4 cm. (Tableau 3).

	Espèce	ihR moyenne	1	2
2	acer	5.30287	****	
1	fagus	11.20408		****

**Tableau 3 : Résultats de l'ANOVA; Tukey post-hoc test, allongement de tige pour le hêtre (*Fagus*) et l'érable (*Acer*)**

Le test Tukey a également démontré les groupes homogènes pour les deux espèces placées en différents microsites (Annexe Tableau 10). Les allongements d'érable créent un seul groupe homogène sur tous les microsites. (Figure 12, Annexe Tableau 9 et 10) La graphique visualisé sur la figure 12 présente une corrélation très faible entre la croissance en hauteur d'érable et l'intensité des radiations solaires. L'érable atteint les incréments plus élevé (moyenne 5,9 $\pm$ 2,9 cm) sur le microsite B (radiations directes et indirectes élevées). Les incréments moins élevés nous observons sur le microsite A

(moyenne  $5,7 \pm 2,8$  cm, moins de radiations directe, plus de radiation indirecte). Le moindre allongement de tige a été distingué sur le microsite D ( $< 6,429\%$  DSF a  $< 12,149\%$  ISF) où l'incrément moyen dépasse  $4,1 \pm 2,2$  cm mais la variabilité d'incréments est marquante.

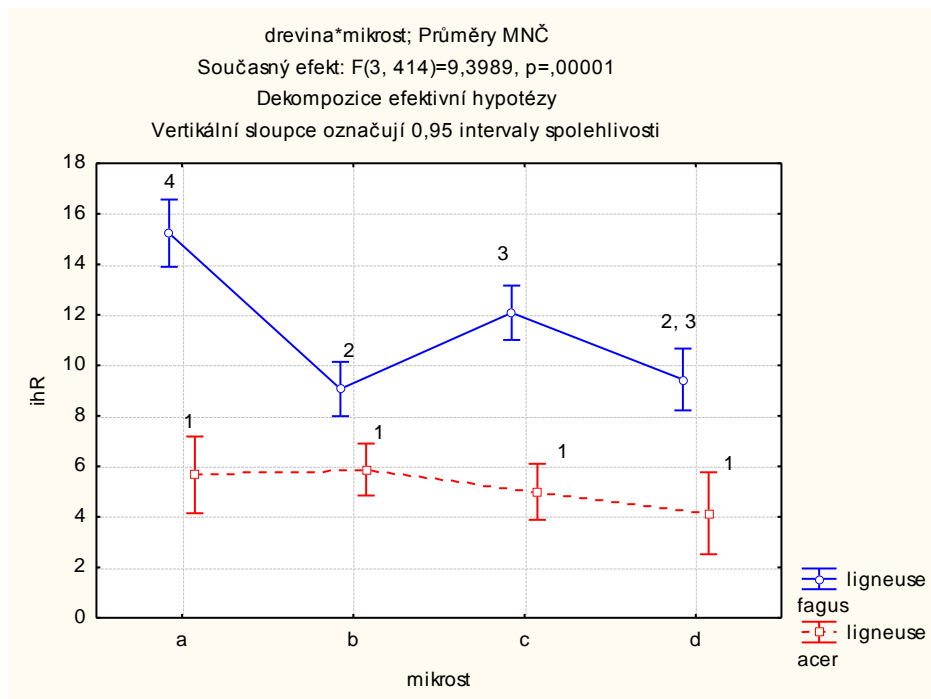


Figure 12: Résultats de l'Analyse de la variance à un facteur (dépendant: incrément en hauteur réduit, facteurs: microsites A, B, C, D)

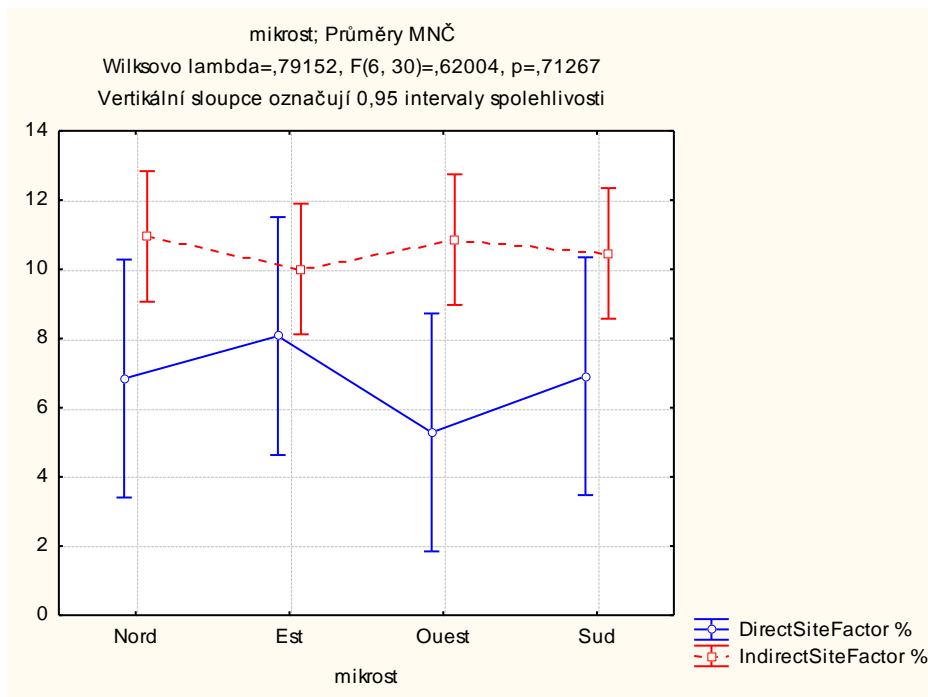
Les allongement de hêtre se diffèrent suivant les microsites et créent des groupes basés sur la similarité entre eux. Au total ils forment 3 groupes. Le groupe n°2 (le « n°1 » a été utilisé pour le groupe homogène crée par l'érable) exprime la homogénéité entre les microsites B et D, groupe n°3 la ressemblance parmi les D et C. La 4<sup>ème</sup> groupe est formée par uniquement par un seul microsite – A. Le groupe n°2 (homogénéité entre les microsites B et D) est susceptible d'être affectée par la lumière du soleil directe de quantité plus élevé que  $6,249\%$ . Les hêtres y atteignent les incréments les moins élevé (B:  $7,9 \pm 3,6$ cm, D:  $9,2 \pm 3,5$  cm), de notre effectif. Nous pouvons en déduire l'impacte négatif de la hausse d'intensité des rayons directs. Le facteur déterminant pour le groupe n°3 (C et D) est l'intensité moindre de radiation diffusée. Par contre le groupe est bien différencié. Même si sur le microsite C l'intensité de rayonnement solaires directe ( $< 6,24\%$ ) et diffus ( $< 12,14\%$ ), est moins élevée, mais les incréments moyens y ont plus grande taille que ceux sur le microsite D (DSF  $> 6,24\%$ , ISF  $< 12,14\%$ ). Les allongements les plus importantes (moyenne  $16,6 \pm 5,2$ cm) se trouvent sur le microsite A avec les radiations indirectes augmentées mais les radiations directs basses. A partir de ces observations nous pouvons constater l'effet positif des radiations solaires indirectes sur la croissance en hauteur de hêtre ; même l'impact négatif de rayonnement direct plus augmenté. Les hausses les plus faibles sont dans le groupe B-D, surtout sur le microsite B avec les intensités élevés de tous les deux types du rayonnement. Sur les microsites A et C nous observons les incréments plus élevé (incrément moyen  $11 \pm 2,7$  cm sur C, incrément moyen  $16,6 \pm 5,2$ cm sur A). Même si sur le microsite C nous trouvons la quantité plus petite de rayonnement direct et diffus, les incréments moyens sont plus

élevés que sur le microsite D (incrément moyen  $9,2\pm 3,5$  cm) où nous constatons les radiations directes augmentées.

