

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES  
Sciences de la Vie et de la Terre

MÉMOIRE  
Présenté par

*Florian Vast*

pour l'obtention du Diplôme de l'École Pratique des Hautes Études-PSL

*Protection des plantations sylvicoles contre les cervidés : comparaison de dispositifs de protections individuels, aboutissement et mortalité des plants*

Soutenu le 15/12/2025, devant le jury suivant :

M. Christopher Carcaillet : Directeur d'études, EPHE, Montpellier ..... Tuteur pédagogique  
Mme Catherine Collet : Chargée de Recherches, INRAE, Champenoux ..... Tutrice scientifique  
M. Gauthier Ligot : Maître de conférences, Université de Liège, Gembloux ..... Examinateur  
M. Jérôme Moreau : Professeur, Université de la Rochelle ..... Rapporteur  
M. Pierre de Villemereuil : Maître de Conférences, EPHE, Paris ..... Président

Mémoire préparé sous la direction de :

Catherine Collet, Chargée de Recherche INRAE  
Structure d'accueil : INRAE Grand Est Nancy, UMR 1434 SILVA  
54280 Champenoux

et de

Christopher Carcaillet, Directeur d'Études EPHE-PSL  
Structure d'accueil EPHE : UMR 5023, Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes naturels et anthropisés (LEHNA), Villeurbanne  
EPHE (Sciences de la Vie et de la Terre)



# Table des matières

Liste des figures.....	3
Liste des tableaux.....	5
Liste des annexes.....	5
Liste des abréviations.....	6
Remerciements.....	7
Soutien financier et organismes impliqués.....	9
<b>1 INTRODUCTION : .....</b>	<b>11</b>
1.1 AUGMENTATION DES POPULATIONS D'ONGULES.....	11
1.2 POURQUOI S'INTERESSER AUX DOMMAGES CAUSES PAR LE CHEVREUIL ET LE CERF ELAPHE ? .....	13
1.3 LES INTERACTIONS ENTRE LES ONGULES ET LES AUTRES COMPOSANTES DE L'ECOSYSTEME FORESTIER. ....	14
1.3.1 Interactions trophiques et effets en cascade .....	15
1.3.2 Rôle des ongulés sur la diversité floristique .....	15
1.3.3 Dispersion des graines et connectivité paysagère .....	16
1.3.4 Les effets des ongulés sur le renouvellement sylvicole .....	16
1.3.4.1 Sur la régénération naturelle .....	16
1.3.4.2 Sur les plantations .....	17
1.4 LES PRINCIPAUX TYPES DE DOMMAGES SUR LE RENOUVELLEMENT .....	18
1.4.1 L'aboutissement .....	18
1.4.2 Le frottis.....	19
1.5 COMMENT AGIR SUR LES POPULATIONS D'ONGULES POUR LIMITER LES IMPACTS ? .....	20
1.5.1 Augmenter les prélevements avec une pression de chasse plus forte .....	20
1.5.2 Gérer les habitats pour limiter les dégâts. ....	20
1.5.3 Protéger les plantations .....	21
1.5.3.1 Mettre en place une protection au niveau de la parcelle .....	22
1.5.3.2 Les protections individuelles et leurs modes d'actions .....	23
1.5.3.2.1 Les protections mécaniques .....	23
1.5.3.2.2 Les protections répulsives .....	24
2 OBJECTIFS ET HYPOTHESES :.....	25
3 DEMARCHE GENERALE .....	27
4 MATERIELS ET METHODES.....	29
4.1 SITES D'ETUDE .....	29
4.2 ESPECES D'ARBRES.....	32
4.3 METHODES DE PROTECTIONS INDIVIDUELLES.....	33
4.3.1 Pas de mode d'action .....	33
4.3.2 Mode d'action mécanique.....	34
4.3.3 Modes d'actions mécanique et visuel .....	34
4.3.4 Modes d'actions gustatif et olfactif.....	34
4.3.5 Modes d'actions gustatif, olfactif et visuel.....	35
4.3.6 Mode d'action gustatif .....	35
4.4 SCHEMA EXPERIMENTAL .....	40
4.5 VARIABLES MESUREES .....	43
4.5.1 Présence d'ongulés sur la parcelle .....	45
4.6 IDENTIFICATION DES DEGATS SUR LES PLANTS.....	46
4.6.1 Aboutissement du plant.....	46
4.6.2 Frottis du plant. .....	47
4.7 MISE EN PLACE ET SUIVI DES EXPERIMENTATIONS.....	48

<b>4.8 ANALYSE DES DONNEES .....</b>	<b>50</b>
4.8.1    Préparation et exploration des données .....	50
4.8.2    Choix des modèles statistiques .....	50
4.8.2.1    Variables analysées .....	50
4.8.2.2    Deux niveaux d'analyses : réseau et site .....	50
4.8.2.3    Exploration des autocorrélations spatiales .....	51
4.8.2.4    Présélection des variables explicatives .....	53
4.8.3    Modèles retenus .....	54
4.8.3.1    Au niveau du réseau .....	54
4.8.3.2    Au niveau du site .....	56
<b>5 RESULTATS .....</b>	<b>59</b>
5.1 CARACTERISTIQUES DES SITES .....	59
5.2 COMPARAISON DES MODELES .....	61
5.3 MORTALITE, ABROUTISSEMENTS ET FROTTIS AU NIVEAU DU RESEAU .....	62
5.3.1    Taux d'abrutissement par site .....	62
5.3.2    Frottis .....	63
5.3.3    Mortalité .....	65
5.3.4    Abrutissement du bourgeon terminal .....	67
5.3.5    Abrutissement des bourgeons latéraux .....	69
5.4 MORTALITE ET ABROUTISSEMENT AU NIVEAU DES SITES .....	72
5.4.1    Mortalité .....	72
5.4.2    Abrutissement du bourgeon terminal .....	74
5.4.3    Abrutissement des bourgeons latéraux .....	75
<b>6 DISCUSSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>77</b>
6.1 EFFETS DES METHODES DE PROTECTION .....	77
6.2 CONSIDERATIONS METHODOLOGIQUES .....	79
6.3 RECOMMANDATIONS POUR LA GESTION .....	83
<b>7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES : .....</b>	<b>87</b>
<b>8 ANNEXES .....</b>	<b>96</b>

# Liste des figures

FIGURE 1 : REPARTITION DE 3 ESPECES D'ONGULES SAUVAGES EN EUROPE : A) LE SANGLIER, B) LE CHEVREUIL ET C) LE CERF ELAPHE (LINNELL ET AL., 2020) .....	11
FIGURE 2 : NOMBRE DE REALISATIONS A LA CHASSE, EN FRANCE, SUR LA PERIODE 1973 A 2023, POUR LE CHEVREUIL, LE SANGLIER ET LE CERF ELAPHE. SOURCE : DONNEES ISSUES DU RESEAUX ONGULES SAUVAGES -FEDERATION NATIONALE DES CHASSEURS (FNC) – FEDERATION DEPARTEMENTALE DES CHASSEURS (FDC) – OFFICE FRANCAIS DE LA BIODIVERSITE (OBF).....	12
FIGURE 3 : VARIATION INTRA-ANNUELLE DU REGIME ALIMENTAIRE DU CERF ET DU CHEVREUIL DANS LA RESERVE NATIONALE DE LA CHASSE ET DE LA FAUNE SAUVAGE EN FORET DOMANIALE DE LA PETITE-PIERRE (67), POUR LE CHEVREUIL ET LE CERF ELAPHE (SAÏD ET AL., 2012). .....	14
FIGURE 4 : LIENS ENTRE LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES, LES ENJEUX PATRIMONIAUX ET LES CONTRAINTES LIES AUX ONGULES. EXTRAIT DU RAPPORT EFESE (BISON AND LOISON, 2022).....	15
FIGURE 5 : EFFET DES ENCLOS/EXCLOS SUR LA SELECTIVITE DE LA FLORE PAR LES ONGULES EN FORET DOMANIALE DE COLROY-LUBINE (88). EN EXCLOS LA VEGETATION EST DOMINEE PAR LES GRAMINEES, EN ENCLOS, LA VEGETATION EST DOMINEE PAR LA RONCE ET D'AUTRES ESPECES LIGNEUSES. CREDIT PHOTO : ©FLORIAN VAST.....	16
FIGURE 6 : RECAPITULATIF DES DEUX PRINCIPAUX DOMMAGES CAUSES PAR LE CHEVREUIL ET LE CERF ELAPHE SUR LES ARBRES AU STADE DU RENOUVELLEMENT. SOURCE (CDAF, 2022) .....	19
FIGURE 7 : COMPARAISON DE LA DYNAMIQUE DU RENOUVELLEMENT FORESTIER EN ENCLOS (A.) ET EN EXCLOS (B.), SUR LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL OFB/ONF - EFFORT (EFFETS DES ONGULES SUR LE RENOUVELLEMENT FORESTIER), EN FORET DOMANIALE DE TROIS FONTAINE (52). CREDIT PHOTO : ©TOMMY NEHL .....	22
FIGURE 8: SCHEMA DE PLANTATION EN LIGNE (A) ET EN PLACEAU (B) .....	30
FIGURE 9 : IMPLANTATION DES SITES EXPERIMENTAUX PICO (PROTECTION INDIVIDUEL CONTRE LES ONGULES), EN FRANCE ET EN BELGIQUE .....	30
FIGURE 10 : MODALITES DE PROTECTIONS INSTALLEES SUR DES SAPINS DE DOUGLAS ; (A) TEMOIN, (B) GAINES, (C) PIQUETS, (D) PINCE, (E) GRAISSE 1 & 2, (F) LAINE, (G) PEINTURE, (H) PATE, (I) CHAUX. CREDIT PHOTO : ©FLORIAN VAST.....	38
FIGURE 11 : MODALITES DE PROTECTIONS INSTALLEES SUR DES CHENES SESSILES : (A) TEMOIN, (B) GAINES, (C) PIQUETS, (D) PINCE, (E) GRAISSE 1 & 2, (F) LAINE, (G) PEINTURE, (H) PATE, (I) CHAUX. CREDIT PHOTOS : ©FLORIAN VAST .....	39
FIGURE 12 : SCHEMA D'UN DISPOSITIF EXPERIMENTAL DE PLANTATION PURE EN LIGNE : SITE DE JOUAVILLE (57).....	40
FIGURE 13 : PLANTATION EXPERIMENTALE DE SAPIN DE DOUGLAS, EN LIGNE. EXEMPLE DU SITE DE JOUAVILLE (57). CREDIT PHOTO : ©FLORIAN VAST .....	41
FIGURE 14 : EXEMPLE D'UN DISPOSITIF EXPERIMENTAL EN PLACEAU DE 9 PLANTS : SITE DE FONTAINEBLEAU (77). SUR CE SITE, CHAQUE POINT CORRESPOND A UN PLACEAU DE 9 PLANTS.....	42
FIGURE 15 : PLACEAU DE 9 PLANTS, PROTEGES PAR DES GAINES, DISPOSITIF EN FORET DOMANIALE DE 3 FONTAINES. CREDIT PHOTO : ©TOMMY NEHL .....	42
FIGURE 16 : PIEGE PHOTOGRAPHIQUE NUM'AXES PIE1059, INSTALLE SUR LE SITE DE PLAINFAING (88). CREDIT PHOTO : ©FLORIAN VAST.....	45
FIGURE 17: EXEMPLES DE DIFFERENTS TYPES D'ABROUTISSEMENTS : (A) ABROUTISSEMENT DE LA POUSSE TERMINALE SUR UN SAPIN DE DOUGLAS, (B) ABROUTISSEMENT DE LA POUSSE TERMINALE ET D'UNE BRANCHE LATERALE SUR UN SAPIN DE DOUGLAS, (C) ABROUTISSEMENT D'UNE POUSSE TERMINALE SUR UN CHENE SESSILE, (D) ABROUTISSEMENT DE LA POUSSE TERMINALE ET DES BRANCHES LATERALES SUR UN ERABLE SYCOMORE. CREDIT PHOTOS : ©FLORIAN VAST .....	46
FIGURE 18 : EXEMPLES DE DEGATS DE FROTTIS SUR SAPIN DE DOUGLAS SUR LE SITE DE PLAINFAING (88). CREDIT PHOTOS : ©FLORIAN VAST.....	47
FIGURE 19 : BAGUE PERMETTANT L'IDENTIFICATION D'UN PLANT DE SAPIN DE DOUGLAS. CREDIT PHOTO : ©FLORIAN VAST .....	48
FIGURE 20 : ETAT DE MODALITES DE PROTECTION CONSIDERES COMME « NULLE » ; (A) PINCE CACTUS SITUEE EN DESSOUS DE L'ACCROISSEMENT ANNUEL EN HAUTEUR, (B) GRAISSE1 SITUEE EN DESSOUS DE L'ACCROISSEMENT ANNUEL EN HAUTEUR, (C) CHAUX SITUEE EN DESSOUS DE L'ACCROISSEMENT ANNUEL EN HAUTEUR, (D ET E) GAINES TROP PETITE POUR PROTEGER DE L'ABROUTISSEMENT DU CERF, (F) PINCE QUI NE PROTEGE PAS LE BOURGEON TERMINAL, (G) PIQUETS NE PROTEGEANT PLUS DE L'ABROUTISSEMENT TERMINAL ET LATERAL. CREDIT PHOTOS : ©FLORIAN VAST .....	49
FIGURE 21 : ANALYSE DES AUTOCORRELATIONS SPATIALES POUR LE SITE DE JOUAVILLE: (A) CARTE DE RESIDUS DU MODELE D'ABROUTISSEMENT TERMINAL ET LOCALISES AVEC LES COORDONNEES CARTESIENNES DE CHAQUE PLANT, ET (B) AUTOCORRELATION SPATIALE DES RESIDUS EN UTILISANT L'INDICE DE MORAN.....	53
FIGURE 22 : ETAT DES PROTECTIONS APRES 6 MOIS D'INSTALLATION, DANS LES DIFFERENTES MODALITES ET POUR CHAQUE SITE.....	60

