

Etude de stage

Forêt Irrégulière École



**Caractérisation verticale des dendro-microhabitats et comparaison
d'inventaires effectués depuis le sol et par grimpe d'arbre**

Avril - Mai 2023

Mathéo MOSNIER

Master 1 *Agrosciences, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt* (AETPF),
parcours *Bois Forêt et Développement durable* (BFD)

Remerciements

Un très grand merci à Laurine OLLIVIER (chargée de mission FIE) pour avoir soumis une offre de stage dans laquelle il était possible de proposer son propre sujet d'étude, pour avoir commandé mon pain tous les mardis, pour m'avoir fait découvrir la gestion irrégulière et pour m'avoir conseillé et guidé durant ce projet.

J'adresse également ma reconnaissance à Aurélie WAHL (chargée de communication FIE), Natacha FONTAINE et Antoine BROSSE (garde-monitrice·eur au Parc national de forêts) pour m'avoir aidé pour les inventaires de dendro-microhabitats au sol ; Benjamin COLONGES (arboriste-grimpeur élagueur) et David DESCHARMES (arboriste-grimpeur ONF) pour avoir accepté de grimper ses 65 hêtres et observé ses 1 383 microhabitats ; Yoan PAILLET (INRAE, LESSEM) pour ses précieux conseils et pour m'avoir donné un bon coup de main sur les analyses statistiques ; Rita BÜTLER (WSL), Morgan MARTIN (Parc national de forêts) et Éric LACOMBE (AgroParisTech) pour leur riches critiques sur l'étude ; toute l'équipe ONF de l'unité territoriale d'Auberive pour leur enthousiasme et leur accueil.

Je remercie aussi vivement et très chaleureusement : Aurélie encore, Carole ALLARD DE GRANDMAISON (chargée de mission FIE) ainsi que tous les stagiaires de FIE et de l'ONF pour leur sympathie et les bons moments passés ensemble ; Agathe GONNET (étudiante en anthropologie de l'environnement) pour toutes ces discussions et son approche sociologique de la grimpe d'arbre.

Enfin, merci aussi au Centre d'Initiation à la Nature (CIN) pour m'avoir loué une roulotte pendant deux mois et demi ; Dorine DESALME et Bruno FERRY pour avoir fait que ce stage puisse voir lieu ; Philippe GERARDIN pour avoir signé ma convention ; Laurence BENINI et Laetitia HARY pour leur appui administratif.

SOMMAIRE

Remerciements

Liste des abréviations

Introduction	1
Matériels et méthodes.....	3
<i>Site d'étude</i>	3
<i>Choix et identification des arbres</i>	3
<i>Listes des dendromicrohabitats (DMH)</i>	4
<i>Réalisation effective des inventaires</i>	4
<i>Analyse statistique</i>	5
Résultats	6
Discussion	11
<i>Explications des différences observées</i>	11
<i>Biais et limites</i>	13
<i>Discussion sur la méthode de grimpe d'arbres</i>	14
<i>Perspectives de recherche et d'application</i>	14
Conclusion.....	15
Liste bibliographique.....	16
Résumé	18
Annexes	19

Liste des abréviations

DBH : *Diameter at Breast Height* = diamètre à hauteur de poitrine (1.30 m)

DMH : Dendro-microhabitats

FIE : Forêt Irrégulière École

ONF : Office National des Forêts

PSDRF : Protocole de Suivi Dendrométrique des Réserves Forestières

RBI : Réserve Biologique Intégrale

SD : *Standard Deviation* = écart-type

Introduction

En Europe, les écosystèmes forestiers abritent plusieurs milliers d'espèces (Vallauri & Berenger, 2009) dont l'Homme qui en est pleinement dépendant pour les ressources (bois, eau, venaison, etc.), la régulation (climat, crue, érosion, etc.), divers services immatériels (santé, éducation, contemplation, etc.) et leur rôle de soutien (cycle biogéochimique, biodiversité, etc.) (Reid et al. 2005). Cependant, les changements globaux, dont l'effondrement de la biodiversité, l'obligent à nouer une nouvelle relation avec le monde vivant. Il convient notamment d'adapter la gestion forestière afin de (ré)apprendre à vivre avec les forêts en limitant les dérangements et sans les épuiser ni affecter leur capacité de résilience (Gavinet et al., 2016 ; Kramer, 2007). Or, les nouvelles réflexions sur les changements de pratiques forestières ne peuvent – pour être efficaces – se faire que conjointement à la compréhension de ces écosystèmes complexes.

Pour cela, les inventaires sont d'importants outils dans l'estimation de la ressource et la compréhension des dynamiques forestières. Leur fréquence et leurs usages se développent au-delà même des missions scientifiques et sont de plus en plus intégrés dans les opérations courantes des gestionnaires forestiers. Les inventaires mesurent divers paramètres qui peuvent se traduire en indicateurs, rendant perceptibles des tendances et de nouvelles informations non immédiatement détectables et/ou de large ampleur. « *En ce sens, l'intérêt d'un indicateur donné s'étend au-delà de ce qui est effectivement mesuré pour englober un phénomène plus large.* » (Paillet, 2018). Dans le cas de la biodiversité forestière, les suivis par espèces étant trop coûteux, les indicateurs trouvent là tout leur intérêt. Il existe plusieurs indicateurs indirects de la biodiversité forestière comme le bois mort, les gros arbres ou encore les dendro-microhabitats (Asbeck et al., 2021 ; Paillet, 2018). C'est à ces derniers que s'intéresse cette étude.

Les dendro-microhabitats (DMH), littéralement : « petits habitats des arbres », sont des singularités morphologiques distinctes, généralement de petites dimensions, portés par des arbres sur pied vivants ou morts (cavités, fentes d'écorce, nids, etc.). Ces structures constituent pour des espèces ou communautés d'espèces un substrat ou site de vie pendant au moins une partie de leur cycle de vie pour se développer, se nourrir, s'abriter ou se reproduire. Ce sont des habitats très dynamiques qui se renouvellent fortement, car, bien souvent, les résidents de ces DMH participent activement à leur disparition (Larrieu, 2014). Il y a une dépendance – parfois totale – des habitants à leur microhabitat (Hanski, 2005). Les DMH jouent un rôle majeur pour la biodiversité car ils constituent toute ou partie de la niche écologique d'un nombre important de taxons. A titre d'exemple, 2300 espèces vivent sur les chênes pédonculés (*Quercus robur*) et sessiles (*Q. petraea*) dont 326 en dépendent exclusivement (Fodor & Hâruța, 2016 ; Michelot

et al., 2021). Et, 50% des chênes pédonculés (*Q. robur*) âgés entre 200 et 300 ans portent au moins une cavité (Ranius et al., 2009).

L'intérêt naturaliste et scientifique pour les microhabitats est ancien, mais retrouve un intérêt récent (Martin et al., 2022) en tant qu'indicateur de biodiversité (Basile et al., 2020 ; Paillet, 2018 ; Larrieu et al., 2019) et du degré de naturalité d'une forêt (Winter & Möller, 2008 ; Vuidot et al., 2011 ; Asbeck et al., 2021). C'est pourquoi leur intégration est aujourd'hui de plus en plus fréquente dans les schémas de gestion durable (certifications, documents de gestion, etc.), dans les outils de diagnostic tel que l'Indice de naturalité (WWF, Rossi & Vallauri, 2013) et l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP, Larrieu & Gonin, 2009) ou encore les inventaires forestiers (Bruciamacchie et al., 2007 ; Savoie et al., 2013 ; Quarteroni, 2016). Étudier dans les conditions les plus naturelles possibles (forêts sub-naturelles, vieilles forêts, etc.), les DMH permettent de suivre la dynamique forestière de près pour adapter au mieux notre gestion car « *l'observation des dynamiques naturelles dans les forêts peu anthropisées constitue des données de référence et permet d'inspirer nos pratiques pour assurer la durabilité de la gestion forestière. En effet, les forêts sont des écosystèmes autonomes et une gestion copiant les processus naturels est gage de durabilité des services rendus.* » (Larrieu et al., 2016).

La compréhension du fonctionnement et de la dynamique des DMH est complexe et nécessite des études s'intéressant aux caractères spatio-temporels de ces derniers. La distribution et l'observation du caractère vertical des DMH en forêt sont encore peu étudiées. Si quelques travaux se sont penchés verticalement sur certains DMH individuels comme les cavités de pics (Steich et al., 2016), les dendrotelmes (Gossner & Petermann, 2022) ou les épiphytes (Li et al., 2017), il n'y a, à ce jour, aucune caractérisation verticale complète de l'ensemble des DMH. De plus, malgré des efforts quant à la standardisation des méthodes de relevés (Larrieu et al., 2017 ; Kraus et al., 2016) et la mise en exergue des biais d'observateurs lors de l'identification des DMH (Paillet et al., 2014), un changement de point de vue passant du sol à la hauteur des arbres n'a jamais été expérimenté. Les DMH étant toujours inventoriés depuis le sol – alors qu'ils sont pourtant présents sur toute la hauteur des arbres – on ne connaît pas leur répartition verticale globale ni l'exactitude et le biais des observations faites depuis le sol.