### 4.3 COMPARAISON DE LA QUANTITE DE LUMIERES EN FONCTION DES POINTS CARDINAUX D'UNE TROUEE

Dans cette partie de l'étude, nous avons comparé la quantité de lumière directe et indirecte dans les différentes orientations vers les points cardinaux dans les trouées forestières. Le graphique ci-joint est composé des points cardinaux sur l'axe x, et des valeurs de radiations solaires directes et indirectes (%) sur l'axe y. Lors de l'analyse des données par la variance à un facteur (Figure 13, Annexe Tableau 13.), appliquée individuellement pour chaque type de rayonnement, nous n'avons pas trouvé de différence significative entre la partie de la trouée (Nord, Sud, Est, Ouest) et la quantité de radiations diffusées et directes (Annexe Tableau 123) ( $p > 0,05$ ). Le rayonnement direct atteint des valeurs plus élevées à l'est de la trouée ( $8,7\pm 2,1\%$ ), et des valeurs plus petites à l'ouest ( $5,3\pm 3,6\%$ ). Les valeurs moyennes en partie nordique et australe sont  $6,8\pm 1,5\%$  et  $6,9\pm 3,9\%$ . La marge des valeurs de rayonnement en partie nord et sud se situe entre  $6,8\pm 1,5\%$  et  $6,9\pm 3,9\%$ . Les valeurs les plus élevées des radiations solaires diffusées se trouvent en partie nord et ouest de la trouée ( $10,9\pm 1,4$  à  $10,8\pm 1,8\%$ ), les plus basses sont situées à l'est de la trouée ( $10,1\pm 1,6\%$ ). Au total, les valeurs de rayonnements solaires diffus sont plus élevées que les radiations directes, celles-ci sont plus variables. A l'est les valeurs de radiations solaires directes et indirectes sont à peu près similaires, à l'ouest leur marge de variation est assez dispersée. Le fait de n'avoir travaillé que sur un petit nombre de trouées n'a pas permis de valider l'hypothèse suggèrent une distribution inégale de la lumière entre les différentes parties d'une trouée. De plus, la pénétration de lumière par l'intermédiaire des trouées voisines, ont eu une influence à ne pas négliger sur nos résultats.

La couche supérieure de la forêt primaire de Badin est très différenciée verticalement, de ce fait, il est possible d'y observer des processus de perturbation intenses. En outre, nous pouvons constater une pénétration de lumière passant par les trouées voisines et entrant dans les trouées étudiées. La répartition exacte de la lumière directe et indirecte et l'ouverture de la canopée est visualisée dans l'Annexe (Figure 16, 17, 18, 19 et 20). Ces visualisations prouvent que la quantité de lumière incidente ne dépend pas uniquement de l'emplacement des arbres et de la fermeture de canopée. La quantité de rayonnement la plus élevée se trouve dans la trouée n°5 dont la canopée est, d'après le logiciel FieldMap, la plus renfermée. Contrairement à ce que l'on peut penser, ce n'est pas au centre des trouées que l'on trouve la plus grande quantité de lumière, en effet, la variation dans la distribution de lumière dépend de plusieurs facteurs différents, comme par exemple la disposition des arbres dans la trouée, qui n'indique pas forcément les zones d'ombrage de la végétation adjacente. La photographie hémisphérique permet donc de connaître plus précisément et objectivement les conditions lumineuses de l'endroit défini.

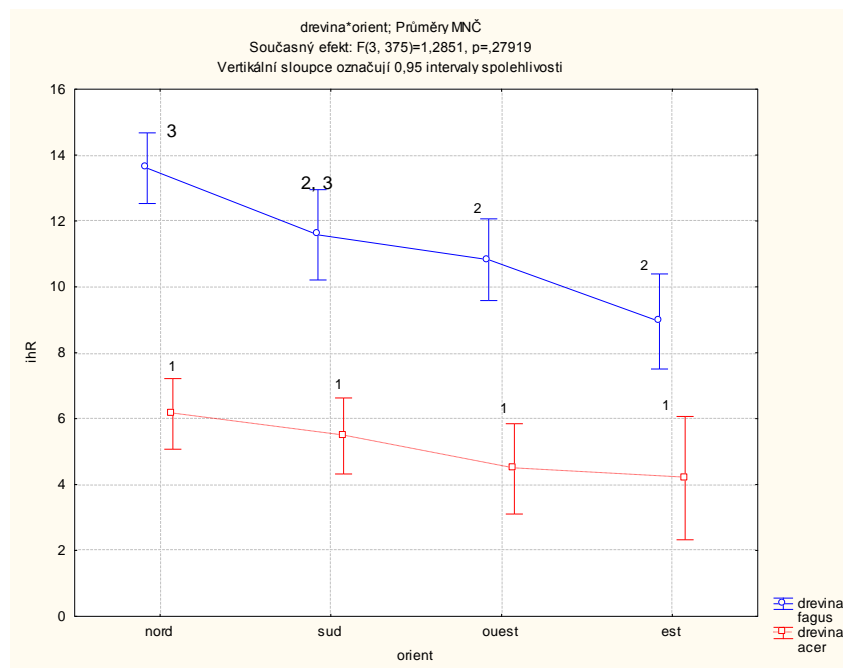


**Figure 13: Résultats de l'Analyse de variance à un facteur (dépendant: incrément en hauteur réduit, facteurs: orientation de terrain-Nord, Sud, Est, Ouest)**