FIGURE 23 : TAUX D'ABROUTISSEMENT DU BOURGEON TERMINAL ET DES BOURGEONS LATERAUX DES PLANTS (TOUTES ESPECES CONFONDUES, TOUTES MODALITES CONFONDUES, POUR L'ENSEMBLE DES SITES) UN AN APRES PLANTATION : MOYENNE +/- INTERVALLE DE CONFIANCE A 95% .....	62
FIGURE 24 : TAUX DE PLANTS FROTTEES (TOUTES ESPECES CONFONDUES, POUR L'ENSEMBLE DES SITES) UN AN APRES PLANTATION, EN FONCTION DU TYPE DE PROTECTION UTILISE : MOYENNE +/- INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%.....	64
FIGURE 25 : TAUX DE PLANTS FROTTEES UN AN APRES PLANTATION, EN FONCTION DE LA MODALITE DE PROTECTION, ACCOMPAGNES DE LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE A 95 %, POUR CHAQUE SITE.....	64
FIGURE 26 : MORTALITE DES PLANTS (TOUTES ESPECES CONFONDUES, POUR L'ENSEMBLE DES SITES) UN AN APRES PLANTATION, EN FONCTION DU TYPE DE PROTECTION UTILISE : MOYENNE +/- INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%.....	65
FIGURE 27: MORTALITE DES PLANTS EN FONCTION DE LA HAUTEUR MEDIANE DES PLANTS (TOUTES MODALITES CONFONDUES, POUR CHAQUE SITE) UN AN APRES PLANTATION : MOYENNE +/- INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%. POUR CHAQUE SITE, LES PLANTS SONT CLASSES EN DEUX CLASSES DE HAUTEUR : CLASSE « BASSE » QUI CORRESPOND AUX PLANTS DONT LA HAUTEUR EST INFERIEURE A LA MEDIANE ET CLASSE « HAUTE » AUX PLANTS DONT LA HAUTEUR EST SUPERIEURE A LA MEDIANE. POUR CHAQUE SITE, LA VALEUR MEDIANE DE LA HAUTEUR (CM) EST INDIQUEE EN HAUT DE LA FIGURE.....	67
FIGURE 28 : ABROUTISSEMENT DU BOURGEON TERMINAL (TOUTES ESPECES CONFONDUES, POUR L'ENSEMBLE DES SITES) OBSERVES UN AN APRES PLANTATION, EN FONCTION DU TYPE DE PROTECTION UTILISE : MOYENNE +/- INTERVALLE DE CONFIANCE A 95 %.....	68
FIGURE 29 : ABROUTISSEMENT DU BOURGEON TERMINAL DES PLANTS EN FONCTION DE LA HAUTEUR MEDIANE DES PLANTS (TOUTES MODALITES CONFONDUES, POUR CHAQUE SITE) UN AN APRES PLANTATION : MOYENNE +/- INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%. POUR CHAQUE SITE, LES PLANTS SONT CLASSES EN DEUX CLASSES DE HAUTEUR : CLASSE « BASSE » QUI CORRESPOND AUX PLANTS DONT LA HAUTEUR EST INFERIEURE A LA MEDIANE ET CLASSE « HAUTE » AUX PLANTS DONT LA HAUTEUR EST SUPERIEURE A LA MEDIANE. POUR CHAQUE SITE, LA VALEUR MEDIANE DE LA HAUTEUR (CM) EST INDIQUEE EN HAUT DE LA FIGURE. ....	69
FIGURE 30 : TAUX D'ABROUTISSEMENT LATERAL (TOUTES ESPECES CONFONDUES, POUR L'ENSEMBLE DES SITES) OBSERVES UN AN APRES PLANTATION, EN FONCTION DU TYPE DE PROTECTION UTILISE : MOYENNE +/- INTERVALLE DE CONFIANCE A 95% .....	70
FIGURE 31 : ABROUTISSEMENT DES BOURGEONS LATERAUX DES PLANTS EN FONCTION DE LA HAUTEUR MEDIANE DES PLANTS (TOUTES MODALITES CONFONDUES, POUR CHAQUE SITE) UN AN APRES PLANTATION : MOYENNE +/- INTERVALLE DE CONFIANCE A 95%. POUR CHAQUE SITE, LES PLANTS SONT CLASSES EN DEUX CLASSES DE HAUTEUR : CLASSE « BASSE » QUI CORRESPOND AUX PLANTS DONT LA HAUTEUR EST INFERIEURE A LA MEDIANE ET CLASSE « HAUTE » AUX PLANTS DONT LA HAUTEUR EST SUPERIEURE A LA MEDIANE. POUR CHAQUE SITE, LA VALEUR MEDIANE DE LA HAUTEUR (CM) EST INDIQUEE EN HAUT DE LA FIGURE. ....	71
FIGURE 32 : TAUX DE MORTALITE DES PLANTS UN AN APRES PLANTATION, EN FONCTION DU TYPE DE PROTECTION UTILISE, ACCOMPAGNES DE LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE A 95 %, POUR CHAQUE SITE.....	73
FIGURE 33 : TAUX D'ABROUTISSEMENT DU BOURGEON TERMINAL DES PLANTS UN AN APRES PLANTATION, EN FONCTION DU TYPE DE PROTECTION UTILISE, ACCOMPAGNES DE LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE A 95 %, POUR CHAQUE SITE .....	75
FIGURE 34 : TAUX D'ABROUTISSEMENT LATERALES DES ARBRES UN AN APRES PLANTATION, EN FONCTION DU TYPE DE PROTECTION UTILISE, ACCOMPAGNES DE LEURS INTERVALLES DE CONFIANCE A 95 %, POUR CHAQUE SITE .....	76
FIGURE 35 : HETRES AYANT SUBI DES ABROUTISSEMENTS SUCCESSIFS EN FORET DOMANIALE DE LUTZELHOUSE. CREDIT PHOTO : ©NICOLAS MASSON.....	80
FIGURE 36 : MODALITES POUVANT CREER DES PERTURBATIONS PHYSIOLOGIQUES OU MECANIQUES SUR LES PLANTS ; (A) CHAUX, (B) PEINTURE, (C) LAINE, (D) PINCE. CREDIT PHOTO : ©FLORIAN VAST.....	82
FIGURE 37 : EXEMPLES DE LA VARIABILITE DE 3 SITES DU RESEAU PICO : (A) SITE DE PLAINFAING (88) EN AVRIL 2025, (B) SITE DE PLAINFAING (88) EN SEPTEMBRE 2025, AVEC UNE VEGETATION DOMINANTE CONSTITUE DE RONCE, (C) SITE D'ORLEANS (45) EN MARS 2025, LA VEGETATION DOMINANTE EST LA FOUGERE AIGLE, (D) PLANTATION DE PIN MARITIME SUR LE SITE D'ORLEANS MONTRANT DE NOMBREUSES EMPREINTES DE CERF ELAPHE, (E ET F) PLANTATION EN LIGNE SUR LE SITE JOUAVILLE (57) AU MOMENT DE L'INSTALLATION. CREDIT PHOTO : ©FLORIAN VAST.....	84

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DES SITES EXPERIMENTAUX. LA PLUVIOMETRIE ET LA TEMPERATURE ANNUELLE REPRESENTENT DES MOYENNES CALCULEES A PARTIR DES NORMALES CLIMATIQUES SPATIALISEES AURELHY SUR LA PERIODE 1981-2000 (CANELLAS ET AL., 2014).....	31
TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES DES MODALITES DE PROTECTIONS DES PLANTS.....	36
TABLEAU 3 : RECAPITULATIF DU NOMBRE DE PLANTS EN FONCTION DU SCHEMA DE PLANTATION.....	43
TABLEAU 4 : RECAPITULATIF DES VARIABLES PORTANT SUR LES PLANTS ET LES PROTECTIONS, DE LEURS NOTATIONS ET DE LEURS DESCRIPTIONS.....	43
TABLEAU 5 : ESPECES D'ONGULES OBSERVEES PAR LES PIEGES PHOTOGRAPHIQUES SUR CHAQUE SITE.....	59
TABLEAU 6 : TABLEAU COMPARATIF DES AIC DES MODELES AU NIVEAU DU RESEAU AVEC OU SANS L'INTRODUCTION DE LA HAUTEUR MOYENNE DES PLANTS.....	61
TABLEAU 7 : : EFFECTIFS DES PLANTS POUR CHAQUE VARIABLE ANALYSEE ET HAUTEUR MOYENNE DES PLANTS, DANS CHAQUE MODALITE POUR LES ANALYSES GRAPHIQUES ET STATISTIQUES, POUR CHAQUE MODALITE, POUR L'ENSEMBLE DU RESEAU, A 1 AN ; ABR = ABRUTIS ; TERM = TERMINAL ; LAT = LATERAL ; HT = HAUTEUR ; MOY = MOYENNE.....	62
TABLEAU 8 : : EFFECTIFS ET PROPORTION DES PLANTS FROTTES (TOUTES ESPECES CONFONDUES, POUR L'ENSEMBLE DES SITES) UN AN APRES PLANTATION, EN FONCTION DU TYPE DE PROTECTION UTILISE .....	63
TABLEAU 9 : PARAMETRES DU MODELE LINEAIRE GENERALISE SUR LA MORTALITE (EQUATION 2), POUR LES DIFFERENTES MODALITES DE PROTECTION, AU NIVEAU DU RESEAU .....	66
TABLEAU 10 : PARAMETRES DU MODELE LINEAIRE GENERALISE SUR L'ABROUTISSEMENT DU BOURGEON TERMINAL (EQUATION 1), POUR LES DIFFERENTES MODALITES DE PROTECTION AU NIVEAU DU RESEAU .....	68
TABLEAU 11 : PARAMETRES DU MODELE LINEAIRE GENERALISE SUR L'ABROUTISSEMENT DES BOURGEONS LATERAUX (EQUATION 1), POUR LES DIFFERENTES MODALITES DE PROTECTION, AU NIVEAU DU RESEAU .....	70
TABLEAU 12 : EFFECTIFS DES PLANTS POUR CHAQUE VARIABLE ANALYSEE ET HAUTEUR MOYENNE DES PLANTS, DANS CHAQUE MODALITE POUR LES ANALYSES GRAPHIQUES ET STATISTIQUES, POUR CHAQUE SITE, A 1 AN ; ABR = ABRUTIS ; TERM = TERMINAL ; LAT = LATERAL ; HT = HAUTEUR ; MOY = MOYENNE.....	72
TABLEAU 13 : EFFECTIFS DES ARBRES AYANT SUBI UN ABROUTISSEMENT TERMINAL, UN ABROUTISSEMENT LATERAL OU QUI SONT MORTS, TOUTES ESSENCES CONFONDUES, POUR L'ENSEMBLE DES SITES, POUR LA MODALITE « GAINES » ; EFF = EFFECTIFS ; ABR = ABRUTIS ; TERM = TERMINAL ; LAT = LAT .....	74

## Liste des annexes

ANNEXE 1 : PARAMETRES DES MODELES LINEAIRES GENERALISES DE LA MORTALITE, DE L'ABROUTISSEMENT TERMINAL ET DE L'ABROUTISSEMENT LATERAL, EN FONCTION DES MODALITES DE PROTECTION ET DE LA HAUTEUR DES PLANTS (EQUATION 2), POUR CHAQUE SITE .....	96
ANNEXE 2 : DIAGRAMMES OMBROTHERMIQUES DES 14 SITES DU PROJET PICO, PRESENTES SELON L'ANNEE D'INSTALLATION (2023 OU 2024). LES SITES PORTANT DEUX NOMS PARTAGENT LES MEMES DONNEES METEOROLOGIQUES. DONNEES ISSUES DE : <a href="https://www.data.gouv.fr/datasets/donnees-climatologiques-de-base-mensuelles/">HTTPS://WWW.DATA.GOUV.FR/DATASETS/DONNEES-CLIMATOLOGIQUES-DE-BASE-MENSUELLES/</a> .....	99
ANNEXE 3 : AUTOCORRELATION SPATIALE DES RESIDUS (INDICE DE MORAN'S) SELON LA DISTANCE, POUR LES SITES DE : A ; CRECY, B ; RETZ, C ; OURSCAMP, D ; SAINT GOBAIN. LES POINTS ROUGES INDIQUENT DES VALEURS SIGNIFICATIVES ( $P < 0,05$ ). LA LIGNE HORIZONTALE EN POINTILLES REPRESENTE L'ABSENCE D'AUTOCORRELATION SPATIALE ATTENDUE .....	100