Compte tenu de ce manque d'études sur l'aspect vertical des DMH et la pertinence d'un changement de perspective de l'observateur, cette étude exploratoire a pour double objectif de (i) comparer et quantifier les différences d'identification des DMH qu'oblige une caractérisation depuis le sol par rapport à une caractérisation depuis la hauteur des arbres et (ii) établir une première répartition verticale – du collet à la cime – à la fois qualitative et quantitative des DMH forestiers. Il est attendu que l'identification depuis la hauteur des arbres soit plus exacte

et exhaustive, suivant la nature des DMH et globalement, par rapport à une identification depuis le sol. L'inventorisation verticale des DMH a été accomplie à l'aide des techniques de grimpe d'arbres des arboristes-grimpeurs (Ambiehl et al., 2016) dont les avantages et inconvénients, seront discutés.

Matériels et méthodes

Site d'étude

L'étude a eu lieu dans un vallon orienté Sud-Est du plateau calcaire de la Réserve Biologique Intégrale (RBI) du Bois des Roncés (X : 47.757506, Y : 5.085947 ; Alt : 400m). S'étendant sur 234.06 ha, la réserve fait partie de la forêt domaniale d'Auberive (52160), située au cœur du Parc national de forêts (ANNEXE 1). L'impact de la gestion forestière n'étant pas la problématique de ce travail et cherchant à maximiser la probabilité de présence de DMH (ordinaires et extraordinaires), la RBI – non-exploitée depuis 50 ans – a été choisie comme terrain d'étude.

Choix et identification des arbres

Le choix d'un arbre pour l'étude devait répondre à un compromis entre trois paramètres ; (i) un diamètre le plus important possible – le nombre de DMH étant corrélé positivement à la taille de l'arbre (Larrieu & Cabanettes, 2012 ; Vuidot et al., 2011) –, (ii) une même essence (Larrieu & Cabanettes, 2012) – l'effort d'échantillonnage (= le nombre d'arbres inventoriés) étant plafonné par le temps disponible de grimpeurs (= personnes qui réalisent l'inventaire en hauteur), lui-même limité par des questions financières – et (iii) une distance aux autres arbres la plus réduite possible – afin de limiter les variables stationnelles et la perte de temps de déplacements durant les inventaires. Tenant compte de ces trois conditions et de la réalité stationnelle, l'étude s'est portée sur 65 hêtres (*Fagus sylvatica*) d'au moins 60 cm de diamètre (abrégié DBH pour « *Diameter at Breast Height* »). La hauteur moyenne des hêtres étudiés est de 26.9 m (SD \pm 2.6 m).

Afin de retrouver plus facilement les arbres si d'autres études venaient à se développer dans le futur, la majorité des arbres ont été identifiés sur le réseau de placettes permanentes du Protocole de Suivi Dendrométrique des Réserves Forestières (PSDRF, Bruciamacchie et al., 2007) installé depuis 2008 dans la RBI. Au besoin, d'autres placettes (nommées *bis*) ont nouvellement été créées. Chaque arbre a été identifié par un numéro unique et un DBH (mesuré à l'aide d'un mètre ruban), un azimut (mesuré à l'aide d'une boussole Suunto) et une distance (mesurée à l'aide d'un télémètre Vertex IV) ont été mesurés à partir du centre de la placette la

plus proche. Ces dernières étant elle-même matérialisée par des coordonnées GPS et un fer à béton enfoncé dans le sol (pour qu'il puisse être retrouvé à l'aide d'un détecteur de métaux).

Listes des dendromicrohabitats (DMH)

La liste standardisée des DMH (Larrieu et al., 2017) comprend trois niveaux hiérarchiques de précision organisés respectivement en 7 formes, 15 groupes et 47 types. Dans cette étude, le niveau de précision maximal a été choisi ; soit les 47 types. Pour faciliter leur notation, un code est défini d'après la nomenclature de Kraus et al. (2016). Chaque DMH est caractérisé par une ou plusieurs dimensions seuils (diamètre, profondeur, surface, longueur, largeur. **Tab. I**).

Réalisation effective des inventaires

Déployé sur un mois, chaque hêtre étudié a connu deux évaluations indépendantes de ses DMH ; une première depuis le sol et une seconde à hauteur d'arbres. Si les hêtres étaient dépourvus de leurs feuilles durant la majorité de l'étude, lors de la dernière semaine et demie d'inventaire en hauteur les bourgeons ont débourrés (30 arbres sur 65 ont été inventoriés en hauteur en feuilles).

Pour chaque arbre, les opérateurs (qu'ils soient au sol ou en hauteur) devaient procéder au recensement des DMH et à la mesure de leur hauteur. Cependant en présence de lierre ou de mousse, dont l'étalement est important, les hauteurs n'ont pas été mesurées. Les seuils de 10% ont été comptabilisés sur la totalité de l'arbre. Les écorces décollées verticalement ont été comptabilisées comme ouvertes vers le bas (IN13). Les observateurs avaient à leur disposition la liste des DMH agrémentée des seuils et des codes correspondants (**Tab. I**, ANNEXE 2), ainsi qu'une fiche de notation (ANNEXE 3) à compléter pour chaque arbre. Cette fiche comprend les renseignements suivants : le nom de l'observateur, le nombre d'arbres précédemment inventoriés par l'observateur (afin de tenir compte de sa familiarité avec le protocole), la date, l'heure, le temps d'observation, l'état du ciel (luminosité, couvert nuageux, etc.), la hauteur et un numéro unique de l'arbre, enfin, les codes des DMH observés avec leur hauteur correspondante. Les hauteurs – des arbres et des DMH – ont été mesurées, au sol à l'aide d'un télémètre Vertex IV uniquement, et, en hauteur par un télémètre Vertex IV et par un télémètre laser. Afin d'évaluer les seuils des DMH, les observateurs au sol étaient équipés de jumelles binoculaires et les grimpeurs d'un mètre ruban gradué. Des niveaux d'expertises et des affinités différentes entre observateurs pouvant amener des biais (Paillet et al., 2014), une explication du protocole, une présentation des DMH et un temps d'entraînement de reconnaissance des DMH au sol a été exposé aux opérateurs afin de leur assurer une base de connaissance minimale commune et ainsi limiter les erreurs et oublis. Cette étape a duré une demi-journée.

Les inventaires au sol ont été effectués sur une semaine en binôme (Paillet et al., 2014) avec l'auteur de l'étude, par deux gardes-moniteurs du Parc national de forêts et une chargée de communication FIE. De plus, ils ont été réalisés indépendamment et en amont des inventaires en hauteur. Le temps moyen passé par arbre lors d'inventaire au sol était de 10.3 min (SD \pm 4.1 min). Les inventaires en hauteur ont, quant à eux, mobilisé deux grimpeurs d'arbres : un grimpeur ONF et un élagueur. Ils ont été effectués sur 10 jours réels et 14 jours rapportés par grimpeur (4 jours avec les deux grimpeurs et 6 jours avec un seul grimpeur). Selon les habitudes des grimpeurs deux techniques de grimpe d'arbre ont été utilisées (SRT pour *Single Rope Technique* et DRT pour *Doubled Rope Technique*). Dans le cadre de ce protocole, elles étaient équivalentes en termes de temps et de mobilité dans les arbres. Les deux techniques consistent à installer un point d'ancrage le plus haut possible dans l'arbre (la hauteur étant définie par le diamètre de tronc minimal, l'architecture de l'arbre, etc.), de grimper jusqu'à ce point puis de faire l'inventaire visuel des DMH en descendant le long de la corde tout en se déplaçant dans l'arbre. Le temps moyen passé par arbre lors d'inventaire par grimpe d'arbre était de 11.7 min (SD \pm 5.8 min).

Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées sous la version 4.1.1 de R (R Core Team, 2021) avec le choix d'un risque d'erreur alpha à 5 % (p-value < 0.05). L'ensemble des analyses ont été modélisées par des Modèles Linéaires Généralisés à effets Mixtes (GLMM), en utilisant la fonction « glmmTMB » du package R du même nom (Brooks et al., 2017). En effet, les GLMM peuvent traiter des données distribuées de manière non gaussiennes et incorporer des effets aléatoires. Le plan d'échantillonnage reposant ici sur des relevés doubles des mêmes arbres (au sol et par grimpe), un effet aléatoire « arbre » a été ajouté à toutes les analyses pour tenir compte du fait qu'un DMH observé sur un arbre donné a plus de chances d'être observé sur cet arbre par un autre observateur que sur un autre arbre.