#### 4.4 RAPPORT ENTRE L'INCREMENT EN HAUTEUR ET L'ORIENTATION DU TRANSECT

L'analyse de la variance a montré les différences significatives entre les valeurs moyennes des incréments en hauteur sur les orientations différentes de transect (dans la partie orientale, occidentale, nordique et australe). Egalement nous avons prouvé les valeurs moyennes différentes pour le hêtre et l'érable ( $p < 0,05$ , Annexe Tableau 14). Ultérieurement les groupes homogènes étaient déterminés. Le post-hoc test de Tukey a prouvé que les valeurs moyennes des allongements pour les deux espèces sont significativement différentes. (Annexe Tableau 15). Pour l'érable l'allongement moyen sur tous les transects est  $5,3 \pm 2,6$  cm. Pour l'hêtre c'est  $11,5 \pm 4,3$  cm. Les différences entre les groupes étaient détectées même pour les valeurs moyennes des incréments pour les deux facteurs : l'espèce de ligneuse, également l'emplacement spatial. Le post-hoc test de Tukey a déterminé les deux groupes homogènes. Les orientations de transects à l'est, à l'ouest et au sud sont regroupé dans l'ensemble n°1. Les valeurs des allongements moyens sont  $8,5 \pm 4,5$  cm. Dans le deuxième groupe homogène nous trouvons l'orientation nordique. L'allongement de tige moyenne atteint  $9,7 \pm 4,5$  cm. Cette division indique l'existence des différences entre la position « nord » et les autres orientations au sein de trouée. (Annexe Tableau 16). L'analyse plus en détail était fait par le post-hoc test de Tukey qui a été appliqué en même temps à l'orientation des transects et aux deux espèces de plantes.





**Figure 14: Relation entre l'allongement de la tige pour le hêtre (*Fagus*) et l'érable (*Acer*), par rapport aux différentes parties géographiques de trouée (Nord, Sud, Est, Ouest)**

L'érable sycomore n'a pas montré les différences significatives pour les incréments moyens en hauteur pour les diverses positions géographiques. Toutes les moyennes d'érable appartiennent au même groupe homogène (1). Les incréments moyens en hauteur vont de  $4,3\pm 3,1$ cm (Est) jusqu'à  $6,1\pm 3,8$  cm (Ouest). Cet effet renforce l'hypothèse sur la quantité plus élevée des radiations solaires dans la partie nordique de trouée que dans les autres parties. Il est possible de constater que l'orientation des secteurs de transect n'as pas d'effet significatif sur l'allongement de la tige d'érable sycomore. Pour le hêtre, le test de Tukey a déterminé les deux groupes homogènes. La première (sur la graphique marqué par le chiffre 2) est formée par les incréments moyens situés au sud, à l'est et à l'ouest. Leurs tailles moyennes et  $8,9\pm 4,6$  cm (Est),  $10,9\pm 4,7$  cm (Ouest) et  $11,5\pm 4,9$  cm au Sud. Les incréments au Nord et eu Sud forment un autre groupe homogène (3). La valeur de l'incrément moyen au Nord atteint  $13,6\pm 6,2$  cm. Ces résultats confirment l'hypothèse de croissance plus élevée sur les parties nordiques de trouée forestière que sur les autres orientations même si dans notre effectif nous voyons l'allongement moyen plus élevé en partie australe. (Tableau 4).

		ihR				
	espèce	orient	moyenne	1	2	3
8	acer	est	4.19687	****		
7	acer	ouest	4.47862	****		
6	acer	sud	5.47651	****		
5	acer	nord	6.14615	****		
4	fagus	est	8.95024		****	
3	fagus	ouest	10.82552		****	
2	fagus	sud	11.57976		****	****
1	fagus	nord	13.60362			****

**Tableau 4 : Résultats de post-hoc test de Tukey: relation entre la taille de l'incrément par rapport à l'orientation de transect et de l'espèce**

Bien que la répartition de lumière dans une trouée ne fût pas statistiquement significative nous avons prouvé que l'allongement de tige de toutes les deux espèces assemblées était significativement plus élevé dans les secteurs nordiques de trouée. Pour l'érable l'analyse n'a pas prouvé significativement la différence entre les allongements des tiges poussées sur les secteurs différemment orientés. Le hêtre atteint les allongements plus importants dans les secteurs australs et nordiques.

## 5 CONCLUSION

Le but de cette étude était d'aborder les questions sélectionnées sur les premiers stades d'évolution de la régénération naturelle dans une forêt primaire en Europe Centrale. L'analyse de relation entre la croissance verticale et la quantité de lumière incidente directe et indirecte nous a permis de déterminer la corrélation entre ces deux variables et déterminer leur impact positif ou négatif de radiation directe ou indirecte sur l'allongement de tige principale des plantes ligneuses.

### 5.1 CARACTERISTIQUE DE LA REGENERATION NATURELLE ET REPARTITION DE LA LUMIERE DANS UNE TROUEE

Les trouées forestières choisies sont de petite surface (la surface des trouées étendues passe de 100m<sup>2</sup> à 400 m<sup>2</sup>, taille des trouées de canopée est de 13 à 167 m<sup>2</sup>). L'une des caractéristiques étudiées était l'ouverture de canopée, ses valeurs sont de 3,8 à 8%. L'autre caractéristique est la quantité de radiations directes et indirectes. Les radiations directes sont plus variées que celles d'ISF, les valeurs obtenues varient de 1 à 14%. Par contre, les radiations diffusées sont plus concentrées – la moitié des données varient de 9 à 12% contre la moitié des radiations directes (de 3 à 9%). Nous avons étudié la corrélation entre les composantes directes et indirectes des radiations ainsi que leurs liens avec l'ouverture de la voûte (openness). La dépendance très forte a été démontrée en utilisant la régression linéaire simple entre les radiations diffusées et l'ouverture de la voûte comme l'a déclaré Zrak (2010). La relation entre l'ISF et DSF et l'« openness » montre une dépendance moyenne. Ces résultats pourraient à l'avenir être étudiés plus en détail car la lumière indirecte apporte ses bénéfices aux toutes les plantes.

### 5.2 RELATION ENTRE L'INCREMENT EN HAUTEUR ET LA QUANTITE DE RADIATIONS INCIDENTES

Dans cette section, nous avons utilisé pour les analyses primaires la régression linéaire simple. Nous avons comparé la relation entre l'incrément en hauteur réduite du hêtre et de l'érable et les radiations solaires directes et indirectes. En raison de confirmation ou d'infirmité de résultats nous avons calculé leurs valeurs de p-value. Nous n'avons pas prouvé la dépendance entre la quantité de radiations solaires indirecte et l'allongement du hêtre ( $p=0,33$ ). D'autre part nous avons prouvé un impact négatif, mais assez faible ( $r=-0,32$ ) de l'augmentation de la quantité de lumière directe sur la croissance de cette espèce. Pour l'érable, le rapport significatif, pour la corrélation, entre la croissance en hauteur et la quantité de rayonnement direct n'a pas été montré ( $p=0,98$ ), nous observons tout de même un effet positif de la quantité de lumière, celle-ci augmentant le rayonnement indirect ( $r=0,21$ ,  $p=0,0045$ ). Les analyses plus détaillées étaient évalué en utilisant l'analyse de la variance. Les incréments étaient divisés en 4 groupes suivant la combinaison entre les valeurs de leurs rayonnements diffus et rayonnements direct obtenu. Le post-hoc test de Tukey a été appliqué, ce test a démontré l'existence de 4 groupes homogènes. Les valeurs moyennes des incréments réduits de l'érable ne se différencient pas significativement suivant les microsites. Par contre, le hêtre montre des incréments moyens plus grands sur les microsites, avec quantité de lumière indirecte plus élevée (ISF>12,149%, DSF < 6,249%). Les incréments plus petits sont liés aux microsites dont le rayonnement direct est de plus de 6,249%, donc sur les microsites B et D. Le microsite C avec un incrément en hauteur moyen de 11±2,7 cm est caractérisé par une plus grande quantité de radiations indirectes (ISF <12,149%) et une quantité moindre de radiations directes (DSF< 6,249%). Les incréments les plus élevés sont pour les deux espèces (données unifiés) sur le microsite A (plus d'ISF, moins de DSF). Au total, le hêtre atteint des allongements plus importants que l'érable.