## Liste des abréviations

EPHE : École Pratique des Hautes Études  
AIC : Critère d'Information d'Akaike  
AMM : Autorisation de Mise sur le Marché  
CCR : Certificat de Capacité à la Recherche  
CDAF : Centre de Développement AgroForestier de Chimay  
CNPF : Centre National de la Propriété Forestière  
EFESE : Évaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques  
EFFORT : EFFets des Ongulés sur le Renouvellement forester  
FDC : Fédération Départementale des Chasseurs  
FNC : Fédération Nationale des Chasseurs  
GCF : Groupe Coopératives Forestières  
GLM : Generalized Linear Models  
GLMM : Generalized Linear Mixed Models  
INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement  
LEHNA : Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes naturels et Anthropisés  
MASA : Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire  
MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle  
MTE : Ministère de la Transition Écologique  
OFB : Office Français de la Biodiversité  
ONF : Office National des Forêts  
PICO : Protections Individuelles Contre les Ongulés  
RENFOR : RENouvellement FORestier  
SF-CDC : Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations  
UE : Unité Expérimentale  
UMR : Unité Mixte de Recherche

Abréviations dans les Tableaux et Analyses :

Abr : Abroutis  
Eff : Effectifs  
Eq : Équation  
Ht : Hauteur  
Lat : Latéral  
Moy : Moyenne  
Term : Terminal

## Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Catherine Collet, ma tutrice scientifique, pour son accompagnement bienveillant, sa confiance et le temps qu'elle m'a consacré tout au long de ce projet. Son soutien constant et ses conseils avisés ont été déterminants, tant pour la réussite de ce mémoire que pour mon développement professionnel et personnel.

J'adresse également mes sincères remerciements à Christopher Carcaillet, mon tuteur pédagogique, pour m'avoir offert l'opportunité d'intégrer l'École Pratique des Hautes Études, pour ses conseils dans le choix des unités d'enseignement, ainsi que pour le suivi attentif qu'il a accordé au CCR et à ce mémoire.

Je tiens à remercier chaleureusement Marine Boudy (INRAE) pour son aide précieuse, tant dans la réflexion autour des données et des analyses statistiques que dans sa connaissance approfondie des dispositifs expérimentaux. Mes remerciements s'adressent également à Sonia Saïd (OFB) et Vincent Boulanger (ONF) pour leurs conseils, leurs échanges constructifs et le temps consacré à la relecture de ce travail.

Je remercie par ailleurs l'ensemble de mon équipe, dont l'appui sur le terrain m'a permis de consacrer davantage de temps à la conduite et à l'analyse de ce projet. Plus largement, je suis reconnaissant à toutes les personnes de mon environnement professionnel ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite remercier chaleureusement mes collègues de bureau pour leur bonne humeur, les échanges stimulants et les pauses conviviales partagées au fil des journées. Leur présence et la convivialité qui règnent à l'étage ont largement contribué à créer un cadre de travail agréable et motivant.

Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance à ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout au long de ces années. Leur présence a été un véritable moteur dans les moments de doute comme dans ceux de réussite. Je remercie tout particulièrement mes enfants, pour leur patience et leur compréhension face aux absences et au temps que j'ai parfois dû consacrer à ce travail. J'espère que le fait de m'avoir vu reprendre mes études et mener ce projet à bien sera, pour eux, une source de motivation et d'inspiration pour l'avenir.

Enfin, j'ai l'honneur d'adresser mes remerciements à Jérôme Moreau, Gauthier Ligot, et Pierre de Villemereuil, pour avoir accepté de participer à mon jury de diplôme.



## Soutien financier et organismes impliqués

Cette étude a été menée dans le cadre du projet PICO (*Protections Individuelles Contre les Ongulés*), financé conjointement par le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA) et le Ministère de la Transition Écologique (MTE).

Le projet PICO est coordonné par le pôle RENFOR (RENouvellement FORestiers), mission de l'UMR SILVA (1434), avec la participation de nombreux partenaires institutionnels et techniques :

- l'Installation Expérimentale de Gardouch (INRAE-CEFS),
- l'Office National des Forêts (ONF),
- l'Office Français de la Biodiversité (OFB),
- le Groupe Coopératives Forestières (GCF),
- le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF),
- la Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations (SF-CDC),
- le Centre de Développement Agroforestier de Chimay (CDAF),
- le Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN).

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble de ces partenaires pour leur implication constante, leur expertise complémentaire et leur collaboration active. Leur engagement collectif a permis de concevoir, d'installer et de suivre un réseau expérimental d'envergure nationale.



# 1 Introduction :

## 1.1 Augmentation des populations d'ongulés

Les changements globaux (changements climatiques, changement d'usage des sols et des pratiques de gestions de l'environnement, ...) auxquels nous assistons depuis plusieurs décennies modifient en profondeur le fonctionnement des écosystèmes, ce qui se répercute sur les équilibres trophiques entre les espèces constitutives de ces écosystèmes (Van Der Putten et al., 2004). Dans les écosystèmes forestiers français de France métropolitaine, et dans de nombreuses régions d'Europe (Linnell et al., 2020) et d'Amérique du Nord, ces modifications se traduisent entre autres par une augmentation significative du nombre d'ongulés sauvages au cours des 50 dernières années (Côté et al., 2004). En Europe, cela concerne principalement le cerf élaphe [*Cervus elaphus*], le chevreuil [*Capreolus capreolus*] et le sanglier [*Sus scrofa*], tant en forêts de plaine que de montagne, et à une modification de leur répartition géographique en Europe (figure 1) au cours des 50 dernières années. Cette augmentation monotone de l'abondance des ongulés dans de nombreuses régions d'Europe (Fuller, 2001) et d'Amérique du Nord est la conséquence des changements environnementaux et socio-économique dans ces régions du globe depuis la fin du XX<sup>e</sup> et le début du XXI<sup>e</sup> siècle (Bieber and Ruf 2005 ; Candaele et al., 2022).

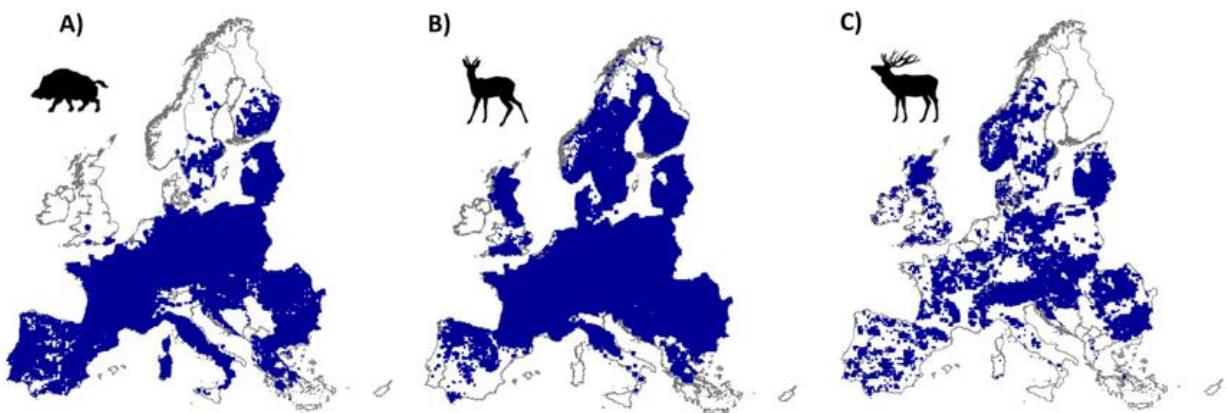


Figure 1 : Répartition de 3 espèces d'ongulés sauvages en Europe : A) le sanglier, B) le chevreuil et C) le cerf élaphe (Linnell et al., 2020).

Les autres ongulés forestiers en France métropolitaine sont le chamois [*Rupicapra rupicara*], et l'isard [*Rupicapra pyrenaica*], principalement en montagne (deux espèces naturelles et spontanées), et dans certaines régions le cerf sika [*Cervus nippon*], le daim [*Dama dama*] ou le mouflon [*Ovis gmelini*] (tous trois introduits). A cela s'ajoute des ongulés domestiques divaguant en forêt dans certaines régions et créant parfois des dégâts sur les arbres et la biodiversité comme les ovins en Languedoc ou en Provence (Chauchard et al. 2018) ou les bovins en Corse ou dans les Pyrénées (Fortuny et al. 2020). D'autres facteurs favorisent l'augmentation des populations d'ongulés sauvages, comme par exemple l'expansion pendant le XX<sup>e</sup> siècle de la forêt, habitat privilégié par ces espèces, suite à la déprise agricole, les conditions météorologiques hivernales moins

rigoureuses, la loi de finances de 1969 qui supprime le droit des agriculteurs de chasser le grand gibier dans leurs cultures, les introductions de cervidés dès les années 1950, une faible pression de chasse et la disparition des grands carnivores au XIX<sup>e</sup> siècle, jusqu'à leurs réapparitions peu avant les années 2000 (Carpio et al., 2021).

Il est reconnu que les ongulés sauvages peuvent modifier leur environnement (Putman and Moore, 1998). Les dégâts qui étaient auparavant des dommages causés à l'agriculture (Reimoser and Putman, 2011) deviennent des problèmes majeurs et croissants dans les milieux forestiers, notamment avec une forte augmentation de l'abrutissement et de l'écorçage (Gill, 1992). Les ongulés sauvages, tels que cerfs, chevreuils et sangliers, influencent profondément la structuration et le fonctionnement des écosystèmes forestiers en modifiant le renouvellement des arbres et la composition et l'abondance du sous-bois (Bernes et al., 2018 ; Ramirez et al., 2018). Ces modifications entraînent des effets en cascade sur divers groupes biologiques et processus écologiques (Fuller, 2001), incluant par exemple, la composition de la végétation (Boulanger et al., 2018), les cycles nutritifs, la dispersion des graines. La compréhension de l'écologie des ongulés et les stratégies alimentaires qu'ils développent est un point crucial pour comprendre la dynamique des interactions plantes-herbivores ainsi que le fonctionnement et la préservation des services rendus par les forêts.

Pour évaluer l'effectif des différentes espèces d'ongulés sauvages, la France ne dispose que d'un estimateur très approximatif sur l'abondance des populations qui est le nombre de réalisations effectuées lors des sessions annuelles de chasse. Ces statistiques sont les seules données disponibles pour l'ensemble du territoire métropolitain. La figure 2 ci-dessous, montre une trajectoire régulière des prélèvements réalisés à la chasse pour le chevreuil, le cerf élaphe et le sanglier depuis les années 70, ce qui reflète à la fois une augmentation du nombre d'animaux, mais aussi indirectement une recolonisation du territoire par les populations.

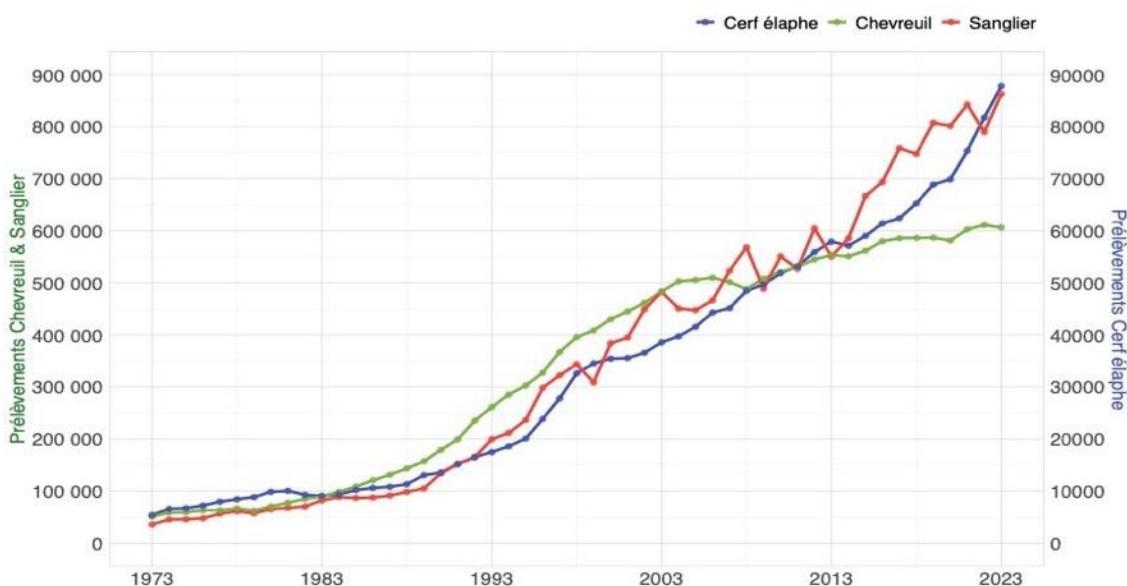


Figure 2 : nombre de réalisations à la chasse, en France, sur la période 1973 à 2023, pour le chevreuil, le sanglier et le cerf élaphe. Source : Données issues du Réseaux Ongulés sauvages -Fédération Nationale des Chasseurs (FNC) – Fédération Départementale des Chasseurs (FDC) – Office Français de la Biodiversité (OFB)

## 1.2 Pourquoi s'intéresser aux dommages causés par le chevreuil et le cerf élaphe ?

Les ongulés représentent une menace importante pour le recrutement des arbres et le renouvellement des forêts, après le climat, les insectes et les pathogènes (Requardt et al., 2009). En raison de la forte abondance des ongulés en France (Saint-Andrieux, 2023), le choix de se focaliser dans cette étude sur le chevreuil et le cerf élaphe constituent des exemples pertinents pour examiner les conséquences de l'abrutissement sur les taux de survie et la qualité des jeunes plantations d'arbres en France. Les chevreuils sont très répandus dans les forêts européennes et sont connus pour consommer les pousses des jeunes plants (Löf et al., 2021). L'intensité de ces dégâts dépend du type d'ongulés présents dans la zone d'étude, de leur densité, de la saison, de la disponibilité de la ressource alimentaire et de la gestion forestière (Côté et al., 2004).