Parmi les 35 types de DMH observés dans cette étude, 13 types n'ont pas été pris en compte dans les analyses statistiques (CV14, CV21, CV22, CV42, CV43, DE12, IN22, IN21, IN23, IN25, SE12, SE31 et EP1) car présents sur trop peu d'arbres ($n \leq 6$). En outre, les trois types de cavités de pics (CV11, CV12 et CV13) ont été regroupées sous le code « CV1 ». Ainsi, seuls 20 DMH ont été conservés dans l'analyse des différences du nombre de DMH observées entre sol et grimpe d'arbre. Les différences pouvant être positives comme négatives, la fonction de lien du GLMM était ici gaussienne (family = gaussian). Le calcul de la variation de différence est exprimé en pourcentage de DMH vu par grimpe d'arbres par rapport au sol :

$variation = ((nombre\ du\ DMH\ vu\ par\ grimpe\ d'arbres - nombre\ de\ DMH\ vu\ depuis\ le\ sol) / nombre\ du\ DMH\ vu\ par\ grimpe\ d'arbres) * 100.$

Concernant la répartition verticale des DMH, sur les 20 DMH restant 5 ont encore été supprimés car inutiles (CV44, SE11 et SE13) ou présents en trop faible nombre ($n \leq 10$. CV1 et OT). Par la suite, les hauteurs moyennes des observations suivant le type d'inventaire ont été comparées ; tous DMH confondus d'abord et, pour chaque DMH ensuite. Dans les deux cas, les GLMM ont été appliquées avec une fonction de lien logarithmique (family = log) et en ajoutant un epsilon négligeable ($\varepsilon = 0.001$) à la valeur de hauteur afin qu'il n'y ait pas de valeurs nulles. Les observations sont des données de comptage (sans valeur négatives) par conséquent, une distribution gaussienne n'est pas appropriée. Cependant, dans le cas des comparaisons multiples des moyennes des hauteurs de chaque DMH, pour que les GLMM fonctionnent, le couple (sol et grimpe) de jeu de données par arbre ne devait pas contenir de valeurs de hauteur manquantes. 9 types de DMH ont ainsi dû être supprimés car ils contenaient des valeurs de hauteur qui n'avaient pas été mesurées ou repérées dans un seul des deux inventaires (CV3, CV41, DE11, DE13, EP23, GR21, SE11, SE13 et SE32). A la suite de cette opération, il reste 11 DMH. Enfin, pour évaluer si cette relation variait en fonction du type de DMH, le test post hoc de comparaisons multiples des Moyennes Marginales Estimées (EMMs) a été exécuté grâce à la fonction « emmeans » du package éponyme (Lenth, 2022).

Résultats

Table I : Liste, nomenclature (d'après Larrieu et al., 2017 et Kraus et al., 2016) et nombre d'observations des dendromicrohabitats (DMH). En gris, les DMH non observés dans l'étude. Ø diamètre ; ↓ profondeur ; □ = surface ; o = ouverture ; L = longueur ; B = largeur.

Forme	Groupe	Type	Code	Nombre d'observations	
				Grimpe	Sol
Cavités	Loges de pic	Loge de petite taille (Ø < 4 cm)	CV11	2	6
		Loge de taille moyenne (Ø < 4-7 cm)	CV12	3	2
		Loge de grande taille (Ø > 10 cm)	CV13	1	
		« Flûte » de pic (≥ 3 loges en ligne, Ø ≥ 3 cm)	CV14		1
	Cavités à terreau	Cavité à terreau de pied (Ø > 10 cm)	CV21		3
		Cavité à terreau de tronc (Ø > 10 cm)	CV22	3	1
		Cavité à terreau semi-ouverte (Ø > 30 cm)	CV23		
		Cavité à terreau, avec/ sans contact avec le sol, ouverte vers le haut (Ø > 30 cm)	CV24		
		Branche creuse (Ø > 10 cm)	CV25	171	35
	Orifices et galeries d'insectes	Orifices et galeries d'insectes (Ø > 2 cm ou □ > 300 cm ²)	CV3	23	
Concavités	Dendrotelme (Ø > 15 cm)	CV41	26		
	Trou de nourrissage de pic (↓ > 10 cm, Ø > 10 cm)	CV42	1		

		Concavité à fond dur de tronc ($\downarrow > 10$ cm, $\emptyset > 10$ cm)	CV43	3	
		Concavité racinaire ($\emptyset > 10$ cm, pente de toit $< 45^\circ$)	CV44	205	118
Blessures et bois apparents	Aubier apparent	Bois sans écorce ($\square > 300$ cm ²)	IN11	42	6
		Blessure due au feu ($\square > 600$ cm ²)	IN12		
		Écorce décollée formant un abri (ouvert vers le bas) ($o > 1$ cm, $L > 10$ cm, $B > 10$ cm)	IN13	70	32
		Écorce décollée formant une poche (ouverte vers le haut) ($o > 1$ cm, $L > 10$ cm, $B > 10$ cm)	IN14	28	4
	Aubier et duramen apparents	Cime brisée ($\emptyset > 20$ cm)	IN21	1	1
		Bris de charpentière au niveau du tronc avec bois de cœur apparent ($\square > 300$ cm ²)	IN22	3	3
		Fente ($L > 30$ cm, $B > 1$ cm, $\downarrow > 10$ cm)	IN23	1	3
		Fente causée par la foudre ($L > 30$ cm, $B > 1$ cm, $\downarrow > 10$ cm)	IN24		
		Fente au niveau d'une fourche ($L > 30$ cm)	IN25	1	
Bois mort	Bois mort dans le houppier	Branches mortes ($\emptyset > 10$ cm)	DE11	380	230
		Cime morte ($\emptyset > 10$ cm)	DE12	2	
		Vestige de charpentière brisée ($\emptyset > 20$ cm, $L > 50$ cm)	DE13	82	15
Excroissances	Agglomérations de gourmands ou de rameaux	Balais de sorcière ($\emptyset > 50$ cm)	GR11		
		Gourmands / Brogne (> 5 gourmands)	GR12	25	5
	Loupes et chancres	Loupe ($\emptyset > 20$ cm)	GR21	11	9
		Chancre ($\emptyset > 20$ cm)	GR22		
Sporophores de champignons et myxomycètes	Sporophores de champignons pérennes	Polypore pérenne ($\emptyset > 5$ cm)	EP1	4	4
	Sporophores de champignons éphémères et myxomycètes	Polypore annuel ($\emptyset > 5$ cm ou > 10)	EP21	16	5
		Agaricale charnue ($\emptyset > 5$ cm ou > 10)	EP22	63	5
		Pyrénomycètes ($\emptyset > 3$ cm ou $\square > 100$ cm ²)	EP23	22	
		Myxomycètes ($\emptyset > 5$ cm)	EP24		
Structures épiphytiques, épixyliques ou parasites	Plantes et lichens épiphytiques ou parasites	Bryophytes ($\square > 10\%$ du tronc)	SE11	61	64
		Lichens foliacés ou fruticuleux ($\square > 10\%$ du tronc)	SE12	1	
		Lierre ou lianes ($\square > 10\%$ du tronc)	SE13	29	33
		Fougères (> 5 frondes)	SE14		
		Gui ($\emptyset > 20$ cm)	SE15		
	Nids	Nid de vertébré ($\emptyset > 10$ cm)	SE21	10	3
		Nid d'invertébré (présence)	SE22		
	Microsols	Microsol d'écorce (présence)	SE31		2
		Microsol du houppier (présence)	SE32	89	
Exsudats	Coulées de sève et de résine	Coulée de sève ($L > 10$ cm)	OT	4	5
		Coulée de résine ($L > 10$ cm)	/		
Total				1383	583

Parmi les 35 types de dendro-microhabitats (DMH) observé, 2.37 fois plus ont été observé par grimpe d'arbres que depuis le sol. La méthode par grimpe d'arbres a permis d'observer 32 DMH alors que la méthode d'observation depuis le sol, seulement 26. Une forte disparité du nombre d'occurrence entre les DMH est à noter (**Tab. I**).

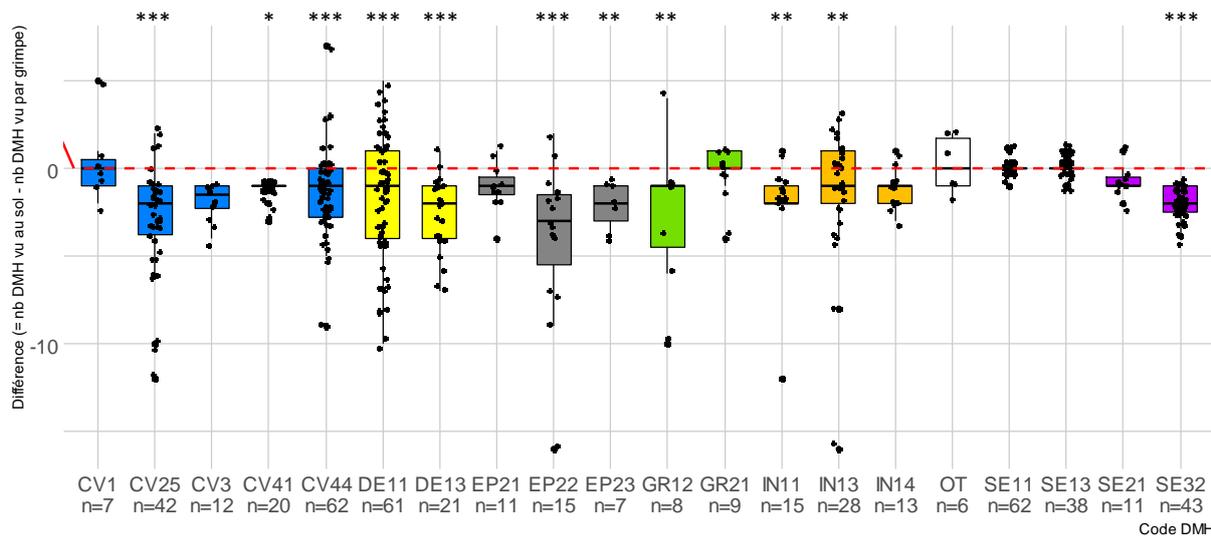


Figure 1 : Répartition de la différence du nombre de dendro-microhabitats (DMH) observé (nombre de DMH vu au sol – nombre de DMH vu en hauteur) chez le hêtre (*Fagus sylvatica*), suivant le type de DMH. Le code DMH suit la nomenclature de Kraus et al. (2016). La ligne en pointillé rouge marque la différence 0. Les couleurs correspondent aux formes des DMH (bleu = cavités, jaune = bois mort, gris = sporophores de champignons, vert = excroissances, orange = blessures, blanc = coulées de sève, violet = structures épiphytiques ou épixyliques). Les points noirs représentent les n arbres sur lesquels les DMH ont été repérés. Les boîtes sont délimitées par le 25^{ème} le 75^{ème} percentile, la barre noire centrale représente la médiane (IQR), les moustaches sont respectivement le minimum ($Q1-1.5*IQR$) et le maximum ($Q3-1.5*IQR$). * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