### 5.3 QUANTITE DE LUMIERE SUIVANT L'ORIENTATION DU TRANSECT

L'hypothèse évoquant une plus grande quantité de radiations solaires en partie nordique qu'en partie australe, ainsi qu'une plus grande quantité de lumière à l'Ouest qu'à l'Est ( $p > 0,05$ ) n'a pas été confirmée significativement. Par contre, la distribution de quantité de radiations solaires indirectes suggère hypothèse précédente (la quantité de lumière plus élevée au Nord et à l'Ouest contre les deux autres orientations). Toutefois, la distribution de rayonnement direct est bien différente (quantité plus élevée au Sud et à l'Est). Cela est probablement dû aux pénétrations de lumière des trouées voisines en raison de grand nombre des trouées qui font de 11,3 à 37,9% de toute la surface de cette forêt primaire, comme il était confirmé par Kucbel et al. (2010).

### 5.4 TAILLE DE L'INCREMENT SUIVANT L'ORIENTATION DU TRANSECT

Basée sur les analyses élaborées, l'existence de cône de régénération (regeneration cone) a été confirmée, de la même façon que celle mentionnée dans le travail de Diaci (2005). Les allongements de tige moyens les plus importantes sont situées dans le secteur nord de la trouée, les incréments des autres parties ne diffèrent pas significativement (pour les deux espèces assemblées). L'analyse de la variance appliquée spécialement pour l'érable n'a pas démontré l'effet significatif des orientations de transect sur son allongement moyen. Les incréments du hêtre étaient significativement plus grands sur les secteurs nordique et austral.

Cette étude n'a pas donné d'information sur la quantité minimale de radiation solaire qui était établit à 3%, Szwargyk et al (2010) considère cette valeur comme la valeur limite pour l'existence de la régénération naturelle (seedling bank). Les individus de hêtre dont la taille était plus que 60 cm se trouvaient même sur les sites où il n'y était que 1-2% de rayonnement direct. Cette contradiction peut-être expliquée par le fait qu'autre fois, la trouée de canopée était plus ouverte qu'elle ne l'est actuellement. Ceci a permis le développement des semences qui atteignent aujourd'hui la hauteur de 60 cm. Leurs incréments restent quand même relativement petits (3-4 cm), ce qui indique que les radiations disponibles sont d'une faible quantité. Également, nous n'avons pas prouvé une forte corrélation entre la quantité d'ISF et l'allongement de tige pour les deux espèces de plantes, comme Petritan l'a montré (2009). Nous supposons avoir un grand nombre d'échantillons ( $\pm 200$  de chaque espèce) dans une fourchette relativement étroite de valeurs de rayonnement, par conséquent, nous avons noté plutôt la plus grande variabilité de taille des incréments. La faible corrélation entre la quantité de rayonnement et l'allongement de tige peut être expliquée par l'action d'autres facteurs, la lumière ne semble pas être le facteur déterminant. D'autres facteurs influents peuvent être attribués à l'âge de l'individu et de la trouée, si la régénération avancée était établie avant la formation de la trouée. Entre en compte également, les conditions locales géologiques et pédologiques, quantité d'humus disponible, etc. Les recherches postérieures pourraient être d'avantages axés sur la distribution de lumière dans une trouée forestière ainsi que sur la meilleure connaissance de microclimat de trouées. Comme il était déjà indiqué par Diaci (2005), celle-ci semble être un facteur important sur la régénération naturelle ultérieure.

## 6 BIBLIOGRAPHIE

Bublinec, E. P. (2001). *Slovenské pralesy: Diverzita a ochrana*. Zvolen: Ústav ekológie lesa Slovenskej akadémie vied.

Bugošová, L. (2001). *Štruktúra, textúra, produkcia a regeneračné procesy bukového pralesa NPR Rožok*. Zvolen: (diss).

Collet, C. e. (2002). : Effects of canopy opening on the morphology and anatomy of naturally regenerated beech seedlings. *Trees* 16 , 291-298.

Collet, C. (2001). Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings . *Annals of Forest Science* 58 , 127-134.

Cornelis, B. -E. (1996). Les fondements de l'analyse numérique de photos prises au fisheye pour des besoins topoclimatologiques. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie* 8 , 66-73.

Diaci, J. (2005). Interactions of light and regeneration in Slovenian Dinaric Alps: patterns. Mukachevo.

Diaci, J. (2005). regeneration Dynamics in a Norway spruce plantation on a silver fir beech forest site in the Slovenian Alps. *For. Ecol. Manag.* , 27-38.

Glončák, P. (2006). *Posúdenie prirodzenosti drevinového zloženia ochranného pásma NPR Badínsky prales*. Zvolen: (mémoire).

Gómez, J. e. (2004). Differences between structural and functional environmental heterogeneity caused by seed dispersal. *Functional Ecology* 18 , 787-792.

Greslier, N. e. (1995). Les forêts subnaturelles de l'arc alpin français. *Revue forestière française* , 241-254.

Jarčuška, B. (2010). *Influence of light availability on height growth of beech (Fagus sylvatica L.) natural regeneration with different growth history*. Zvolen: NLC .

Klinda. (2007). Karpatské bukové pralesy od roku 2007 svetovým prírodným dedičstvom. *Enviromagazín.* , 5-7.

Korpel', Š. (1989). *Pralesy Slovenska*. Bratislava: Vydavateľstvo SAV – Veda.

Kucbel, S. (2010). Canopy gaps in an old-growth fir-beech forest remnant of Western Carpathians. *Eur J Forest Res* , 249-259.

Kucbel, S. (2006). *Štruktúra porastov a optimalizácia pestovných opatrení vo vysokohorských lesoch v oblasti Nízkyh Tatier*. Zvolen: TU Zvolen.

Kucbel, S. (2006). *Štruktúra porastov a optimalizácia pestovných opatrení vo vysokohorských lesoch v oblasti Nízkyh Tatier*. Zvolen: (diss).