Le régime alimentaire et les traits comportementaux de ces deux ongulés vont avoir un effet déterminant sur les abrutissements en forêt. Pour le chevreuil, des études ont montré qu'en forêt, il se nourrissait principalement de ronce, de pousses de chêne, de sorbier, de lierre et de graines (Barrère, 2021). Les résineux sempervirents sont moins attirants, notamment en été et constituent plutôt une alimentation en conditions de pénurie. Dans la figure 3, on peut constater que l'alimentation du cerf élaphe et du chevreuil varie principalement en hiver, avec une augmentation de la consommation des résineux, de la ronce et des sous-ligneux. Les processus qui déterminent les choix alimentaires chez le chevreuil sont de deux types : (i) les mécanismes perceptifs (stimuli induit par les plantes) et (ii) les mécanismes d'apprentissage individuel qui permettent l'élaboration des comportements d'ingestion ou de rejet de chaque catégorie d'aliment. Les traits physico-chimiques de ces plants induisent des stimuli qui concernent quatre des cinq sens de l'animal : la vue, l'odorat, le goût et le toucher (Maizeret et al., 1999). En ce qui concerne le régime alimentaire du cerf, il est composé principalement d'herbacées et de végétaux lignifiés provenant d'abrutissement (Gebert and Verheyden-Tixier, 2008). Pour ce qui est de l'écorçage, comme source d'alimentation, les motivations de ce dernier sont peu connues scientifiquement. Cette pratique peut traduire un trouble physiologique du cerf dû à un déséquilibre ou une carence dans le régime alimentaire herbacé, et consisterait ainsi en une action de vermifugation par les tanins (Decors, 2005) ou de facilitation pour la digestion (Saint-Andrieux et al., 2009). Ces deux ongulés se nourrissent également de graines. Par exemple, quand la fructification des chênes est suffisante, les glands représentent une ressource de haute qualité, facilement accessible et sont consommés par une grande variété d'espèces sauvages comme par exemple les rongeurs, les oiseaux et également les ongulés. Les années où la fructification du chêne est moins importante ou nulle, l'intensité de consommation des végétaux (y compris les semis et les plants d'arbres) se trouve modifiée, tant en composition qu'en intensité. Par exemple, comprendre comment les effets de masting (stratégie de reproduction présente chez de nombreuses plantes pérennes qui se caractérise par de fortes variations interannuelles de la production de fruits) du chêne façonne l'alimentation des cerfs élaphe et des chevreuils semble être essentiel pour évaluer les conséquences sur les abrutissements en milieu forestier (Märell et al., 2012).

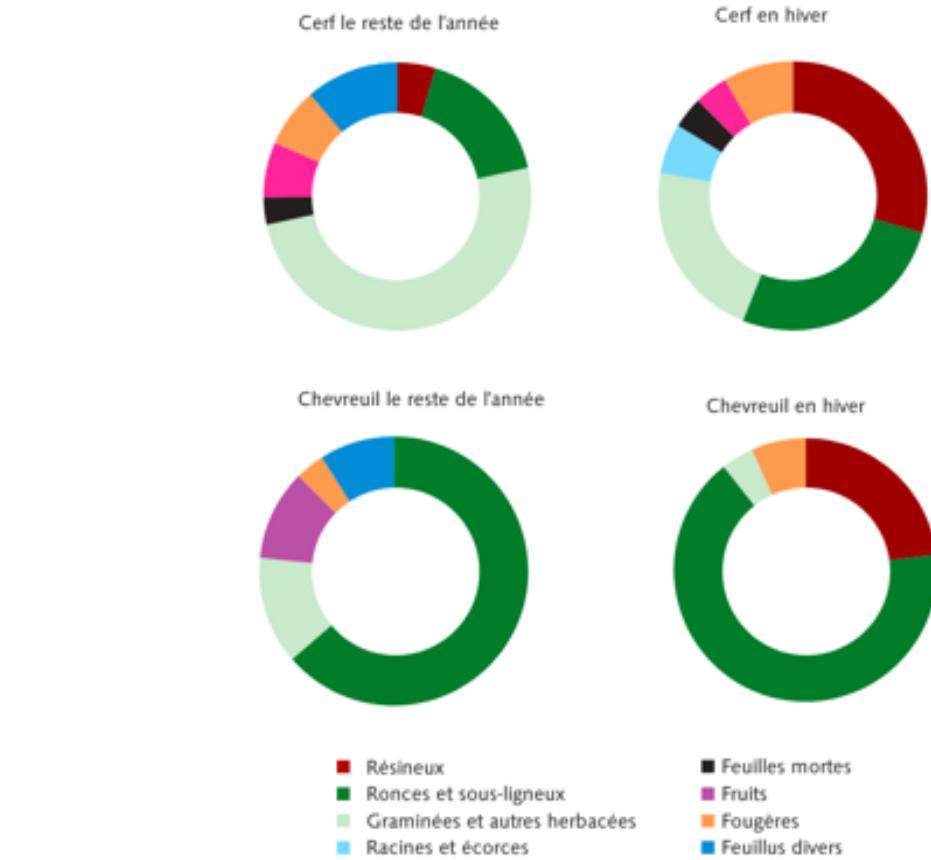
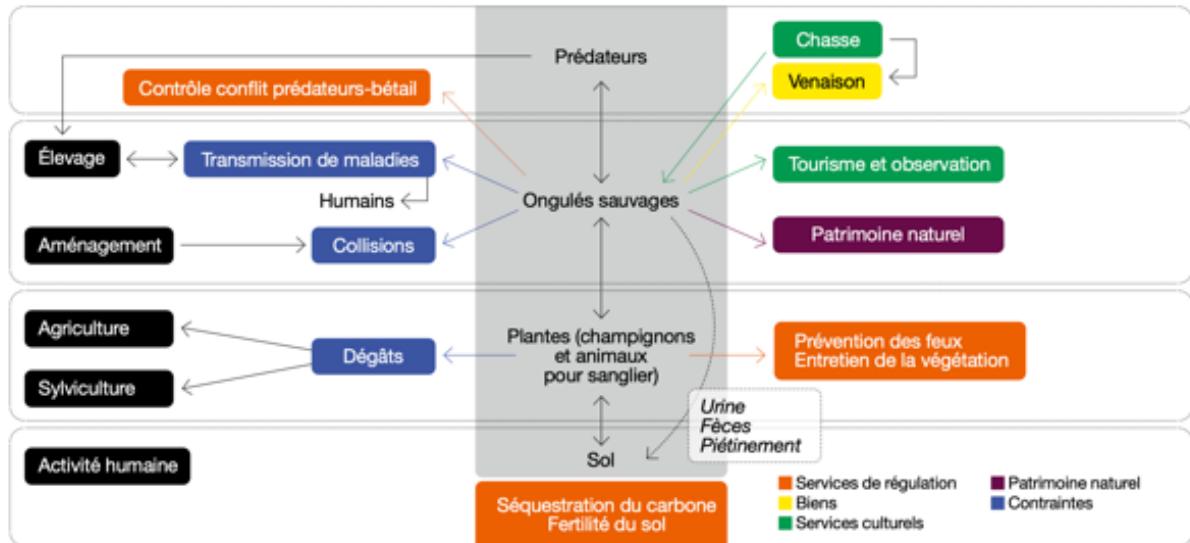


Figure 3 : Variation intra-annuelle du régime alimentaire du cerf et du chevreuil dans la Réserve Nationale de la Chasse et de la Faune Sauvage en forêt domaniale de la Petite-Pierre (67), pour le chevreuil et le cerf élaphe (Saïd et al., 2012).

### 1.3 Les interactions entre les ongulés et les autres composantes de l'écosystème forestier.

Les ongulés sauvages sont des acteurs clés dans les systèmes forestiers, ils ont une influence majeure sur leurs structures et leurs fonctionnements, influençant une multitude de processus écologiques, avec des conséquences potentielles sur le maintien des services écosystémiques rendu par les forêts (Bergquist et al., 2009 ; Barrère et al., 2021). La figure 4 issue du rapport intitulé « Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques », dit Efese (Bison and Loison, 2022), montre le rôle central des ongulés dans la fourniture des services écosystémiques et les services patrimoniaux rendus par les forêts. La variation observée depuis plusieurs décennies des populations d'ongulés sauvages a des répercussions importantes sur le maintien de la fourniture du bouquet de services écosystémiques. Bien que l'expansion des populations d'ongulés en Europe engendre des conflits avec l'utilisation des terres par les humains, ils jouent un rôle crucial dans le fonctionnement des écosystèmes (Linnell et al., 2020).



Source : figure issue du Rapport Efese - Loison & Bison 2022.

Figure 4 : liens entre les services écosystémiques, les enjeux patrimoniaux et les contraintes liés aux ongulés. Extrait du rapport Efese (Bison and Loison, 2022).

### 1.3.1 Interactions trophiques et effets en cascade

Ainsi, les ongulés interagissent directement et indirectement avec les plantes herbacées, les arbustes et les jeunes arbres du sous-bois et ces interactions peuvent avoir des effets en cascade sur d'autres espèces (Baltzinger et al., 2016). En effet, ces végétaux sont également une ressource pour d'autres organismes : par exemple, les insectes ou les oiseaux les utilisent pour s'alimenter, y trouver refuge ou se reproduire. Par exemple, directement ou indirectement, les populations d'ongulés peuvent avoir des effets sur l'abondance et la diversité de papillons (Pollard, 1994). Mais les ongulés sont aussi des proies, par exemple pour des grands prédateurs, comme le loup et le lynx. En leur présence, les ongulés sauvages peuvent modifier leur comportement pour éviter les habitats les plus risqués (Kuijper et al., 2016). Dans cet écosystème, différents organismes interagissent de multiples façons. Les ongulés sauvages jouent donc un rôle clé dans le fonctionnement de l'écosystème et le maintien de la biodiversité (Balandier et al., 2022).

### 1.3.2 Rôle des ongulés sur la diversité floristique

Les changements dans les communautés végétales sont influencés par une multitude de facteurs interdépendants, combinant des effets d'origines biotiques et/ou abiotiques. Ainsi les fortes populations d'ongulés jouent un rôle important sur la dynamique de la végétation et façonnent la composition de la végétation. Leur alimentation impact la structure verticale en limitant la croissance en hauteur et la répartition spatiale (Gill, 2001 ; Horsley et al., 2003) Par ailleurs, la sélectivité de leur alimentation peut affecter la composition des espèces en évitant la consommation d'espèces peu appétantes au détriment d'espèces plus attractives. C'est le cas par

exemple des graminées qui bénéficient souvent de la consommation des autres espèces pour se développer et coloniser l'espace (Rooney, 2001 ; Horsley et al., 2003 ; Côté et al., 2004), (figure 5). Les cervidés sont par conséquent des facteurs déterminants de la composition et de la dynamique de la végétation, en particulier pour le sous-bois (Boulanger et al., 2015).