L'analyse de la différence du nombre de dendro-microhabitats (DMH) observés entre le sol et la hauteur pour chaque arbre permet d'apprécier le fait que globalement, plus de DMH sont repérés en hauteur qu'au sol (**Fig. 1**). Ensuite, en regardant indépendamment chaque DMH avec plus en précision, on observe que sur les 20 représentés, 11 DMH montrent une différence significative négative entre les inventaires (**Tab. II**). Autrement dit, 11 DMH sont significativement mieux repérés par grimpe d'arbre que depuis le sol. Parmi les différences les plus significatives (**Tab. II**, $p \leq 0.001$) se trouvent les trous de branche (CV25), les concavités racinaires (CV44), les branches (DE11) et charpentières mortes (DE13), les agaricales charnues (EP22) et les microsols du houppier (SE32). Les dendrotelmes (CV41, **Tab. II**, $p = 0.048$), les pyrénomycètes (EP23, **Tab. II**, $p = 0.004$), les brogues (GR12, **Tab. II**, $p = 0.001$), les bois sans écorce (IN11, **Tab. II**, $p = 0.006$) et les décollements d'écorce ouvert vers le bas (IN13, **Tab. II**, $p = 0.008$) sont aussi significativement différents.

Table II : Effet du type de dendro-microhabitats (DMH) sur la différence d'observation entre les inventaires (sol-grimpe). Résultat des Modèles Linéaires Généralisés à effets Mixtes (GLMM) sur 491 observations avec comme effet aléatoire le nombre d'arbre ($n = 63$). $\sigma^2 = 4.49$. SE : erreur standard. ns > 0.05 ; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$.

Type de DMH	Estimation	SE	p-value	Significativité
CV1	0.317	0.841	0.706	ns
CV25	-2.737	0.351	< 0.001	***
CV3	-1.210	0.644	0.060	(*)
CV41	-0.990	0.501	0.048	*
CV44	-1.336	0.292	< 0.001	***
DE11	-1.758	0.295	< 0.001	***
DE13	-2.370	0.490	< 0.001	***
EP21	-0.584	0.669	0.383	ns
EP22	-3.376	0.577	< 0.001	***

EP23	-2.418	0.836	0.004	**
GR12	-2.544	0.783	0.001	**
GR21	-0.108	0.739	0.884	ns
IN11	-1.824	0.577	0.006	**
IN13	-1.130	0.425	0.008	**
IN14	-0.841	0.617	0.173	ns
OT	0.862	0.902	0.339	ns
SE11	0.051	0.292	0.861	ns
SE13	0.116	0.367	0.752	ns
SE21	-0.350	0.670	0.601	ns
SE32	-1.947	0.347	< 0.001	***

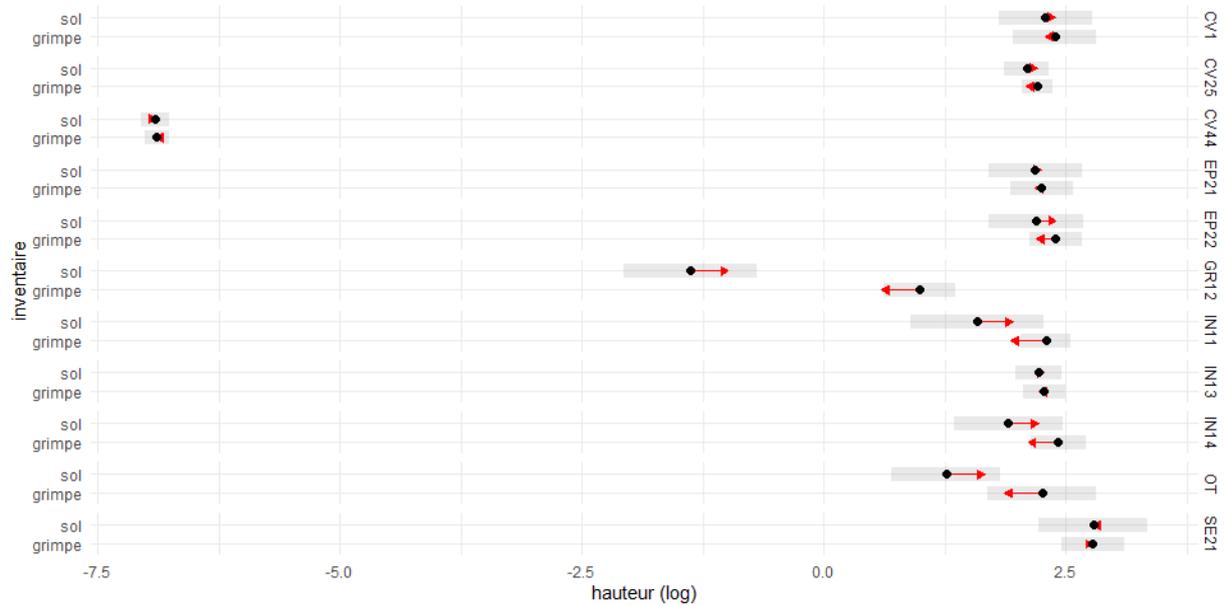


Figure 2 : Comparaison des hauteurs moyennes des dendro-microhabitats (DMH) suivant le type d'inventaire. Le code DMH suit la nomenclature de Kraus et al. (2016). Les barres bleues sont les intervalles de confiance des moyennes estimées et les flèches rouges permettent la comparaison ; si deux flèches se recoupent, alors la différence entre les deux moyennes n'est pas significative. Chaque type de DMH se compare indépendamment les uns des autres.

Afin d'évaluer l'effet de la hauteur sur l'identification des DMH, les hauteurs moyennes ont été comparées entre les deux modes d'inventaires. La hauteur moyenne des DMH observés par grimpe d'arbre est environ 1.60 m (Tab. III, $\sqrt{\sigma^2} = \sqrt{2.56} = 1.60$) plus haut que la moyenne des hauteurs des DMH observés depuis le sol ($p < 0.021$, Tab. III). Seulement, en regardant dans le détail, la distinction par DMH permet d'apprécier le fait que cette différence n'est, en réalité due, qu'à deux types de DMH parmi ceux comparés (Fig. 2). Seules les moyennes de hauteur des brogues (GR12, Tab. IV, $p < 0.001$) et des coulées de sèves (OT, Tab. IV, $p = 0.014$) sont significativement différentes en fonction des deux modes d'inventaires (Tab. IV). La grimpe d'arbres permettrait donc une meilleure identification à cause de la hauteur de ces deux DMH mais pas des cavités de pics (CV1), des trous de branches (CV25), des concavités racinaires (CV44), des polypores annuels (EP21), des agaricales charnue (EP22), des bois sans écorces (IN11), des écorces décollées ouvertes vers le bas (IN13) et vers le haut (IN14) et des nids de vertébrées (SE21, Tab. IV).

Table III : Comparaison des hauteurs moyennes de tous les DMH confondus selon l'inventaire. Résultat du Modèle Linéaire Généralisé à effets Mixtes (GLMM) sur 1661 observations avec comme effet aléatoire le nombre d'arbre (n = 63). $\sigma^2 = 2.56$. SE : erreur standard. * p < 0.05 ; ** p < 0.01 ; *** p < 0.001.

Inventaire	Estimation	SE	p-value	Significativité
Intercept	2.170	0.047	< 0.001	***
sol	-0.200	0.087	0.021	*

Table IV : Comparaison des hauteurs moyennes des chaque dendro-microhabitats (DMH) selon l'inventaire. Résultat du test post-hoc de comparaisons multiples des Moyennes Marginales Estimées (EMMs). SE : erreur standard. ns p > 0.05 ; * p < 0.05 ; ** p < 0.01 ; *** p < 0.001.