Lewis, L. 2. (2007). The spatial pattern of a natural European beech (*Fagus sylvatica* L.) - silver fir (*Abies alba* Mill.) forest: A patch-mosaic perspective. *Forest Ecol. management* 253 , 161-171.

Luscher, F. (1990). *Untersuchungen zur Höhenentwicklung der Fichtennaturverjüngung im innealpinen Gebirgswald*. ETH Zurich.

Mihók, B. e. (2005). Study of Gap-phase regeneration in a Managed beech forest : Relation between tree Regeneration and Light, Substrate Features and Cover of Ground Vegetation. *Acta Silv.* , 25-38.

Otto, H. (1998). *Ecologie forestière* . Paris: Institut de développement forestier.

Petritan, A. e. (2009). : Influence of light availability on growth, leaf morphology and plant architecture of beech (*Fagus sylvatica* L.), maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) saplings. . *European J For Res* 128 , 61-74.

Poisot, D. (2004). *Statistique pour les statophobes*.

Runkle, J. (1985). *Disturbance regimes in temperate forests*. In *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Orlando: Academic press.

Runkle, J. (1992). *Guidelines and Sample Protocol for Sampling Forest Gap General Technical Report PNW-GTR-283*. Portland: Departement of Agriculture, Forest Services.

Saniga, M. (1999). Štruktúra, produkčné pomery a regeneračné procesy Badínskeho pralesa. *J. For. Sci.* 45 , 121-130.

Szwargyk, J. e. (2001). Dynamics of seedling banks in beech forest: results of a. *Dynamics of seedling banks in beech forest: results of a* , 237-250.

Tabari, M. (2008). Germination and initial growth of *Fagus orientalis* Seedlings under Different Stand Canopies. *Journal of Applied Science* 8 , 1776-1780.

Tužinský, L. (2007). *Bioklimatológia*. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene.

Wagner, S. (1994). *Strahlschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos, Methode und Anwendung. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades*. Gottingen.

Whitmore, T. (1989). Canopy gaps and the two major groups of forest trees. *Ecology* 18 , 536-538.

Yamamoto. (2000). Forest Gap Dynamics and Tree Regeneration. *J.For. Res.* 5 , 223-229.

Zrak, J. (2009). *Svetelné pomery v bukovom prírodnom lese Badín*. Zvolen: (mémoire).

## 7 ANNEXE

Figure 15 : Cycle de développement à long terme en forêt primaire en Europe Centrale (Korpel, 1989)

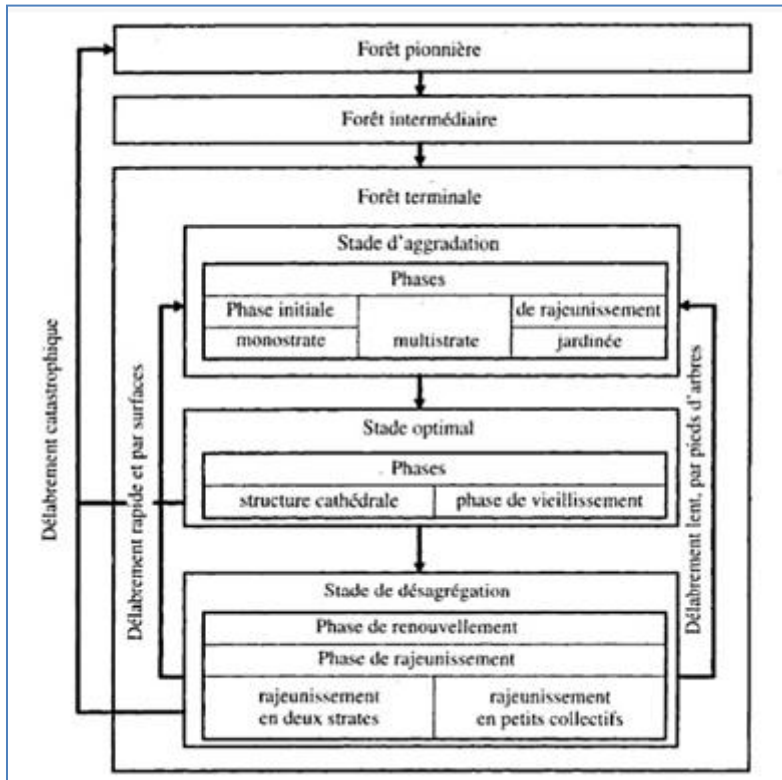


Tableau 5 : Caractéristiques des trouées forestières étendues et trouées de canopée

	étendue		canopée		N	E
	area (m <sup>2</sup> )	perimeter (m)	area (m <sup>2</sup> )	perimeter (m)		
Trouée n°1	264	65	13	24	48°41.277'	019°03.067'
Trouée n°2	217	61	33	31	48°41.212'	019°02.878'
Trouée n°3	177	61	27	27	48°41.207'	019°02.818'
Trouée n°4	417	79	167	62	48°41.198'	019°02.893'
Trouée n°5	76	35			48°41.245'	019°03.143'

Tableau 6 : Distribution de variables et des médianes des incréments réduits pour le hêtre et l'érable (cm)

	N	moyenne	mediane	min	max	quartile		écart
						inf	sup	
incrément Fagus	226	11.20	10.62	0.00	31.12	7.23	14.33	5.60
incrément Acer	196	5.30	4.99	0.00	16.84	2.96	6.81	3.50

**Tableau 7: Distribution des variables et de leurs médianes pour l'ouverture de la canopée (openness), des radiations solaires directs (DSF) et diffusées (ISF)**

	N	moyenne	mediane	min	max	quartile inf	quartile sup	écart
Openness								
s	25	6.74	6.81	3.73	8.30	6.30	7.44	1.04
DSF %	25	6.36	5.82	1.08	14.03	3.27	9.19	3.90
ISF %	25	10.54	10.87	4.78	14.48	9.36	12.08	2.15

**Tableau 8: Régression linéaire entre ISF, DSF, openness**

	r <sup>2</sup>	r	p	y	
openness:DSF	0,2081	0,4562	0,0432	-5,2298 1,7584* $x$	+
openness:ISF	0,8210	0,9061	0,0000	-2,0977 1,876* $x$	+
ISF:DSF	0,2015	0,4489	0,0244	8,9704 0,2469* $x$	+

**Tableau 9: Résultats de l'ANOVA sur la différence en hauteur des incréments pour les microsites et les espèces**

	SS	df	MF	F	p
Abs. člen	26319.40	1	26319.40	1333.730	0.000000
espèce	3765.41	1	3765.41	190.812	0.000000
microst	611.91	3	203.97	10.336	0.000001
espèce*microst	556.42	3	185.47	9.399	0.000005
erreur	8169.74	414	19.73		