Figure 5 : Effet des enclos/exclos sur la sélectivité de la flore par les ongulés en forêt domaniale de Colroy-Lubine (88). En exclos la végétation est dominée par les graminées, en enclos, la végétation est dominée par la ronce et d'autres espèces ligneuses. Crédit photo : ©Florian Vast

### 1.3.3 Dispersion des graines et connectivité paysagère

Les ongulés sauvages sont des grands animaux qui vivent dans une mosaïque paysagère de plusieurs centaines, voire de plusieurs milliers d'hectare. Quand ils se déplacent, ils contribuent à la dispersion des graines (Baltzinger et al., 2019). Deux mécanismes principaux existent : l'épizoochorie, où les graines s'accrochent au pelage des animaux, et l'endozoochorie, où les graines sont ingérées, transportées dans le tube digestif des animaux avant d'être relâchées dans les excréments. Ces processus facilitent la colonisation de nouveaux habitats par les plantes, renforçant la connectivité écologique et la dynamique des écosystèmes face aux changements environnementaux (Green et al., 2022).

### 1.3.4 Les effets des ongulés sur le renouvellement sylvicole

#### 1.3.4.1 Sur la régénération naturelle

Quand l'effet des ongulés sur la végétation devient-il un dommage ? Chaque brindille ou feuille consommée ne constitue pas un dommage pour une plante et chaque plante endommagée ne constitue pas un dommage pour un peuplement végétal. Les notions de « dommage » et de « bénéfice » dépendent des intérêts sociotechniques fixés par les différents groupes d'acteurs. Ainsi, le cœur du problème n'est pas le « conflit » entre la végétation et la faune, mais plutôt les divergences d'intérêts des acteurs. L'installation, la survie et la croissance des semis en conditions de régénération naturelle sont influencés par des facteurs abiotiques spécifiques au site : lumière,

température, précipitations, conditions de terrain (Reimoser and Gossow, 1996), ainsi que par des facteurs biotiques, notamment la présence d'ongulés. Des études ont montré que les ongulés sont l'un des principaux facteurs affectant négativement la régénération de nombreuses forêts tempérées et boréales (Rooney, 2001 ; Côté et al., 2004 ; Barančeková et al., 2007). Dans une analyse bibliographique (Ramirez et al., 2018) mettent en évidence le fait que la régénération des arbres ou le renouvellement des forêts est particulièrement sensible aux impacts immédiats des ongulés, comme l'abrutissement et le piétinement. Dans 70% des 435 cas étudiés, les ongulés avaient un effet négatif sur la régénération, la structure et le fonctionnement des forêts tempérées. En complément des pressions exercées par les ongulés sauvages sur leurs renouvellements, les forêts françaises doivent faire face aux défis du changement climatique, de la perte de biodiversité et des attentes sociétales (Chevassus-au-Louis et al., 2020).

#### 1.3.4.2 *Sur les plantations*

Depuis plusieurs années, les forêts françaises font face à diverses crises (ex : sécheresse, tempête, scolytes, chalarose du frêne) qui engendrent des perturbations du couvert forestier et induisent une augmentation des surfaces à régénérer annuellement par plantation (Fuller, 2001). Pour faire face à cette situation et à celle de la séquestration de carbone, l'État français a déployé depuis 2020, un plan de relance national qui comporte un volet consacré au reboisement (Fesneau, 2023). L'objectif annoncé est de planter 45 000 hectares (ha) d'arbres dans un délai de 2 ans (Leroy et al. 2021), qui vont s'ajouter aux 50 000 ha déjà plantés annuellement en moyenne.

Le succès d'une plantation dépend de la gestion de plusieurs facteurs. Parmi ces nombreux facteurs, on trouve la végétation compétitrice qui peut être gérée par la préparation mécanisée du site et augmenter ainsi la réussite des plantations (Löf et al., 2012) ainsi que les dégâts causés par les ongulés sauvages (cerf élaphe et chevreuil principalement) sur les arbres plantés qui nécessite d'être protégés. Les dommages causés par les cervidés peuvent engendrer une diminution de la croissance des jeunes arbres (Guerisoli and Pereira, 2020), provoquer des déformations rédhibitoires au niveau de la tige et entraîner leurs morts. Ces dommages, sont spatialement hétérogènes et répondent à une multitude de variables liées aux arbres plantés (âge, densité, espèces) ou à leur environnement comme par exemple la proximité des plants à la lisière, le dérangement des animaux, ou encore la densité des animaux (Ballon et al., 2005). De plus, il a été montré que les plants d'arbres issus de pépinière sont plus appétants et plus consommés que les rejets ou les semis naturels (Ballon et al., 1999) . Ainsi, les plantations nécessitent une attention particulière sur les impacts négatifs que peuvent avoir les ongulés sauvages, pour éviter que les efforts sylvicoles et financier ne soient vains. Dans ce contexte, les objectifs de renouvellement et par conséquent de production fixés par les sylviculteurs ne sont plus compatibles avec le niveau actuel des populations. A mesure que les populations européennes d'ongulés ont augmenté, les préoccupations des sylviculteurs et d'un certain public concernant les effets d'une telle densité d'ongulés sauvages sur les arbres et les forêts et leur capacité à se régénérer naturellement ou artificiellement se sont accrues. Il est urgent de trouver un compromis satisfaisant entre le succès du renouvellement des arbres de production et la conservation des populations de cervidés,

conditions essentielles pour restaurer et maintenir les services écosystémiques que les forêts fournissent (Shvidenko et al., 2005).

## 1.4 Les principaux types de dommages sur le renouvellement

### 1.4.1 L'abrutissement

L'abrutissement est un phénomène à ne pas négliger dans l'étude de la dynamique des écosystèmes forestiers (Weisberg and Bugmann, 2003). Il désigne toute forme de prélèvement alimentaire effectué sur les espèces forestières par les populations animales. Il inclut donc la consommation de feuilles, racines, tiges, pousses, bourgeons ou fleurs (figure 6) ; (Gill, 1992). La hauteur d'arbre la plus vulnérable à l'abrutissement est en moyenne de 40-55cm pour l'abrutissement de la pousse centrale et de 30-60cm pour l'abrutissement en général (Welch et al., 1991). Parmi les dégâts aux arbres, l'abrutissement est considéré comme la troisième menace pesant sur les peuplements d'arbres, derrière les insectes et les événements climatiques extrêmes (Requardt et al., 2009). Le choix des résineux sempervirents et des feuillus comme végétation cible pour cette étude repose sur le fait qu'il existe des différences significatives dans la disponibilité alimentaire qu'ils offrent aux ongulés, selon les saisons et la nature des ressources alimentaires disponibles. (Tixier et al., 1997) montrent l'importance du facteur saisonnier en remarquant que les espèces préférées changent au cours de la saison de végétation. Cette distinction devient encore plus évidente lorsqu'on considère les besoins nutritionnels des ongulés en automne, qui ont besoin d'une quantité de nourriture suffisante pour se constituer des réserves (König et al., 2020), en hiver, période de disette, et l'été, période d'abondance. Étudier ces deux modèles de végétation est une nécessité pour avancer sur la compréhension du phénomène d'abrutissement. Le choix de ne pas travailler sur une seule espèce se justifie également par le fait que le niveau d'appétence est différent entre les espèces (Borowski et al., 2021 ; D'Aprile et al. 2020) et également parce qu'il existe une temporalité saisonnière de l'abrutissement, liée à la digestibilité des végétaux (Maizeret et al., 1991 ; Gazeau, 2024).

En été, les feuillus représentent une ressource nutritive majeure pour les ongulés, leurs feuilles étant riches en protéines, sucres, minéraux et eau, éléments essentiels durant la période de croissance et de reproduction. Les résineux présentent des caractéristiques différentes. En général, ils sont moins nutritifs pour les ongulés que les feuillus, car leurs aiguilles contiennent des quantités plus faibles de nutriments digestibles et sont souvent riches en résines, qui rendent leur ingestion moins attractive. Cependant, en hiver, période de disette alimentaire, la disponibilité des feuillus diminue de manière significative. De ce fait, en hiver, les ongulés se nourrissent principalement de ronce et de résineux qui restent des ressources disponibles et essentielles à leur survie à cette période (Rietsch and Saïd, 2021 ; Storms et al., 2008).

## 1.4.2 Le frottis

Le deuxième type de dégâts exercé par le grand herbivore sur la végétation ligneuse est le frottis, un comportement observé notamment chez le chevreuil et le cerf élaphe (figure 6). Ce comportement présente deux principales fonctions : l'élimination du velours recouvrant les bois à la suite de leur croissance annuelle, et le marquage territorial par dépôt d'odeurs (Decors, 2005). Les cervidés sélectionnent activement les individus sur lesquels ils réalisent ces frottements (Gill, 1992). Les chevreuils privilégient généralement des tiges souples, peu ramifiées, et ne manifestent pas de sélectivité marquée vis-à-vis des essences. À l'inverse, les cerfs orientent leurs frottements vers des tiges de plus grand diamètre et montrent une préférence pour certaines espèces arborées (Gill, 1992). Les lésions induites par le frottis se distinguent de celles causées par l'écorçage : le frottis laisse fréquemment subsister des lambeaux d'écorce pendants autour de la plaie, ce qui n'est pas observé lors d'un écorçage (Daburon, 1963). Ces blessures peuvent affecter tout le périmètre du tronc, compromettant ainsi la conduction de la sève et pouvant conduire à la mort de l'arbre. Dans les cas les plus sévères, l'intensité du frottis peut entraîner la rupture complète de la tige.



**Abrouissement**

<b>Organes touchés et périodes sensibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• semences, résineux → automne et hiver</li> <li>• semis, pousses vertes → printemps et début d'été</li> <li>• bourgeons terminaux et latéraux → printemps, automne et hiver</li> </ul>
<b>Aspect</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• arraché ou déchiré, rameaux mâchonnés</li> </ul>
<b>Hauteur des dégâts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt; 110 cm pour le chevreuil</li> <li>• &lt; 200 cm pour le cerf</li> </ul>
<b>Contextes et essences sensibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• plants de pépinière généralement plus sensibles car plus riches en minéraux et plus attrayants en part leur introduction</li> <li>• chênes, érables, frêne, fruitiers, orme, saule, sapins, pins, épicéas et if</li> </ul>
<b>Conséquences</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• croissance ralentie → plant restant longtemps à portée du gibier</li> <li>• perte de dominance apicale → risque de fourche</li> <li>• perte de l'entièreté des pousses et diminution de la croissance &gt; 25% ou perte de l'entièreté des bourgeons et aiguilles des résineux sempervirents → mortalité du plant</li> </ul>



**Frottis**

<b>Organe touché</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tige principale des jeunes arbres</li> </ul>		
<b>Aspect</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tige frottée d'un seul côté → dégât de frayure</li> <li>• tige frottée sur le tour, cassée ou arrachée → dégâts de rut</li> </ul>		
<b>Périodes sensibles</b>	cerf	frayure	mi-juillet à mi-septembre
	chevreuil	rut	septembre à octobre
<b>Hauteur des dégâts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50- 100 cm pour le chevreuil</li> <li>• 100- 200 cm pour le cerf</li> </ul>		
<b>Contextes et essences sensibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• peupliers, saules, érables, frêne, merisier, chêne rouge, sorbier des oiseleurs, douglas, mélèzes, pins et sapins</li> <li>• jeunes plants et parfois baliveaux</li> <li>• arbre à tige souple, écorce lisse, à branchaison haute et à odeur forte</li> </ul>		
<b>Conséquences</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• croissance ralentie → plant restant longtemps à portée du gibier</li> <li>• dessèchement d'une partie du plant ou de l'entièreté, cassure → baisse de qualité technologique ou mort</li> </ul>		

Figure 6 : Récapitulatif des deux principaux dommages causés par le chevreuil et le cerf élaphe sur les arbres au stade du renouvellement. Source (CDAF, 2022)

## 1.5 Comment agir sur les populations d'ongulés pour limiter les impacts ?

### 1.5.1 Augmenter les prélèvements avec une pression de chasse plus forte

La première action à mettre en œuvre pour limiter les dégâts des ongulés sur le renouvellement consiste à réduire les populations de grands ongulés (Boulanger et al., 2024). Dans une revue bibliographique de 144 articles, essentiellement en Amérique du Nord et en Europe, (Bernes et al, 2018) montrent que les réductions des populations influent très fortement sur la régénération des arbres et sur l'abondance, la diversité et la composition du sous-bois. Une autre revue bibliographique de (Redick and Jacobs, 2020) confirme que la chasse et un moyen efficace pour limiter les dégâts aux régénérations forestières. Cependant, la corrélation qui existe entre la diminution des populations et la réduction des dégâts, n'est pas forcément linéaire. (Martin and Baltzinger, 2002) montrent que la relation entre la chasse et l'amélioration de la régénération est davantage liée à l'impact de la chasse sur le comportement des animaux qu'à une modification de leur densité. Une chasse plus intensive rend les animaux plus vigilants (Le Saout et al., 2014).

Actuellement la régulation par la chasse n'est que partielle car des facteurs économiques et sociaux empêchent une réduction suffisante des populations de cervidés pour répondre aux besoins des gestionnaires sylvicoles. En parallèle, les gestionnaires ont aussi comme levier, la gestion des habitats pour limiter les dégâts et la mise en place de protections. Dans les situations où les populations d'ongulés ne permettent pas de répondre aux enjeux de renouvellements immédiats, la réussite de la régénération ne peut être assurée par la seule stratégie de réduction des populations de cervidés. Face à ce constat, il existe différentes stratégies pour réduire l'exposition des plantations, soit la gestion des habitats, soit la protection des semis issus de la régénération naturelle ou celle des plants dans les zones de plantations.