Type de DMH	Effectif sol	Effectif grimpe	Estimation	SE	p-value	Significativité
CV1	4	5	0.097	0.333	0.771	ns
CV25	17	39	0.113	0.144	0.433	ns
CV44	48	58	0.004	0.099	0.965	ns
EP21	4	9	0.061	0.298	0.838	ns
EP22	4	13	0.200	0.284	0.482	ns
GR12	2	7	2.366	0.398	< 0.001	***
IN11	2	14	0.712	0.375	0.058	(*)
IN13	17	20	0.057	0.164	0.726	ns
IN14	3	12	0.518	0.324	0.106	ns
OT	3	3	0.992	0.405	0.014	*
SE21	3	9	-0.006	0.331	0.985	ns

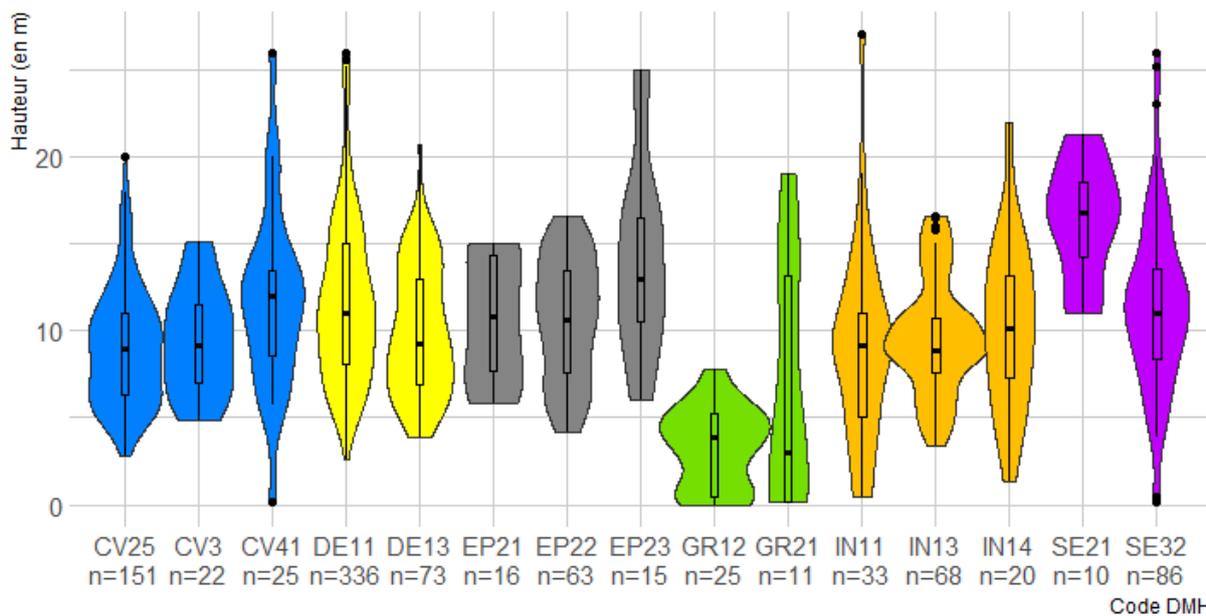


Figure 3 : Répartition verticale de chaque dendro-microhabitats (DMH) observé par grimpe d'arbre chez le hêtre (*Fagus sylvatica*). Le code DMH suit la nomenclature de Kraus et al. (2016). Les couleurs correspondent aux formes des DMH (bleu = cavités, jaune = bois mort, gris = sporophores de champignons, vert = excroissances, orange = blessures, blanc = coulées de sève, violet = structures épiphytiques ou épixyliques). Les boîtes sont délimitées par le 25^{ème} le 75^{ème} percentile, la barre noire centrale représente la médiane (IQR), les points noirs sont les valeurs extrêmes, les moustaches sont respectivement le minimum (Q1-1.5*IQR) et le maximum (Q3-1.5*IQR). L'écartement des diagrammes en violon représente la densité de DMH. L'effectif n est le nombre de DMH observés par grimpe d'arbre.

La répartition verticale de certains DMH de hêtre est présentée (Fig. 3). On remarquera que l'effectif varie fortement selon le type de DMH. A titre d'exemple, pour le plus extrême ; le nombre de nids de vertébrés (SE21) ou de brogues (GR12) varie d'un facteur 10 avec le nombre de branches mortes (DE11). A l'exception des brogues (GR12) et loupes (GR21), la plupart des DMH sont peu ou pas présents en dessous de 4 m de haut. En revanche, entre 5 m et 15 m, les hêtres sont porteurs de DMH importants tant en quantité qu'en diversité. Au-delà de 20 m, les DMH se font plus rares. Aussi, tous ne se répartissent pas verticalement de la même

façon, certains, comme les dendrotelmes (CV41), les bois sans écorce (IN11), les écorces décollées ouvertes vers le haut (IN14) ou encore les microsols de houppier (SE32) présentent une forte disparité. A l'inverse les orifices et galeries d'insectes (CV3), les polypores annuels (EP21), les brogues (GR12) ou les nids (SE21) se répartissent de manière plus concentrée. Très peu de DMH se retrouvent au-delà 25 m de haut (**Fig. 3**).

Discussion

Cette première étude comparative de deux modes d'inventaires des dendro-microhabitats (DMH) a permis de prouver que des inventaires réalisés à hauteur d'arbre par grimpe d'arbre sont plus exhaustifs que ceux réalisés classiquement depuis le sol (+57.8%).

Explications des différences observées

Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence et l'une des premières est la quantité et la qualité de l'observation. Lors d'un inventaire par grimpe d'arbres, avant même de débiter l'examen des DMH (qui s'effectue pendant la descente), le grimpeur est inévitablement amené à passer du temps au sol, à observer son arbre. Cette lecture l'oblige à porter un regard attentif sur l'environnement proche, l'architecture, la santé, l'aspect général et les dangers potentiels de l'arbre, afin de choisir une fourche de branche sécurisée pour l'ancrage de sa corde. Ensuite, durant l'ascension, le grimpeur continuera d'observer le support – donc l'arbre – sur lequel il grimpe. Et, bien que ce temps d'installation et d'ascension ne soit pas dédié à l'observation des DMH, le grimpeur en apercevra malgré lui et partira déjà avec des connaissances sur l'arbre qu'il va ensuite inventorier. Autrement dit, un inventaire par grimpe d'arbre ne fera qu'ajouter du temps (quantitatif) et des aspects d'observations (qualitatif), autre que la recherche de DMH, par rapport à un inventaire fait depuis le sol.

Cependant, une attention plus précise de la différence de nombre de DMH observé permet de remarquer que tous les DMH ne sont pas significativement mieux repérés par grimpe d'arbre. Parmi les 20 DMH où la différence a pu être quantifiée, seuls 11 DMH sont significativement moins repérés depuis sol. Cela nous amène à proposer une seconde explication quant à la différence d'identification ; la grimpe d'arbre entraîne un changement de perspective. Effectivement, regarder un arbre de haut est architecturalement très différent que de le regarder depuis le bas (observation personnelle). De fait, une vue en plongée permet une meilleure identification de tous les DMH d'un arbre malaisément visibles depuis le sol, car présents dans les fourches, creux, replats ou hauts de branches. Cela peut notamment être le cas des trous de branches (CV25, +79.5%), des dendrotelmes (CV41, +100%), des agaricales charnues (EP22, +92.1%), des pyrénomycètes (EP23, +100%) et des microsols du houppier (SE32, +100%).

De plus, la troisième raison est que la grimpe d'arbre permet un déplacement dans l'arbre pour à la fois s'assurer de la bonne présence d'un DMH, mais aussi pour mesurer sa ou ses valeurs-seuils. Un DMH et son observateur sont parfois distants de plusieurs mètres. Or, l'exploration du houppier d'un arbre a très probablement une influence sur l'identification des DMH comme les trous de branche (CV25, +79.5%), les branches (DE11, +39.5%) et charpentières mortes (DE13, +81.7%) et les écorces décollées ouvertes vers le bas (IN13, +54.3%), dont les valeurs-seuils peuvent être péniblement évaluables depuis le sol. En revanche, il est probable que la possibilité de mesurer des seuils, ne permet pas forcément d'être plus exhaustif, mais permet seulement une plus grande précision.

Malgré la tendance des DMH à être mieux identifiés par grimpe d'arbre que depuis le sol, ceux aux différences d'identification non-significatives affichent assez généralement une dispersion plus concentrée que les DMH aux différences significatives (**Fig. 1**). Ce qui peut amener à expliquer que leur taille importante – lierres (SE13), bryophytes (SE11), loupes (GR21) – ou leur apparence caractéristique – cavité de pic (CV1), polypore annuel (EP21), nids de vertébrés (SE21), coulés de sève (OT) – limitent les différences d'identification selon la méthode.

Enfin, afin de vérifier si la méthode par grimpe d'arbre est plus exhaustive parce qu'elle permet de repérer des DMH trop hauts pour être vus depuis le sol, les hauteurs moyennes des DMH selon l'inventaire ont été comparées. D'abord globalement puis distinctement pour 11 DMH. Parmi ces 11 DMH, seules les moyennes de hauteur des brogues (GR12) et des coulées de sèves (OT) étaient significativement différentes (**Tab. IV**), ce qui signifie que pour ces deux DMH, la grimpe d'arbre permettait effectivement de repérer les plus hauts non-visibles du sol. Cependant, le modèle utilisé n'évalue que partiellement l'effet de la hauteur car il ne fonctionne pas avec les DMH qui ont été vus uniquement par l'une des deux méthodes. C'est pourquoi, les dendrotelmes (CV41, +100%), les pyrénomycètes (EP23, +100%) et les microsols de houppier (SE32, +100%), uniquement repérés par grimpe d'arbre, n'ont, de fait, pas été pris en compte dans le modèle des hauteurs moyennes (**Fig. 2**). Ce sont pourtant des microhabitats qui n'ont pas été identifiés depuis le sol (+100%) et qui présentent des différences significatives entre les inventaires (**Tab. II**). Ainsi, bien que cela n'ait pas été testé statistiquement, on peut, sans trop prendre de risque, conclure qu'ils n'ont pas été identifiés car justement trop hauts pour un observateur au sol. En revanche, pour tous les DMH aux moyennes de hauteur non-significatives selon l'inventaire, l'explication qu'ils soient trop hauts pour être vus depuis le sol est à priori fautive (**Tab. 3**). Mis en parallèle avec la distribution verticale des DMH (**Fig. 3**), qui montre que la majorité des DMH se trouvent en dessous de 15 m de haut on comprendra que la hauteur ne soit peut-être pas la raison principale qui explique les différences

d'observations entre les deux méthodes. De tels modèles devraient à l'avenir être affinés afin de mieux distinguer quel est l'effet (ou les effets) qui entre le plus en compte dans la différence de ce qui est vu au sol et par grimpe d'arbres (temps d'observation, changement de perspective, possibilité de mesurer les seuils, apparences caractéristiques et effet de la hauteur). Les cinq hypothèses d'explications proposées ici, devront être vérifiées par des protocoles spécifiques à cela. Des méthodes identifiant chaque DMH individuel pourraient par exemple être mises en place afin de discerner plus précisément les causes des différences d'observations.