**Tableau 10: Résultats du test post-hoc (N différent) pour de l'Analyse de la variance à deux facteurs (dépendant: incréments en hauteur réduit, facteurs: microsites A, B, C, D et sort de ligneux)**

	espèces	microsite	ihR				
			moyenne	1	2	3	4
8	acer	d	4.14240	****			
7	acer	c	4.98971	****			
6	acer	a	5.66354	****			
5	acer	b	5.87464	****			
4	fagus	b	9.06389		****		
3	fagus	d	9.44116		****	****	
2	fagus	c	12.08217			****	
1	fagus	a	15.23219				****



**Tableau 11 : Résultats du test Tukey post-hoc (N différent) pour de l'Analyse de la variance (dépendant: incrément en hauteur réduit, facteur: microsites A, B, C, D)**

	mikrost	ihR moyenne	1	2
2	b	7.39993	****	
4	d	7.52036	****	
3	c	8.64676	****	
1	a	11.07738		****

**Tableau 12 : ANOVA à 1 facteur pour les radiations directs (DSF), facteur - microsites**

	SS	df	MF	F	p
Abs. člen	918.4190	1	918.4190	69.84474	0.000000
microst	19.6141	3	6.5380	0.49721	0.689386
Erreur	210.3910	16	13.1494		

**Tableau 13: ANOVA à 1 facteur pour les radiations indirects (ISF), facteur - microsites**

	SS	df	MF	F	p
Abs. člen	2233.652	1	2233.652	563.5634	0.000000
microst	2.771	3	0.924	0.2330	0.872012
Erreur	63.415	16	3.963		

**Tableau 14: Résultats de l'ANOVA sur la différence en hauteur des incréments pour les différentes orientations et les espèces (*Fagus, Acer*)**

	SS	df	MF	F	p
abs. Clen	22609.08	1	22609.08	1134.313	0.000000
espèces	3228.83	1	3228.83	161.993	0.000000
orient	522.93	3	174.31	8.745	0.000013
espèces*orient	76.84	3	25.61	1.285	0.279187
erreur	7474.49	375	19.93		

**Tableau 15 : Résultats du post-hoc test de Tukey: Dépendance de l'incrément et de l'espèce (*Fagus, Acer*)**

	espèces	ihR moyenne	1	2.00
2	acer	5.34779	****	
1	fagus	11.58281		****

**Tableau 16 : Résultats du post-hoc test de Tukey : dépendance de l'incrément d'après l'orientation de transect**

	orient	ihR moyenne	1	2
4	est	7.177799	****	
3	ouest	7.965927	****	
2	sud	8.004117	****	
1	nord	9.874888		****