### 1.5.2 Gérer les habitats pour limiter les dégâts.

Le cerf élaphe et le chevreuil sont souvent considérés comme des espèces clés de voute en raison de leur grande influence sur la structure et la diversité de la végétation forestière (Rooney, 2001 ; Boulanger, 2010) mais également, pour les sylviculteurs, par les dégâts qu'ils peuvent occasionner. Ces dégâts sont conditionnés par un ensemble de paramètres qui se positionnent à différents niveaux : (i) spatiales (paysage, parcelle, plant), (ii) temporelles (saisonnalité), (iii) anthropiques (sylviculture, chasse). Chez certaines espèces territoriales comme le chevreuil, ces éléments sont souvent déterminants dans la répartition de l'espace entre les individus. Par exemple les corridors, la présence d'éléments linéaires (routes, lisière) peuvent engendrer des concentrations et avoir des rôles déterminants sur les déplacements de ces espèces (Bonnot et al., 2013). A un niveau plus local, certaines pratiques du gestionnaire peuvent également avoir des effets sur le comportement alimentaire des herbivores. Le morcellement des habitats, la diversification des traitements sylvicoles, la pratique régulière des éclaircies, la mise en place de cloisonnement, la conservation d'une strate herbacée et arbustive. Tous ces éléments ont pour but de créer un biotope favorable offrant aux ongulés forestiers une ressource alimentaire diversifiée et abondante limitant les dégâts sur les jeunes plantations. L'analyse des variations de la sélection de l'habitat en fonction de la

densité des populations et de l'exploitation saisonnière des ressources par les ongulés fournit des connaissances opérationnelles déterminantes pour la gestion des habitats forestiers. Ces éléments constituent un levier essentiel pour la régulation des populations et la maîtrise des impacts écologiques qui en découlent (Pérez-Barbería et al., 2013). Pour être efficace, cette action doit être conduite pendant une période suffisamment longue et à un niveau spatial suffisamment grand (le massif forestier, le paysage). De plus, l'ensemble des acteurs concernés par la gestion de ces socio-écosystèmes doivent se concerter pour trouver des solutions satisfaisantes, ce qui complexifie la mise en œuvre des actions nécessaires. Cette stratégie reste théorique, elle est conditionnée par les niveaux de populations d'ongulés qui peuvent être variables en fonction des contextes, et par les connaissances scientifiques sur les interactions entre les ongulés et la végétation forestière. Au vu de ces éléments, l'élaboration d'itinéraires sylvicoles réduisant les dégâts causés par les ongulés, fait actuellement défaut. Cette option relève donc, d'une stratégie aux effets attendus sur un pas de temps de plusieurs années, nécessitant encore d'être consolidée par des travaux de R&D, et donc actuellement insuffisante pour les enjeux de réussite des renouvellements posés à court terme.

### 1.5.3 Protéger les plantations

Cette stratégie consiste à mettre en place des protections pour faire face aux dommages liés aux ongulés (principalement cerfs et chevreuils). Il existe de nombreuses méthodes de protections et celles-ci, quelle que soit la méthode utilisée constitue une dépense supplémentaire à la charge du propriétaire ou du gestionnaire. Cette stratégie s'impose actuellement comme le seul levier disponible à court terme pour faire face à cette situation. Les méthodes de protection qui sont à disposition sont très diverses et leurs fonctionnements se divisent en deux grands types, les protections mécaniques et les protections répulsives. Ces méthodes s'appliquent à différents niveaux spatiaux (de la parcelle entière à la protection individuelle). Pour protéger les grandes surfaces, les gestionnaires ont souvent recours à la pose d'une clôture sur l'ensemble de la parcelle. En France, l'Office National des Forêts (ONF) estime que plus de 50% des forêts domaniales présentent une surdensité d'ongulés par rapport aux objectifs fixés par les sylviculteurs (ONF, 2024), compromettant ainsi le renouvellement des peuplements d'arbres par plantation, et qui favoriserait ainsi l'appauvrissement de la diversité des espèces. Le temps nécessaire au maintien des protections va dépendre de plusieurs paramètres. En effet la dynamique de croissance va dépendre de l'espèce plantée, des conditions stationnelles locales

Le temps minimum pendant lequel une protection doit être maintenue pour garantir son efficacité dépend fortement de l'espèce forestière concernée, des conditions climatiques et des caractéristiques stationnelles locales (Gill, 1992). Certaines essences à croissance rapide, peuvent atteindre un stade de sécurité vis-à-vis de l'abrutissement en seulement quelques années (3 à 5 ans pour certains pins), alors que d'autres, avec des croissances initiales plus faibles comme le chêne ou le sapin pectiné, peuvent nécessiter une protection pendant 10 ans ou plus. Des conditions stationnelles favorables accélèrent la croissance et réduisent ainsi le temps de vulnérabilité. À l'inverse, sur des stations plus contraignantes (sols secs, pauvres ou compactés, hydromorphes), les plants peuvent rester dans une gamme de hauteur accessible aux ongulés

pendant une période prolongée, augmentant le risque de dommages si la protection est retirée trop tôt. Une évaluation régulière du développement des plants, et notamment de leur hauteur par rapport au seuil critique d'aboutissement est donc essentielle pour ajuster la durée de la protection de manière raisonnée. Le temps nécessaire au maintien des protections va donc dépendre de plusieurs paramètres.

#### 1.5.3.1 *Mettre en place une protection au niveau de la parcelle*

Une approche largement mobilisée dans la gestion forestière consiste à installer des clôtures pour exclure temporairement les cervidés des peuplements considérés comme vulnérables pour la régénération ([Vercauteren et al., 2006](#) ; [Märell et al., 2012](#)). Bien que quelques effets négatifs sur la régénération forestière aient été signalés à l'intérieur des clôtures, par exemple la prolifération de certains arbustes ayant un intérêt économique moindre ([Ward et al., 2018](#)), une méta-analyse récente a montré l'efficacité de cette méthode pour favoriser la croissance en hauteur, l'abondance et la diversité des jeunes arbres à l'intérieur des clôtures ([Bernes et al., 2018](#)), (figure 7). L'un des principaux inconvénients est le coût financier, qui peut souvent être prohibitif pour les sylviculteurs ([Löf et al., 2021](#)).

Les clôtures peuvent également avoir des répercussions spatiales plus larges, en augmentant la fragmentation du paysage et la répartition spatiale des grands herbivores, ce qui entraîne une augmentation de la pression d'aboutissement dans les zones non clôturées ([Baltzinger et al., 2018](#)). Ainsi, bien que perçue comme une solution efficace à court terme, les enclos s'inscrivent dans un contexte sociotechnique plus large, avec des visions de la gestion des milieux forestiers pouvant être différentes. D'autres moyens de protections peuvent être utilisés pour lutter contre les dommages engendrés par les ongulés, avec une action plus localisée autour du plant.



*Figure 7 : Comparaison de la dynamique du renouvellement forestier en enclos (a.) et en exclos (b.), sur le dispositif expérimental OFB/ONF - EFFORT (EFFets des Ongulés sur le Renouvellement forestier), en forêt domaniale de Trois Fontaine (52). Crédit Photo : ©Tommy Nehl*

### 1.5.3.2 *Les protections individuelles et leurs modes d'actions*

Les protections individuelles des jeunes arbres représentent un levier de gestion incontournable face aux dégâts provoqués par les ongulés sauvages. Qu'elles soient mécaniques (tubes, gaines, filets) ou basées sur des répulsifs sensoriels (olfactifs ou gustatifs), ces protections visent à établir une barrière fonctionnelle entre l'herbivore et le plant. Leur finalité est de préserver l'intégrité des jeunes arbres jusqu'à ce qu'ils atteignent un stade de développement où ils deviennent moins vulnérables. Ces dispositifs sont largement mobilisés dans les contextes de plantation. Le recours aux protections individuelles se justifie particulièrement dans les zones à forte densité d'ongulés, lorsque les enjeux sylvicoles sont élevés (essences à forte valeur économique ou patrimoniale), ou encore lorsque les dispositifs collectifs, tels que les clôtures, se révèlent techniquement complexes ou économiquement inaccessibles. Leur efficacité reste toutefois conditionnée par de nombreux facteurs : l'essence ciblée, le type de protection utilisé, la durée d'exposition aux herbivores, les conditions écologiques locales, ainsi que le niveau de pression d'abrutissement.

#### 1.5.3.2.1 *Les protections mécaniques*

Les barrières mécaniques constituent l'un des moyens les plus répandus pour limiter les dommages causés par les ongulés sur les jeunes arbres. Leur principe repose sur la création d'un obstacle physique empêchant les animaux d'atteindre les parties de l'arbre les plus vulnérables, notamment la pousse terminale (ou apex), les jeunes rameaux ou encore l'écorce de la tige (Gill, 1992). Ces dispositifs jouent un rôle essentiel dans les contextes de régénération où la pression d'abrutissement est forte, et où les objectifs sylvicoles exigent un taux de survie et de croissance élevé des plants.

Parmi les protections mécaniques individuelles, deux grandes catégories peuvent être distinguées selon l'étendue de la protection apportée :

1. **Les protections dites « totales »,** qui englobent l'intégralité du plant. Elles sont le plus souvent réalisées à l'aide de manchons ou de tubes (rigides ou grillagés), fabriqués à partir de divers matériaux (plastique, polypropylène, maille biodégradable, etc.). Cette méthode, bien maîtrisée par les sylviculteurs, offre une barrière efficace contre l'abrutissement et, dans certains cas, contre l'écorçage (Van Lerberghe, 2014). L'efficacité de ces protections dépend directement de leur hauteur. Il est généralement recommandé que la hauteur des tubes excède celle des atteintes potentielles selon les espèces d'ongulés présentes (par exemple 1,20 à 1,50 m pour le chevreuil, et jusqu'à 1,80 m pour le cerf élaphe)
2. **Les protections dites « partielles »,** qui visent à protéger uniquement une partie du plant, en particulier la pousse terminale. Ces dispositifs incluent par exemple les pinces à bourgeons, les ou encore des tuteurs naturels tels que les bambous, utilisés pour dissuader l'abrutissement. Bien que moins couvrantes, ces méthodes peuvent s'avérer suffisantes dans des contextes de pression modérée ou lorsqu'un grand nombre de plants doivent être protégés à moindre coût.

Ces dernières années, une attention croissante est portée à la réduction des coûts économiques, du temps de mise en œuvre et de l'impact environnemental des dispositifs de protection. Dans ce contexte, de nouvelles alternatives ont vu le jour, telles que l'utilisation de manchons

biodégradables, de filets extensibles ou encore de manchons en laine de mouton (un matériau naturel qui limite à la fois l'appétence et l'impact visuel). Toutefois, les performances techniques, la durabilité et l'impact écologique de ces nouveaux dispositifs restent encore peu documentés. Ces innovations s'inscrivent dans une dynamique plus large de développement de protections "raisonnées", mieux adaptées aux enjeux actuels de la sylviculture durable.

#### 1.5.3.2.2 Les protections répulsives

Les barrières répulsives jouent un rôle de dissuasion vis-à-vis des grands herbivores. Il existe un panel assez diversifié de méthodes qui se distinguent par la sollicitation de différents stimuli (olfactif, visuel, gustatif, sonore), par la réaction induite chez l'animal ainsi que par le mode d'application. Historiquement, les répulsifs olfactifs et gustatifs étaient basés sur des produits de synthèses, actuellement seuls les répulsifs élaborés à partir de produits d'origine naturels sont autorisés. Les effets de différentes molécules (par ex. : capsaïcine, urine, poils et fèces de prédateurs, produits à base de sang, composés soufrés, caséine) sur les animaux ont été étudiés, et leurs mécanismes d'action identifiés (El Hani et al., 1995). D'autres produits (graisse de mouton, amendement, peintures répulsives, engrais répulsifs) actuellement commercialisés sont moins bien renseignés et leurs efficacités restent sujettes à caution. Néanmoins, quels que soient la matière et le mode d'action impliqués, l'efficacité de la méthode dépend d'un grand nombre de facteurs comme la concentration du produit, la date d'application, les espèces plantées, les caractéristiques des ongulés, la capacité d'accueil en ongulés des systèmes forestiers, les conditions météorologiques (Elmeros et al., 2011). D'autres facteurs nous montrent l'importance d'identifier les stimuli impliqués dans le développement et le maintien du comportement alimentaire sélectifs de ces herbivores (Tixier et al., 1998). Ces facteurs sont, par exemple, l'accoutumance à l'odeur vis-à-vis des répulsifs qui limitent leurs efficacités en fonction du mode d'application (Kimball et al., 2009), et l'apprentissage par les animaux qui permet de distinguer et d'éviter les plantes traitées en utilisant des stimuli olfactifs, voire visuels. La compréhension des mécanismes comportementaux qui sous-tendent la fonction répulsive pour dissuader les herbivores de consommer les plantes est encore très incomplète (Stutz et al., 2019). Il est difficile de trouver des tendances générales sur l'efficacité de ces répulsifs qui s'appliqueraient à différents ongulés et à travers différents types d'habitats forestiers (Guerisoli et Pereira, 2020). La difficulté à trouver des tendances sur l'efficacité des protections est aussi liée au fait que les comportements des animaux en liberté et en captivité diffèrent (El Hani et Conover, 1995). Des études ont été réalisées en conditions contrôlées avec des résultats peu extrapolables aux conditions naturelles (Shiiba et al., 2021). Des répulsifs sonores peuvent également être utilisés pour dissuader les ongulés de fréquenter certaines zones. Cette approche qui influence le comportement de l'animal repose sur une théorie appelée « l'écologie de la peur » (Brown et al., 1999). Selon cette théorie, simuler la présence d'un prédateur est un moyen suffisamment puissant pour avoir des impacts sur la population. Pour être efficace, l'utilisation de la peur comme outil de gestion de la faune sauvage repose sur la minimisation de l'accoutumance. Cette accoutumance est en partie déterminée par le temps écoulé entre les expositions au stimulus sonore. Elle peut entraîner une diminution de la réactivité à un stimulus répété (Blumstein, 2016).