Si la distribution verticale des DMH (**Fig. 3**) peut aider à expliquer les différences, comme nous venons de le voir, l'explication des distributions verticale des DMH, peut être encore plus instructive. Bien souvent, la répartition des DMH en hauteur n'est pas surprenante ; par exemple, les trous de branches (CV25) se trouvent en 5 m et 8 m, ce qui correspond à la zone d'élagage naturel, les nids (SE21) se situe à plus de 11 m car les oiseaux préfèrent la hauteur pour se protéger des prédateurs du sol, les brogues (GR12) se retrouvent là où la lumière d'une trouée forestière permet l'émergence des bourgeons latents, etc. (**Fig. 3**). En revanche, pour certains DMH comme les orifices et galeries d'insectes (CV3), les différents champignons (EP21, EP22 et EP23) ou encore les écorces décollées (IN13 et IN14), l'explication de leur répartition est moins évidente. Mais arriver à expliquer les répartitions aidera à expliquer les différences d'observations – ou inversement.

Biais et limites

Les différences significatives d'identification suivant la méthode d'inventaire que présentent les concavités racinaires (CV44) et les brogues (GR12) sont curieuses, car, l'une comme l'autre, se situe dans des zones facilement visibles (tronc). Les concavités racinaires se situent par définition au sol et les brogues ne dépassent ici pas 7 m de haut (**Fig. 3**). Ces différences ne sont probablement imputables qu'à un biais opérateur qui persiste malgré un temps d'explication et d'homogénéisation du protocole dans la mesure des seuils notamment et à « l'œil » des observateurs qui s'est affiné au fur et à mesure de l'étude (analyse complémentaire). A l'avenir, un temps de formation à l'identification des DMH plus complet et par des personnes qualifiées devra avoir lieu.

Un autre biais important durant l'étude a été le débourrement des bourgeons qui s'est fait à la moitié de l'inventaire en hauteur avec pour effet qu'en feuilles, 15% de DMH de plus ont été vu qu'avant débourrement (analyse complémentaire). Cet effet est difficilement distinguable des autres (expertise, opérateur, etc.). La période et le temps impartis pour réaliser ce travail n'autorisaient pas la possibilité de supprimer ce biais phénologique.

Enfin, sur les biais, l'étude s'est déroulée en limite de RBI, par conséquent, il est probable que l'effet de la gestion alentour ait un impact sur la présence et la répartition des DMH des arbres en lisière de réserve.

Au sein des 47 types de DMH que prévoit le niveau 3 de la liste standardisée (Larrieu et al., 2017), 12 n'ont été identifiés ni depuis le sol, ni depuis la hauteur des arbres. La plupart étaient relatifs à des arbres morts sur pied ou de très mauvaise santé (fente, cavité à terreau ouverte vers le haut, trou de nourrissage de pic, etc.). L'étude s'étant concentrée aux arbres seins sur lesquels la grimpe d'arbres était possible, il n'y a là rien d'étonnant. Ensuite, plusieurs autres DMH n'ont pas été vus car rares ou affiliés à des stations et/ou essences particulières (gui, fougères, blessure due au feu, balais de sorcière, coulée de résine, etc.) et d'autre enfin car la saison ne permettait pas, ou difficilement, de les repérer (nid d'invertébrés, myxomycète, etc.).

Discussion sur la méthode de grimpe d'arbres

La méthode grimpe d'arbre semble aujourd'hui la plus propice aux observations verticales de DMH en forêt. Comme ce document le prouve, un observateur au sol – même avec jumelles – n'équivaut pas un observateur perché. Les drones trouvent, eux, encore de nombreuses limites pour une utilisation en forêt (autonomie de la batterie, branchage, observation indirecte, etc.) sans forcément être ni plus rapides, ni moins coûteux qu'un grimpeur. D'autre part, les techniques des arboristes grimpeurs permettent d'aller au-delà des simples observations par ascension-descente, mais aussi de se déplacer dans l'arbre et entre les arbres, de monter du matériel ou encore d'installer des infrastructures pour différents protocoles expérimentaux comme cela a été fait par une équipe Allemande sur le bois mort (Seibold et al., 2018). Ajouté à cela, la grimpe d'arbres a le bénéfice d'être une méthode d'observation directe en 3 dimensions, douce et peu impactante. Cependant, la généralisation des inventaires de DMH verticaux n'est pas pour tout de suite, car les inventaires par grimpe nécessitent, par rapport aux inventaires depuis le sol, des moyens importants (logistique, coût, temps, etc.) et l'emploi de personnes expérimentées à la pratique de la grimpe d'arbres.

Perspectives de recherche et d'application

Comme nous venons de le voir, les inventaires de DMH depuis le sol conservent de nombreux avantages (temps, logistique, accessible pour un plus grand nombre, etc.) mais n'ont pas l'exhaustivité des inventaires dans les arbres. Par conséquent, les études en hauteur par grimpe d'arbre sur les DMH doivent être poursuivies conjointement aux études depuis sol afin, non pas de les remplacer, mais au contraire de les améliorer. Comme cela a été esquissé ici, les études par grimpe d'arbres ont le pouvoir d'apporter un facteur correctif pouvant être appliqués

aux résultats des observations des inventaires faits depuis le sol (ex : DE11 : +39.5% ; EP22 : + 92.1% ; IN11 : +85.7%). Or, pour créer de tels facteurs de corrections, la poursuite des mesures des hauteurs des DMH est primordiale afin de constituer un jeu de données verticales plus conséquent et plus complet. L'augmentation des données verticales des DMH est d'abord obligatoire pour caractériser les DMH les plus rares (nids, polypores annuels, loges, cavités à terreau, etc.). Ensuite, les futures études verticales devront être élargies à d'autres zones géographiques, à diverses essences, à différentes conditions de gestion, à des classes de diamètre variées, etc. Cela permettra à la fois de décliner des facteurs de corrections selon les différentes conditions (stations, temps, saisons, etc.) et de mieux comprendre ses DMH. Trouver des explications et des liens quant aux distributions verticales des DMH, démontrer l'influence des conditions abiotiques comme biotiques sur les taux d'accumulation des DMH ou encore prévoir leur présence (en fonction de la gestion par exemple). Il ne doit pas être omis que globalement, les temps d'observations par arbre ont été long (10 min au sol et 12 min en hauteur) par rapport au temps passé par les gestionnaires et autres opérateurs dans leurs missions de routines (quelques minutes par arbre). Par conséquent, les « corrections » que pourraient apporter ces facteurs correctifs seront à moduler aussi en fonction de cela.

Nos connaissances sur l'étagement vertical sont encore trop limitées. Il conviendra notamment d'étudier plus en détail la stratification de chaque DMH, leurs facteurs de formation et de répartition verticale – spatiaux comme temporels –, ainsi que leurs espèces associées à la manière des travaux de Gossner et Petermann (2022). De telles études pourront être observatrices ou expérimentales (Seibold et al., 2018) et permettront, *in fine*, de mieux comprendre la dynamique des DMH et par extension, celle de tout l'écosystème forestier.

Potentiellement, les seuils de la standardisation des DMH pourront être revus afin qu'ils soient définis pour des raisons plus bioécologiques que pragmatiques (Larrieu et al., 2017). En tout cas, préciser des valeurs seuils bioécologiques idéales accordera la possibilité de trouver un équilibre plus juste avec l'aspect pratique s'il y en a le besoin. La nécessité d'un protocole pour inventaire arboricole standardisé pourrait aussi avoir lieu d'être si les inventaires par grimpe d'arbre se poursuivent.

Conclusion

Le résultat qu'un inventaire par grimpe d'arbre soit plus exhaustif qu'un inventaire au sol (+57.8%) était attendu et confirme l'hypothèse principale de départ. Toujours est-il que préciser et connaître plus en détail ces différences étaient jusqu'alors inconnues. Le caractère incomplet des observations depuis le sol a été quantifié mais devra être enrichi et consolidé afin d'être, à

terme, pris en compte d'une part par les scientifiques dans leurs études, et d'autre part, par les gestionnaires dans leurs observations de routine depuis le sol. En plus de cela, une première répartition verticale des hauteurs des DMH a été créée ouvrant de nouvelles perspectives de recherches et piste de réflexions autour de la compréhension des écosystèmes forestiers. Tout en guidant les futurs travaux scientifiques souhaitant explorer des ou un DMH en particulier, cette stratification verticale des DMH devra être approfondie afin d'être mieux comprise.