## Distribution de lumière dans la trouée forestière n°1

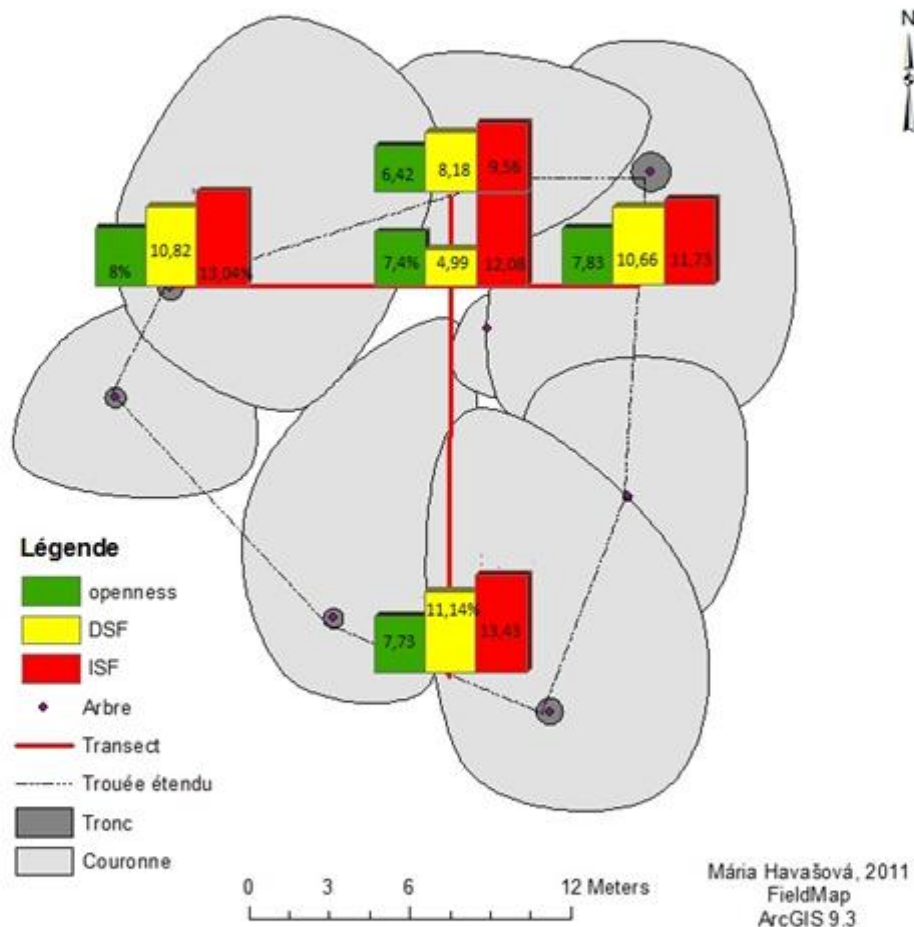


Figure 16 : Distribution de lumière dans la trouée forestière

## Distribution de lumière dans la trouée forestière n°2

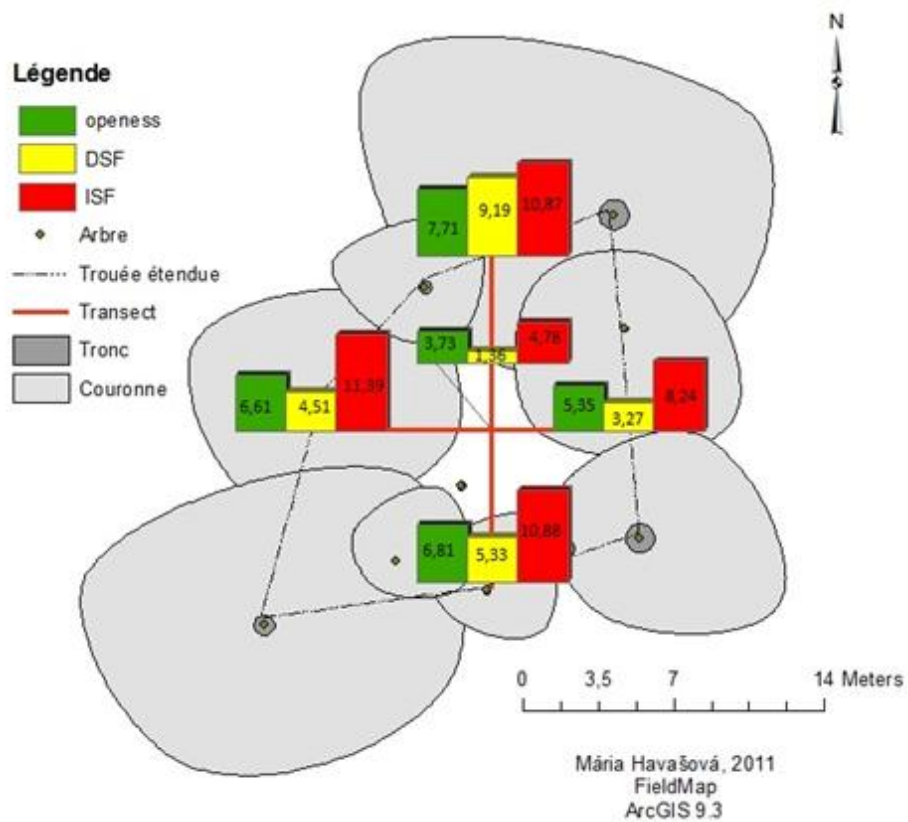


Figure 17 : Distribution de lumière dans la trouée forestière

## Distribution de lumière dans la trouée forestière n°3

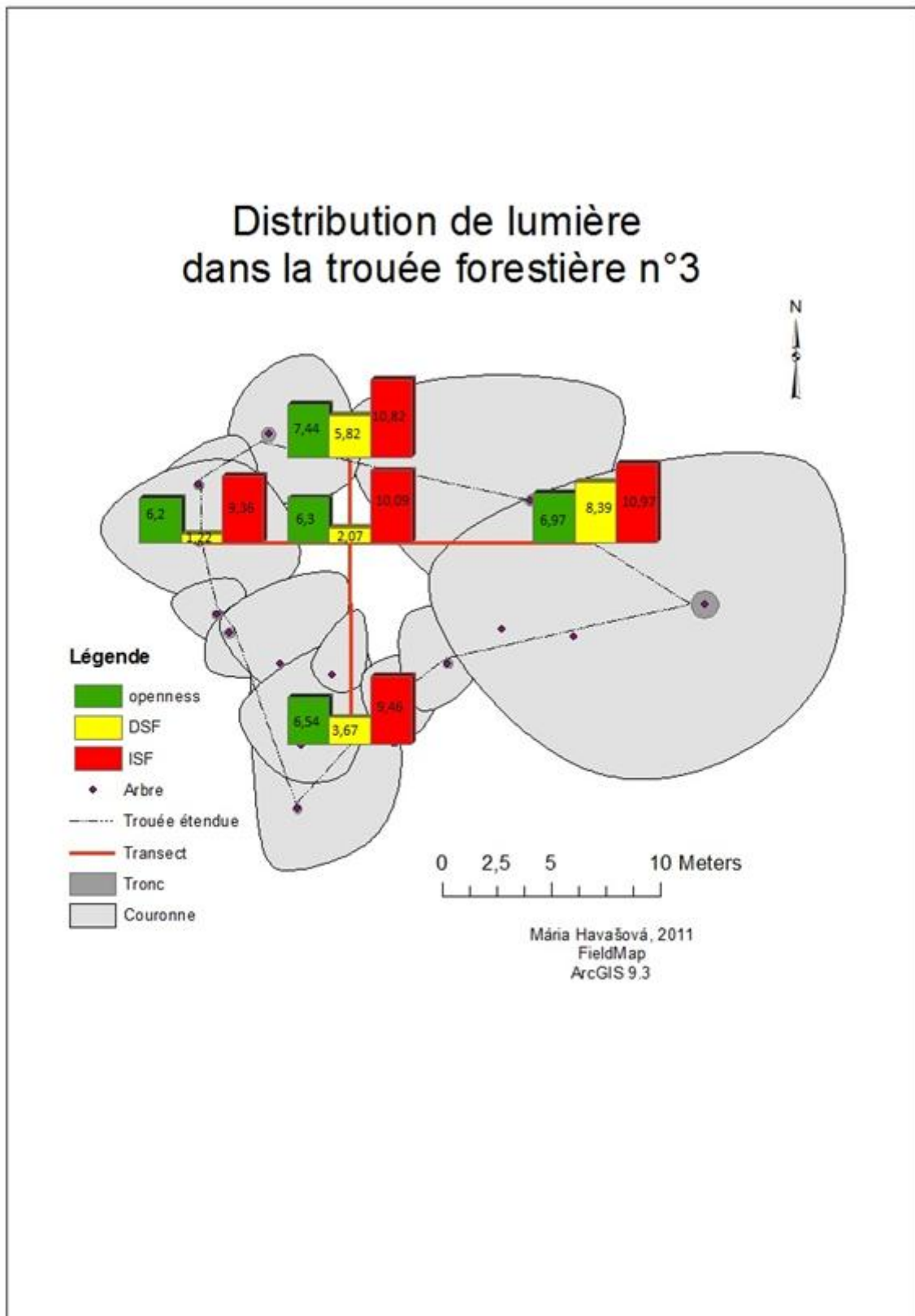


Figure 18 : Distribution de lumière dans la trouée forestière

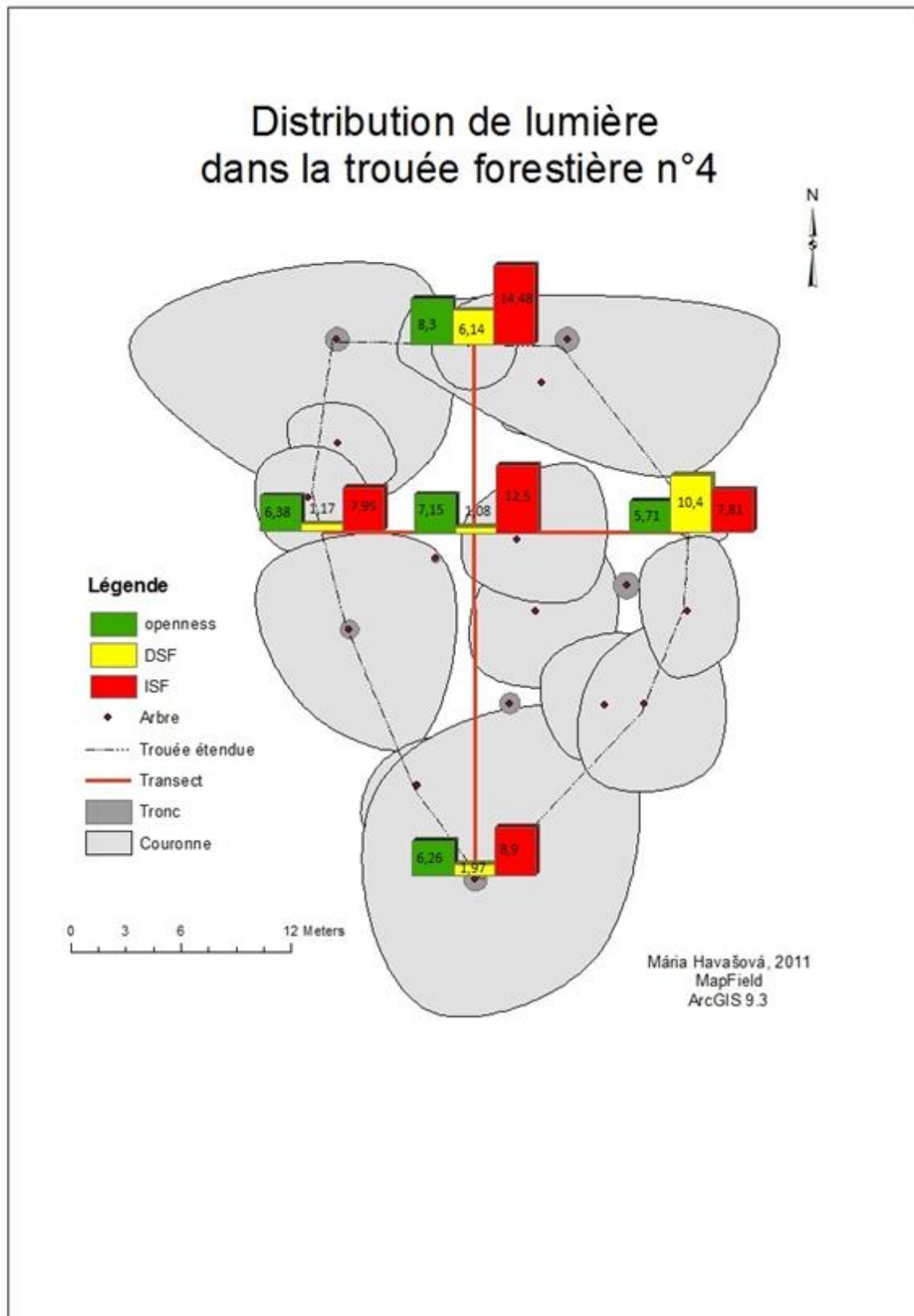


Figure 19 : Distribution de lumière dans la trouée forestière

## Distribution de lumière dans la trouée forestière n°5

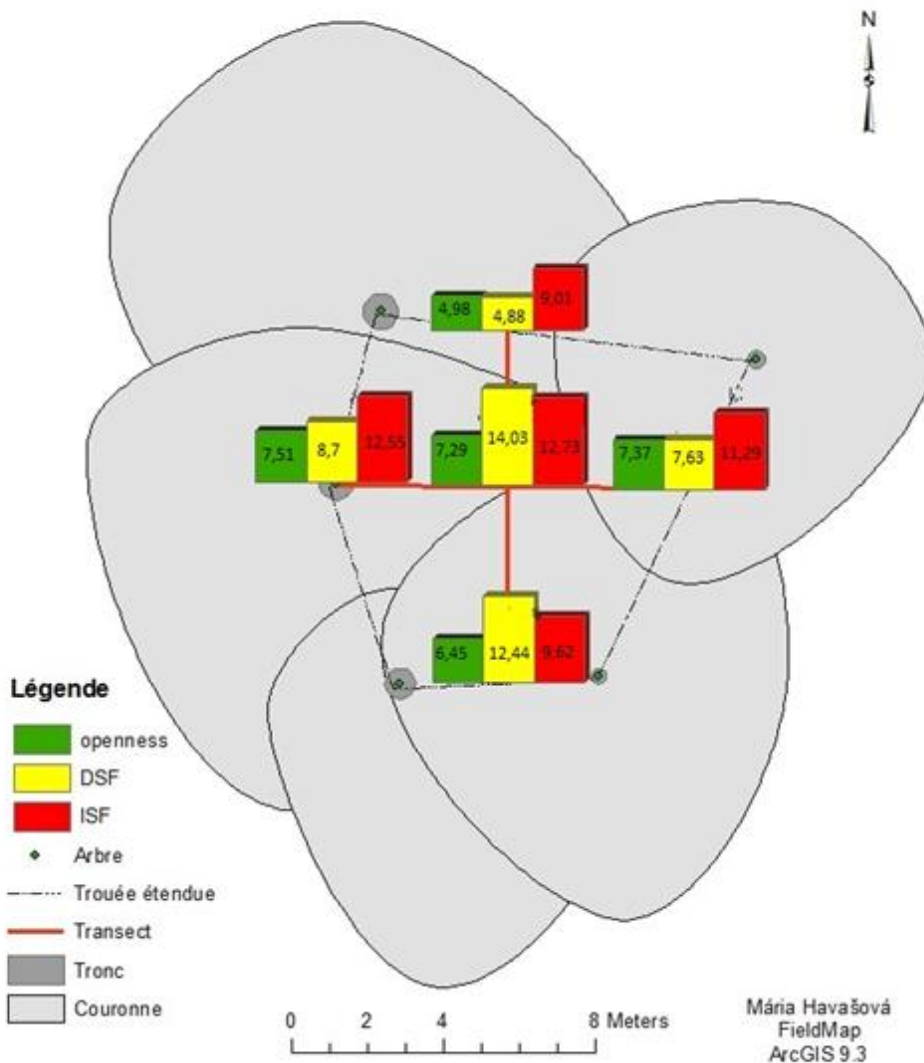


Figure 20 : Distribution de lumière dans la trouée forestière

---

## RESUME

L'apparition des trouées forestières dans le milieu de forêt naturelle permet la meilleure pénétration de la lumière dans le peuplement. Cet effet permet le développement des espèces de la régénération naturelle qui ont germiné avant l'ouverture de la voûte et peuvent exister les premières années de leurs vie au-dessous de la canopée bien fermée. Dès l'ouverture de la voûte, ces semis commencent à attendre l'incrément en diamètre et en hauteur.

Pendant ma recherche j'essaie de déterminer la relation entre les radiations solaires directes et indirectes et l'incrément en hauteur pour *Fagus sylvatica* L. et *Acer pseudoplatanus* L. En utilisant les photographies « fisheye », il est possible de caractériser la quantité de lumière diffusé (*ISF: indirect site factor*). et directe (*DSF : direct site factor*) dans l'endroit où le cliché était pris. La mesure des incréments était effectuée dans les 5 trouées forestières en gradients Nord-Sud, Ouest-Est. Les incréments d'origine étaient recalculés aux incréments réduits.

Une forte dépendance a été prouvée entre l'ouverture de la canopée (*openness*) et le facteur indirect de site (*ISF*). La régression linéaire a également confirmé une relation entre la quantité de lumière et l'incrément en hauteur pour les deux espèces étudiées mais une dépendance très faible. ANOVA a indiqué l'effet négatif de grandes quantités des radiations solaires directes sur la croissance verticale du hêtre. Pour l'érable, il n'était pas possible de mettre les résultats en évidence. La théorie sur les allongements plus élevés au Nord de trouée que dans les autres parties était prouvée.