## 2 Objectifs et hypothèses :

---

L'objectif finalisé de cette étude est d'évaluer l'efficacité technique de différents dispositifs de protection individuelle contre les ongulés utilisés en plantation forestière, pour adapter les itinéraires sylvicoles aux conditions de pression croissante des ongulés sur les jeunes plants. Il s'agit d'identifier des solutions performantes pour limiter les dommages d'abrutissement et de frottis sur les jeunes plants ? Ces solutions diffèrent par leurs mécanismes d'action : barrière physique, répulsif gustatif, olfactif ou visuel. L'analyse vise à comparer ces dispositifs selon des critères de réduction des dommages, de survie des plants. Les résultats attendus doivent permettre de fournir des recommandations opérationnelles aux sylviculteurs.

Pour répondre à cet objectif finalisé, l'objectif scientifique de ce travail est d'analyser les effets de différentes protection individuelle sur les jeunes plants (en termes de survie et de dommages subis) et la pression exercée par les ongulés en conditions réelles. L'étude vise à estimer l'efficacité de dispositifs fondés sur des principes d'action variés (barrières physiques, répulsifs sensoriels), dans une large gamme de conditions locales en France. Cette problématique s'inscrit dans les enjeux actuels de gestion durable des forêts, dans la mesure où la régénération naturelle ou artificielle des peuplements est fréquemment compromise par l'intensité des dommages causés par les ongulés.

Pour répondre à cet objectif scientifique, je vais analyser dans quelle mesure les ongulés abrutissent des plants installés avec différentes méthodes de protection et dans quelle mesure cela affecte leur survie. Les hypothèses testées sont les suivantes :

Hypothèse 1 :

Les protections individuelles des plants réduisent les dégâts d'abrutissements occasionnés par les ongulés sur le plant.

Hypothèse 2 :

Les différentes méthodes de protection individuelle, qui relèvent de différents mécanismes d'action (effets mécaniques, répulsifs gustatifs, olfactifs ou visuels) diffèrent dans leur efficacité à réduire les dégâts occasionnés.

Hypothèse 3 :

Les protections individuelles des plants améliorent la survie des plants.



### 3 Démarche générale

---

Cette étude vise à comparer l'efficacité de différentes modalités de protection individuelle des plants vis-à-vis de l'abrutissement par le cerf élaphe et le chevreuil.

L'approche retenue repose sur la mise en œuvre d'expérimentations de terrain, conduites dans un réseau de quatorze plantations forestières, représentatives d'une diversité de conditions pédoclimatiques et sylvicoles (plaine et montagne, feuillus et résineux, schémas de plantation variés).

Dix modalités de protection individuelle sont testées, sélectionnées pour leur diversité de mécanismes d'action, qui couvrent un large spectre de stratégies de dissuasion mécaniques et répulsives, et leur pertinence opérationnelle pour les sylviculteurs.

Chaque dispositif expérimental est structuré selon un plan en blocs aléatoires, chaque bloc comprenant plusieurs unités expérimentales (UE), chaque UE correspondant à une modalité appliquée à un groupe de plants homogènes. La répartition des modalités au sein des blocs est aléatoire, assurant ainsi la prise en compte de l'hétérogénéité des parcelles.

Huit espèces d'arbres ont été sélectionnées pour l'expérimentation, incluant à la fois des feuillus (notamment plusieurs espèces de chênes ; cf. §4.2) et des résineux (sapin de Douglas, mélèze, pin maritime, cèdre, sapin de Bornmüller ; cf. §4.2), choisis pour leurs intérêts sylvicoles divers et leurs sensibilités différencierées aux effets de l'abrutissement.

Deux campagnes de suivi sont réalisées chaque année sur l'ensemble des dispositifs : l'une au printemps (avant débourrement), afin de caractériser les dégâts survenus pendant l'hiver ; et l'autre en fin d'été (après aoutement), afin caractériser les dégâts survenus pendant l'été. Les variables observées portent sur l'abrutissement (apical et latéral), la mortalité, ainsi que des paramètres secondaires relatifs à l'état sanitaire des plants et à la durabilité ou au repositionnement des dispositifs de protection. La durée du suivi est d'une année.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet multipartenaires, le projet PICO (Protection Individuelle Contre les Ongulés) constitué de plusieurs axes de recherches : un premier volet porte sur l'analyse comportementale des cerfs élaphe et des chevreuils en milieu contrôlé, face à différents types de protections, un second sur l'évaluation de ces protections en milieu naturel, et le dernier volet porte sur l'évaluation ergonomique de la pose des protections. Mon étude correspond au second volet de ce projet.



## 4 Matériels et méthodes

---

### 4.1 Sites d'étude

La recherche des sites expérimentaux s'est faite en rédigeant un cahier des charges, qui définit les caractéristiques des parcelles recherchées :

- Parcelles dans des zones où la pression des ongulés sur les plantations est estimée comme forte par les propriétaires/gestionnaires.
- Parcelles en gestion courante, incluses dans un projet de plantation par son propriétaire.
- Sur l'ensemble du réseau : avoir une diversité des conditions locales en se situant sur un gradient de conditions macro-écologiques.
- Sur l'ensemble du réseau : avoir une diversité d'espèces d'arbres.

Ce cahier des charges a été envoyé aux gestionnaires/propriétaires et après avoir reçu différentes propositions de leur part, nous avons pu choisir les sites expérimentaux en fonction des critères souhaités. Quatorze sites ont été installés, principalement localisés dans le quart Nord Est de la France, avec 10 sites, ainsi que deux sites situés en Belgique et deux sites situés dans les Alpes (figure 9). La première phase d'installation a été réalisée durant la saison hivernale 2022/2023, avec l'installation de sept sites, et la seconde phase a été conduite durant l'hiver 2023/2024, avec l'ajout de sept sites. La répartition géographique permet d'assurer une large variabilité des contextes pédoclimatiques et géographiques (tableau 1, annexe 2). Le choix des sites a été effectué en garantissant une certaine homogénéité stationnelle de chaque parcelle. De plus, les zones présentant des caractéristiques susceptibles d'affecter significativement l'approche des ongulés, telles que des pentes trop abruptes, des enrochements ou des types de végétation particuliers, ont été évitées. Les dispositifs ont également été installés à une distance suffisante des points d'eau selon la réglementation en vigueur ([Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2019](#)).

Les sites couvrent une gamme étendue de contextes pédoclimatiques et géographiques :

- Une couverture géographique qui s'étend de Chimay (Belgique - 49.190519, 3.089986) jusqu'à Magland (France - 46.00888, 6.600895) du Nord au Sud et de Plainfaing (France - 48.143124 7.00698) jusqu'à Orléans (France - 47.818, 2.50446) d'Est en Ouest ;
- Une pluviométrie moyenne annuelle variant de 636 à 1235 mm (période 1991-2000) ;
- Une température moyenne annuelle variant de 9,8 à 11,8°C (période 1991-2000) ;
- Des pentes variant de 0 à 40 % ;
- Des altitudes comprises entre 50 m et 1050 m ;
- Des sols aux qualités nutritionnelles diverses pour les arbres : sols hydromorphes sur limons et argiles, sols podzoliques, ainsi que des sols superficiels sur roches cristallines en montagne.

Le choix d'implanter nos expérimentations sur des parcelles dont la gestion du projet de plantation relève du gestionnaire, implique de s'adapter au schéma de plantation préalablement établi. Ce schéma indique l'agencement des arbres sur la parcelle. Deux types de schémas sont présents dans le projet (figure 8) : (1) des schémas de plantation « en ligne », où les arbres sont plantés en ligne en respectant un espacement entre les lignes et un espacement entre les plants sur la ligne ; et (2) des schémas de plantation « en placeau », où les plants sont regroupés au sein de placeaux carrés de dimensions variables et où la répartition des placeaux au sein de la parcelle se fait en fonction de l'itinéraire décidé par le gestionnaire/propriétaire.

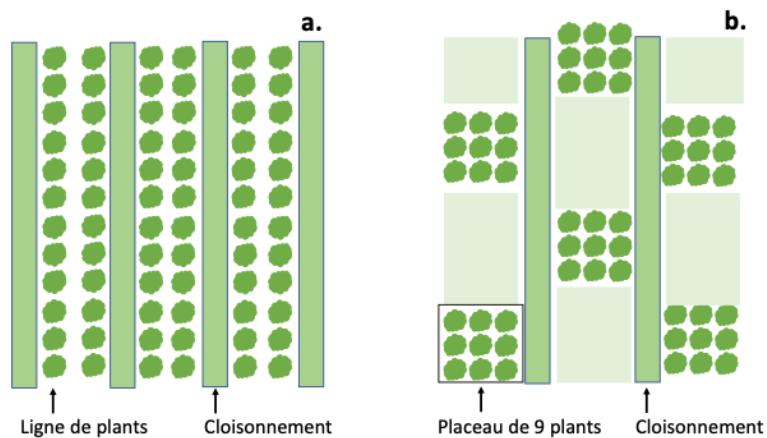


Figure 8: Schéma de plantation en ligne (a) et en placeau (b)

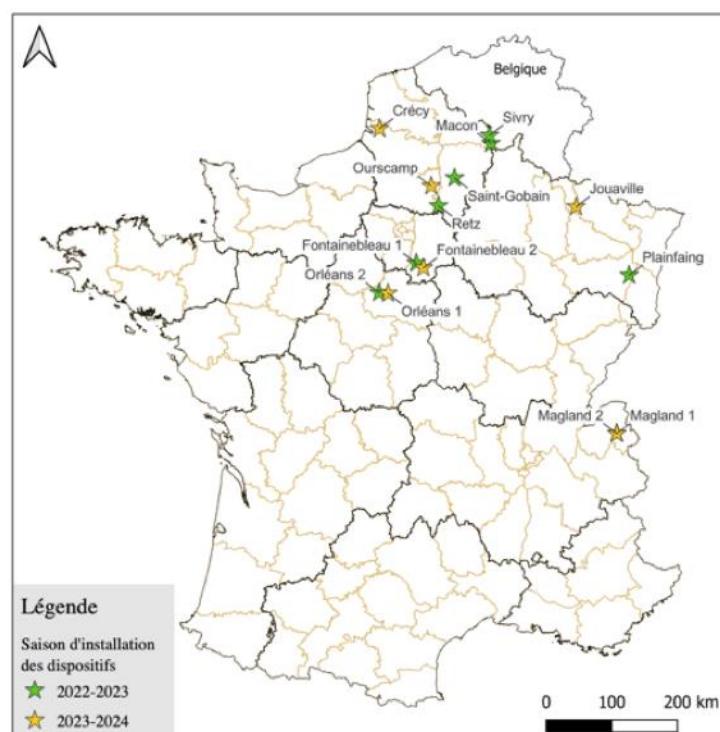


Figure 9 : Implantation des sites expérimentaux PICO (Protection Individuel Contre les Ongulés), en France et en Belgique

Tableau 1 : Caractéristiques des sites expérimentaux. La pluviométrie et la température annuelle représentent des moyennes calculées à partir des normales climatiques spatialisées AURELHY sur la période 1981-2000 (Canellas et al., 2014)