Liste bibliographique

- Ambiehl, C., Gourmaud, A., & Salvatoni, F. (2016). *Mémento de l'arboriste—L'arboriste grimpeur* (Vol. 1). Naturalia Publications, Association Copalme. <https://www.naturalia-publications.com/memento-arboriste-grimpeur>
- Asbeck, T., Großmann, J., Paillet, Y., Winiger, N., & Bauhus, J. (2021). The Use of Tree-Related Microhabitats as Forest Biodiversity Indicators and to Guide Integrated Forest Management. *Current Forestry Reports*, 7(1), 59-68. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00132-5>
- Basile, M., Asbeck, T., Jonker, M., Knuff, A. K., Bauhus, J., Braunisch, V., Mikusiński, G., & Storch, I. (2020). What do tree-related microhabitats tell us about the abundance of forest-dwelling bats, birds, and insects? *Journal of Environmental Management*, 264(110401). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110401>
- Brooks, M. E., Kristensen, K., van Benthem, K. J., Magnusson, A., Berg, C. W., & Nielsen, A. (2017). GlmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal*, 9(2), 378-400. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
- Bruciamacchie, M., Gilg, O., & Despert, Y. (2007). Un nouveau protocole pour le suivi des forêts dans les espaces naturels protégés. *Espaces Naturels*, 18, 20.
- Fodor, E., & Hâruga, O. (2016). Quercus robur, Q. cerris and Q. petraea as hot spots of biodiversity. *Journal of Plant Development*, 23, p187-210.
- Gavinet, J., Prévosto, B., & Fernandez, C. (2016). Introducing resprouters to enhance Mediterranean forest resilience : Importance of functional traits to select species according to a gradient of pine density. *Journal of Applied Ecology*, 53(6), 1735. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12716>
- Gossner, M. M., & Petermann, J. S. (2022). Vertical Stratification of Insect Species Developing in Water-Filled Tree Holes. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 12.
- Hanski, I. (2005). The Shrinking World : Ecological Consequences of Habitat Loss. *Excellence in Ecology (EE)* 14, 14.
- Kramer, K. (2007). Resilience of European forests : Towards a non-equilibrium view for the management of diversity. *Climate Change and Forest Genetic Diversity: Implications for Sustainable Forest Management in Europe, Rome, Italy, 15-16 March 2007*, 43-51. <https://research.wur.nl/en/publications/resilience-of-european-forests-towards-a-non-equilibrium-view-for>
- Kraus, D., Büttler, R., Krumm, F., Lachat, T., Larrieu, L., Mergner, U., Paillet, Y., Schuck, A., & Winter, S. (2016). *Catalogue of tree microhabitats : Reference field list* [Report]. <https://oatao.univ-toulouse.fr/16279/>
- Larrieu, L. (2014). *Les dendro-microhabitats : Facteurs clés de leur occurrence dans les peuplements forestiers, impact de la gestion et relations avec la biodiversité taxonomique* [These de doctorat, Toulouse, INPT]. <https://theses.fr/2014INPT0130>
- Larrieu, L., & Cabanettes, A. (2012). Species, live status, and diameter are important tree features for diversity and abundance of tree microhabitats in subnatural montane beech–fir forests | This article is one of a selection of papers from the International Symposium on Dynamics and Ecological Services of Deadwood in Forest Ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 42(8), 1433-1445. <https://doi.org/10.1139/x2012-077>
- Larrieu, L., & Gonin, P. (2009). L'indice de biodiversité potentielle (IBP) : Une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. *Revue forestière française*, 60(6), 727. <https://doi.org/10.4267/2042/28373>
- Larrieu, L., Gosselin, F., Archaux, F., Chevalier, R., Corriol, G., Dauffy-Richard, E., Deconchat, M., Gosselin, M., Ladet, S., Savoie, J.-M., Tillon, L., & Bouget, C. (2019). Assessing the potential of routine stand variables from multi-taxon

- data as habitat surrogates in European temperate forests. *Ecological Indicators*, 104, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.085>
- Larrieu, L., Paillet, Y., Winter, S., Büttler, R., Kraus, D., Krumm, F., Lachat, T., Michel, A. K., Regnery, B., & Vandekerckhove, K. (2017). Tree related microhabitats in temperate and Mediterranean European forests : A hierarchical typology for inventory standardization. *Ecological Indicators*, 84, 194-207. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.051>
- Lenth, R. V. (2022). *emmeans : Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means* [Data set]. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Li, S., Liu, S., Shi, X.-M., Liu, W.-Y., Song, L., Lu, H.-Z., Chen, X., & Wu, C.-S. (2017). Forest Type and Tree Characteristics Determine the Vertical Distribution of Epiphytic Lichen Biomass in Subtropical Forests. *Forests*, 8(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/f8110436>
- Martin, M., Paillet, Y., Larrieu, L., Kern, C. C., Raymond, P., Drapeau, P., & Fenton, N. J. (2022). Tree-Related Microhabitats Are Promising Yet Underused Tools for Biodiversity and Nature Conservation : A Systematic Review for International Perspectives. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/ffgc.2022.818474>
- Michelot, L., Wuillemin, C., & Clavreul, D. (2021). Chêne, arbre de vie. *La Salamandre*, 266, p22-47.
- Paillet, Y. (2018). *Les microhabitats des arbres : Facteurs d'influence, lien avec la biodiversité et potentiel indicateur* (p. 215) [Phdthesis, Museum national d'histoire naturelle - MNHN PARIS ; Écosystèmes forestiers (Nogent-sur-Vernisson, Loiret)]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02197757>
- Paillet, Y., Coutadeur, P., Vuidot, A., Archaux, F., & Gosselin, F. (2014). Strong observer effect on tree microhabitats inventories: A case study in a French lowland forest. *Ecological Indicators*, 49, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.023>
- Quarteroni, A. (2016). *Integration des dendromicrohabitats au protocole LFI 5 : Quelles possibilités ?* [Rapport de stage]. WSL.
- R Core Team. (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (4.1.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ranius, T., Niklasson, M., & Berg, N. (2009). Development of tree hollows in pedunculate oak (*Quercus robur*). *Forest Ecology and Management*, 257(1), 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.007>
- Reid, W., Mooney, H., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S., & Chopra, K. (2005). *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being : Synthesis*.
- Rossi, M., & Vallauri, D. (2013). *Evaluer la naturalité. Guide pratique version 1.2*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4973.8565>
- Savoie, J.-M., Bartoli, M., Blanc, F., Brin, A., Brustel, H., Cateau, E., Corriol, G., Dejean, S., Gouix, N., Hannoire, C., Sanchez, M. I., Larrieu, L. L., Marcillaud, Y., Valladares, L., & Victoire, C. (2013). *Viennes forêts pyrénéennes de Midi-Pyrénées. Deuxième phase*. [Report]. Ecole d'Ingénieurs de Purpan (INPT - EI Purpan) ; Dynafor ; Conservatoire Botanique National de Midi-Pyrénées (CBNMP) ; Conservatoire Régional des Espaces Naturels Midi-Pyrénées (CREN Midi-Pyrénées). <https://hal.inrae.fr/hal-02801599>
- Seibold, S., Hagge, J., Müller, J., Gruppe, A., Brandl, R., Bässler, C., & Thorn, S. (2018). Experiments with dead wood reveal the importance of dead branches in the canopy for saproxylic beetle conservation. *Forest Ecology and Management*, 409, 564-570. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.052>
- Steich, K., Kamel, M., Beardsley, P., Obrist, M. K., Siegwart, R., & Lachat, T. (2016). Tree cavity inspection using aerial robots. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 4856-4862. <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759713>
- Vallauri, D., & Berenger, E. (2009). Les forêts françaises : Une biodiversité à la fois riche et menacée. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 53, 75. <https://doi.org/10.3917/re.053.0075>
- Vuidot, A., Paillet, Y., Archaux, F., & Gosselin, F. (2011). Influence of tree characteristics and forest management on tree microhabitats. *Biological Conservation*, 144(1), 441-450. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.09.030>
- Winter, S., & Möller, G. C. (2008). Microhabitats in lowland beech forests as monitoring tool for nature conservation. *Forest Ecology and Management*, 255(3), 1251-1261. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.029>

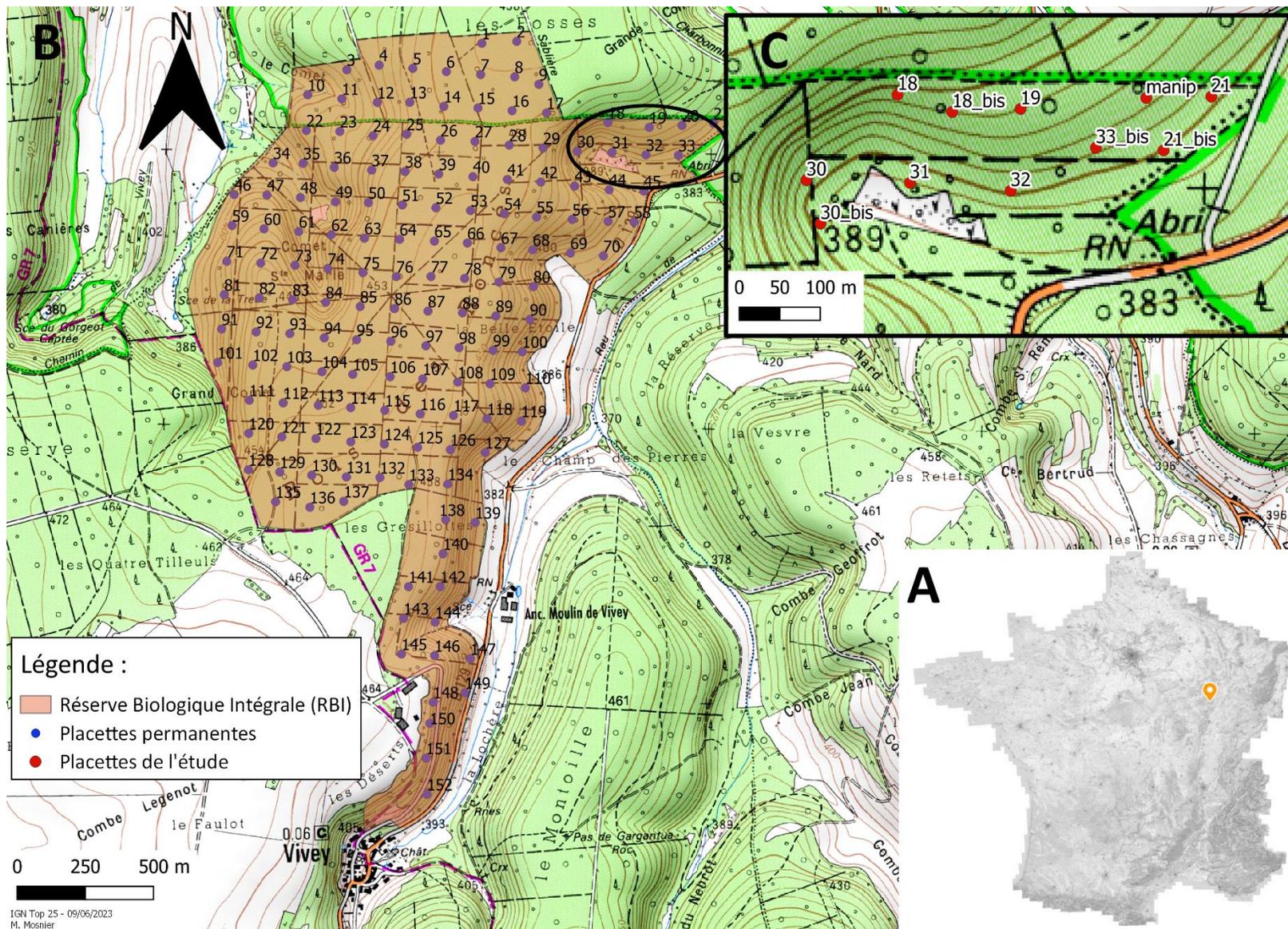
Résumé

Compte tenu de l'absence de connaissances sur l'aspect vertical de l'ensemble des dendro-microhabitats (DMH), cette étude de stage de master 1 propose une première exploration verticale. L'objectif double est (i) de comparer et quantifier les différences d'identification des DMH qu'oblige une caractérisation depuis le sol par rapport à une caractérisation depuis la hauteur des arbres et (ii) d'établir une première répartition verticale à la fois qualitative et quantitative des DMH forestiers. Les résultats montrent que les inventaires par grimpe d'arbres permettent d'identifier 58% de DMH de plus qu'au sol mais que ces différences ne sont pas identiques pour chaque DMH. De plus, une première distribution verticale des DMH est présentée. Plusieurs explications des différences observées sont proposées dont celle de la hauteur des DMH qui semble opérer que très marginalement. Enfin, des perspectives de recherches futures sur la verticalité des DMH sont discutées.

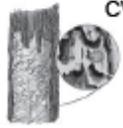
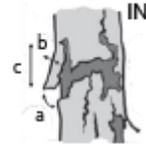
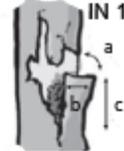
Annexes

Pour plus d'informations (protocole, outils, analyses complémentaires, etc.) veuillez contacter Mathéo Mosnier par mail à l'adresse suivante : matheo.mosnier@gmail.com

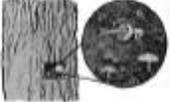
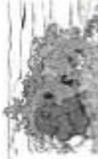
ANNEXE 1 : Zones et placettes d'étude. **A.** Localisation de la Réserve Biologique Intégrale (RBI) en France (repère orange). **B.** Aire de la RBI et réseau de placette permanente. **C.** Zoom de la zone d'étude avec placettes correspondantes.



ANNEXE 2 : Liste des dendro-microhabitats avec seuils et codes correspondants utilisée par les opérateurs pendant l'étude.

Forme	Cavités				Blessures et bois apparents		Bois mort dans le houppier	Forme
	Loges de pic	Cavités à terreau	Orifices et galeries d'insectes	Concavités	Aubier apparent	Aubier et bois de cœur apparents	Bois mort dans le houppier	
Type	<p>Loge de petite taille $\varnothing < 4$ cm CV 11</p> 	<p>Cavité à terreau de pied (contact avec le sol) $\varnothing > 10$ cm CV 21</p> 	<p>Orifices et galeries d'insectes $\varnothing > 2$ cm ou $\square > 300$ cm² CV 3</p> 	<p>Dendrotelme $\varnothing > 15$ cm CV 41</p> 	<p>Bois sans écorce $\square > 300$ cm² IN 11</p> 	<p>Cime brisée $\varnothing > 20$ cm IN 21</p> 	<p>Branches mortes $\varnothing > 10$ cm ou $\varnothing > 3$ cm et >10% du houppier est mort DE 11</p> 	Type
	<p>Loge de taille moyenne $\varnothing = 4-7$ cm CV 12</p> 	<p>Cavité à terreau de tronc (sans contact avec le sol) $\varnothing > 10$ cm CV 22</p> 		<p>Trou de nourrissage de pic $\nabla > 10$ cm, $\varnothing > 10$ cm CV 42</p> 	<p>Blessure due au feu $\square > 600$ cm² IN 12</p> 	<p>Bris de charpentière au niveau du tronc avec bois de cœur apparent $\square > 300$ cm² IN 22</p> 	<p>Cime morte $\varnothing > 10$ cm à la base DE 12</p> 	
	<p>Loge de grande taille $\varnothing > 10$ cm CV 13</p> 	<p>Cavité à terreau semi-ouverte $\varnothing > 30$ cm CV 23</p> 		<p>Concavité à fond dur de tronc $\nabla > 10$ cm, $\varnothing > 10$ cm CV 43</p> 	<p>Ecorce décollée formant un abri (ouvert vers le bas) $a > 1$ cm, $b > 10$ cm, $c > 10$ cm IN 13</p> 	<p>Fente $L > 30$ cm, $B > 1$ cm, $\downarrow > 10$ cm IN 23</p> 	<p>Vestige de charpentière brisée $\varnothing > 20$ cm, $L > 50$ cm DE 13</p> 	
	<p>«Flute» de pic ≥ 3 loges en ligne, $\varnothing > 3$ cm CV 14</p> 	<p>Cavité à terreau, avec/sans contact avec le sol, ouverte vers le haut $\varnothing > 30$ cm CV 24</p> 		<p>Concavité racinaire $\varnothing > 10$ cm, pente du «toit» $< 45^\circ$ CV 44</p> 	<p>Ecorce décollée formant une poche (ouverte vers le haut) $a > 1$ cm, $b > 10$ cm, $c > 10$ cm IN 14</p> 	<p>Fente causée par la foudre $L > 30$ cm, $B > 1$ cm, $\downarrow > 10$ cm IN 24</p> 		
		<p>Branche creuse $\varnothing > 10$ cm CV 25</p> 				<p>Fente au niveau d'une fourche $L > 30$ cm IN 25</p> 		

ANNEXE 2 (suite) : Liste des dendro-microhabitats avec seuils et codes correspondants utilisée par les opérateurs pendant l'étude

Forme	Excroissances		Sporophores de champignons et myxomycètes		Structures épiphytiques, épixyliques ou parasites			Exsudats	Forme
	Agglomérations de gourmands ou de rameaux	Loupes et chancres	Sporophores de champignons pérennes	Sporophores de champignons éphémères et myxomycètes	Plantes et lichens épiphytiques ou parasites	Nids	Microsols	Coulées de sève et de résine	
Type	Balais de sorcière ø > 50 cm GR 11 	Loupe ø > 20 cm GR 21 	Polypore pérenne ø > 5 cm EP 1 	Polypore annuel ø > 5 cm ou > 10 EP 21 	Bryophytes (mousse ou hépatique) □ > 10% du tronc SE 11 	Nid de vertébré ø > 10 cm SE 21 	Microsol d'écorce SE 31 	Coulée de sève L > 10 cm OT 	
	Gourmands / Brogne > 5 gourmands GR 12 	Chancre ø > 20 cm ou grande partie du tronc couverte GR 22 		Agaricale charnue ø > 5 cm ou > 10 EP 22 	Lichens foliacés ou fruticuleux □ > 10% du tronc SE 12 	Nid d'invertébré SE 22 	Microsol du houppier SE 32 	Coulée de résine > 10 cm 	
				Pyrenomycètes ø > 3 cm ou □ > 100 cm² EP 23 	Lierre ou lianes □ > 10% du tronc SE 13 				
				Myxomycètes ø > 5 cm EP 24 	Fougères > 5 frondes SE 14 				
					Gui ø > 20 cm SE 15 				

Typologie des dendromicrohabitats selon LARRIEU *et al.* (2018), recommandée pour leur inventaire, articulée en 7 formes, 15 groupes et 47 types. Les valeurs seuil d'inventaire doivent être respectées pour tous les relevés, afin de permettre la comparaison des données indépendamment du niveau hiérarchique utilisé (formes, groupes ou types).
 ø diamètre; ⇩ = profondeur; □ = surface;
 L = longueur; B = largeur. Dessins: C. Emberger, L. Apfelbacher/D. Kraus et reproductions tirées de KRAUS *et al.* 2016