Nom du site	Pays/ Département	Type de sol (norme UCS)	Coordonnées géographiques (degrés décimaux, arrondi au dixième de degré)		Altitude (m)	Pente (%)	Date de plantation	Espèce(s)	Schéma de plantation	Densité de plantation (plants ha <sup>-1</sup> )	Âge des plants (année)	Type de plant	Hauteur moyenne (cm) : moy et min / max	Provenance	Pluviométrie annuelle (mm an <sup>-1</sup> )	Température moyenne (°C)
Retz	France/02	Brunisols, UCS N°238	49.19, 3.09	105	2	Octobre 2022	Ch. sessile	Ligne	2300	3	1S2	66 15 / 120	QPE-104- Perche	765	11,0	
Saint-Gobain	France/02	Neoluvisols UCS N°36	49.61, 3.29	90	7	Janvier 2023	Ch. sessile	Ligne	2040	2	1S1	36 17 / 75	QPE 102- Picardie	745	11,0	
Fontainebleau P673	France/77	Podzosols UCS N°41	48.36, 2.62	130	0	Février 2023	Ch.sessile +Ch. pubescent	Placeau	216	2	1S1	30-50 15 / 62	QPU101 et QPE 106	707	11,5	
Fontainebleau P614	France/77	Podzosols UCS N°41	48.39, 2.60	127	0	Janvier 2024	Ch.pubescent + Ch.Tauzin	Placeau	216	1	1-0	35 20-50	QPU751 Provence	709,1	11,5	
Orléans_p24	France/45	Planosols, UCS N° 23	47.80, 2.59	145	0	Avril 2023	Pin maritime	Ligne	2000	1	1-0	35	NA	734	11,6	
Orléans_p118	France/45	Planosols, UCS N° 23	47.82, 2.50	145	0	Avril 2023	Ch. pubescent	Placeau	NA	2	1S1	30	QPU 741 Languedoc	734	11,6	
Plainfaing	France/88	Brunisols, UCS N°6601	48.14, 7.00	670	37	Mars 2023	Sapin de douglas	Ligne	2000	1	Godet 200cm <sup>3</sup>	14 5 / 32	La Luzette (PME-VG- 002)	967	10,8	
Crécy	France/80	Neoluvisols, UCS N°311	50.21, 1.83	80	0	Février 2024	Sapin de douglas	Ligne	1000	1	Godet 200cm	15	La Luzette (PME-VG- 002)	928	11,0	
Ourscamp	France/60	Brunisols, UCS N°111	49.53, 3.05	50	0	Mars 2024	Ch.sessile	Ligne	2800	1	1-0	30-50 cm	QPE 102- Picardie	687,8	11,8	
Jouaville	France/57	Néoluvisols, UCS N°2207	49.14, 5.97	290	6	Mars 2024	Sapin de Douglas	Ligne	2000		Godet 200cm	26 12 / 43	La Luzette (PME-VG- 002)	754	10,7	
Magland_S	France/74	Rendisols, UCS N° 64	46.00, 6.60	926	40	Octobre 2023	Sapin de Bornmüller	Placeau	486	1	Godet 400cm	15	ABO-VG- 001	1235	10,75	
Magland_M	France/74	Rendisols, UCS N° 64	46.00, 6.60	1050	35	Octobre 2023	Mélèze d'Europe	Placeau	486	1	Godet 350cm	15	LDE-VG- Sudetica	1235	10,75	
Macon	Belgique	Brunisol- redoxisol, UCS N°92	50.02, 4.21	270	0	Février 2023	Ch. sessile	Ligne	1255	3	RN	110 71 / 135	NA	1061,1	9,6	
Sivry	Belgique	Brunisol- redoxisol, UCS N°92	50.13, 4.17	230	0	Novembre 2022	Ch. sessile	Placeaux	320	3	RN	113 82 / 152	Bassin Parisien	984,1	9,9	

## 4.2 Espèces d'arbres

Le choix des espèces retenues pour ce projet s'est fait en veillant à respecter une liste de critères définie en amont, et qui permet de recentrer le choix sur certaines espèces :

- Avoir des espèces qui diffèrent dans leur sensibilité face aux dégâts occasionnés par les ongulés. Pour répondre aux questions sur l'attractivité des espèces moins documentés, le choix s'est porté sur une diversité d'espèces plus large.
- Avoir un équilibre entre les espèces feuillues et les espèces résineuses, représentatives des conditions pédoclimatiques et topographiques dans lesquelles elles sont installées.
- Prendre en considération les attentes des gestionnaires sur les enjeux économiques et sylvicoles, avec des espèces forestières prévues initialement dans leurs projets de plantation, permettant de contribuer à la durabilité des services écosystémiques de la forêt.

La prospection des sites a abouti à une sélection de huit espèces d'arbre pour l'ensemble du projet.

Pour les sites situés en plaine, cinq espèces ont été retenues au niveau du projet :

- le chêne sessile (*Quercus petraea* (Mattus.) Liebl.),
- le chêne pubescent (*Quercus pubescens* Willd.),
- le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.),
- le pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.)
- le sapin de Douglas de l'Oregon (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, var. *menziesii*).

Pour les sites en montagne, quatre espèces ont été sélectionnées :

- le sapin de Douglas de l'Oregon (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, var. *menziesii*)
- le mélèze d'Europe (*Larix decidua* Mill.),
- le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carr.)
- le sapin de Bornmüller (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* (Mittf.) Coode & Cullen).

Cette diversité dans le choix des espèces peut s'avérer intéressante, notamment en montagne, puisque les résineux représentent une part importante de l'alimentation des ongulés pendant la période hivernale lorsque que la neige est présente ([Chevrier, 2016](#)).

Les plants issus de pépinière, qui sont utilisés pour la réalisation des plantations, présentent des caractéristiques différentes en fonction de l'espèce d'arbre et de la disponibilité de ces espèces au moment de la réalisation de la plantation. Parmi ces caractéristiques on retrouve le « type de plants », qui correspond aux méthodes de culture utilisées pour cultiver les arbres en pépinière. Sur les différents sites on retrouve 3 types de plants différents :

- **1S1** : Technique culturale utilisée en pépinière, le premier **1** signifie 1 an de croissance à partir du semis, le **S** désigne une opération de « Soulevage » pour dépivoter le système racinaire et le deuxième **1** correspond à une seconde année de croissance. (plants en racines nues).

- **1S2** : Technique culturale utilisée en pépinière, le premier **1** signifie 1 an de croissance à partir du semis, le **S** désigne une opération de « Soulevage » pour dépivoter le système racinaire et le **2** correspond à deux années de croissance. (plants en racines nues)
- **1-0** : Technique culturale utilisée en pépinière : la graine est semée en godet et bénéficie d'une année de croissance. Pour les godets, plusieurs volumes sont disponibles (200 cm<sup>3</sup>, 350 cm<sup>3</sup>, 400 cm<sup>3</sup>).

Tous les plants fournis ont une provenance connue. Cela signifie que les graines utilisées réaliser le semis en pépinière proviennent d'un secteur géographique donné, répondant à des contextes pédoclimatiques locaux, et issues de peuplements d'arbres ou de verger à graines sélectionnés pour leurs caractéristiques morphologiques (branchaison, qualité du bois) et physiologique (résistances diverses) des arbres qui s'y trouvent. Par exemple, un chêne sessile avec une provenance **QPE-102-PICARDIE** signifie :

- **Q** = Première lettre du genre
- **PE** = Deux premières lettres de l'espèce
- **10** = Numéro de la zone bioclimatique
- **2** = Numéro d'ordre croissant du Nord-Ouest au Sud-Est
- **PICARDIE** = Région de provenance des graines

Le principe de codification est le même pour toutes les espèces d'arbres forestières soumises à une réglementation.

Les plants installés dans les différentes expérimentations différaient en âge (de 1 à 3 ans) et en hauteur moyenne (de 14 à 113 cm).

#### 4.3 Méthodes de protections individuelles

Dix modalités de protection individuelle ont été mises en place. Ces modalités ont été sélectionnées à partir d'un panel de protections disponibles sur le marché, selon leurs mécanismes d'actions (tableau 2) et leur pertinence pratique pour les sylviculteurs. L'accent a été mis sur des protections fréquemment utilisées dans les pratiques courantes mais pour lesquelles les données empiriques sur leur efficacité demeuraient limitées. Les modalités testées possèdent un ou plusieurs mode(s) d'action(s) sauf la modalité témoin qui n'en présente aucun.

##### 4.3.1 Pas de mode d'action

- **Témoin** (*figure 10 et 11 : photo a*) : Pas de protection appliquée sur le plant qui reste par conséquent soumis à l'abrutissement. Cette modalité sert de référence pour l'analyse de des dégâts d'abrutissement dans les autres modalités, dans chaque expérimentation.

#### 4.3.2 Mode d'action mécanique

- **Gaine** (*figure 10 et 11 : photo b*) : il s'agit d'un manchon de protection plastifié, positionné autour du plant, qui est maintenu par deux piquets en bois, enfouis de 30 cm, situés à 15 cm de part et d'autre du plant, sur lesquels le manchon est agrafé. Elle confère au plant une protection très forte en empêchant physiquement les ongulés d'accéder au plant, tant que le plant ne sort pas de la gaine.
- **Piquets** (*figure 10 et 11 : photo c*) : Trois piquets en bois sont disposés en triangle autour du plant, à une distance d'environ 20 cm les uns des autres, avec un angle par rapport à la verticale de 30 degrés. Les piquets sont enfouis à une profondeur de 30 cm. Les extrémités supérieures des piquets sont rassemblées et fixées entre elles de manière à former un « tepee ». Cette protection mécanique partielle permet de limiter l'accès au bourgeon terminal du plant, pour les ongulés.

#### 4.3.3 Modes d'actions mécanique et visuel

- **Pince** (*figure 10 et 11 : photo d*) : C'est une manchette de protection en plastique avec des excroissances piquantes, qui se positionne autour du bourgeon terminal du plant une fois que la dernière unité de croissance est lignifiée, et qui doit être repositionnée chaque année après la saison de végétation. Pour la positionner correctement, il faut prendre la manchette entre le pouce et l'index (les fines brosses orientés vers la tige du plant) et positionner l'élément centrale à environ 5 cm du bourgeon terminal, les grandes excroissances orientées vers le haut. Sa protection mécanique est partielle, seul le bourgeon terminal est protégé. Son mode d'action visuel est dû à sa couleur bleue ou orange qui aurait un effet dissuasif sur les ongulés.

#### 4.3.4 Modes d'actions gustatif et olfactif

- **Graisse 1** (*figure 10 et 11 : photo e*) : C'est une application de Trico®, un produit liquide à base de graisse de mouton (64,6 g/l), qui s'applique par pulvérisation du produit pur, une fois par an, au printemps (avant débourrement), sur les parties de l'arbre susceptibles d'être attaquées par les cervidés (tiers supérieur de l'arbre). L'application est de 8ml par plant, et est réalisée selon les conditions d'applications préconisées par le fabricant. A noter que le Certiphyto est obligatoire pour l'application. Cette protection est partielle puisque seulement le tiers supérieur du plant est traité.
- **Graisse 2** (*figure 10 et 11 : photo e*) : Similaire à la modalité **Graisse 1**, sauf pour la période d'application. Dans cette modalité, l'application a lieu deux fois par an, une fois au printemps (avant débourrement) et une fois à l'automne (après aoutement).
- **Laine** (*figure 10 et 11 : photo f*) : La laine de mouton est appliquée sur le tiers supérieur du plant, elle est enroulée sur le long de la tige principale. La laine est une protection partielle qui combine un mode d'action gustatif (par le côté fibreux de la laine) et une action olfactive (par une odeur de mouton)

- A noter que cette modalité a fait l'objet d'une modification dans le protocole à compter de juin 2023. La laine de mouton utilisée initialement dans le projet à l'état brute, n'est pas conforme à la réglementation (CE) 1069/2009 (*Règlement (CE) no 1069/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et abrogeant le règlement (CE) no 1774/2002 (règlement relatif aux sous-produits animaux)*) ([Buzek and Malmström, 2009](#)) . Une modalité de substitution à base de laine lavée a remplacé la laine brute. Sur les sites installés avant juin 2023, la laine brute a été retirée et la ré-application de la modalité s'est faite avec de la laine lavée, conformément à la réglementation en vigueur.

#### 4.3.5 Modes d'actions gustatif, olfactif et visuel

- **Peinture** (*figure 10 et 11 : photo g*) : la peinture SEMA® s'applique avec une double brosse sur le tiers supérieur de l'arbre en partant du bas de la zone à traiter, vers le haut, pour éviter de casser les bourgeons. Le produit est dilué avec de l'eau (10%) pour faciliter son application. Deux applications sont réalisées, une au printemps (avant débourrement) et une à l'automne (après aoutement). Cette protection partielle est réputée protectrice contre les dégâts d'abrutissement par la combinaison d'un effet gustatif et olfactif (présence de composés amers) et d'un effet visuel (couleur bleue dissuasive).

#### 4.3.6 Mode d'action gustatif

- **Pâte** (*figure 10 et 11 : photo h*) : La pâte à bourgeon ELAF® s'utilise par application du produit pur, après l'avoir mélangée avec un agitateur manuel, avec un gant, sur la pousse terminale du plant en partant du bas de la zone à traiter, vers le haut, pour éviter de casser les bourgeons. Deux applications sont réalisées par an, une au printemps (avant débourrement) et une à l'automne (après aoutement). La pâte à bourgeon protège la pousse terminale via un effet gustatif lié à sa consistance et à la présence de grains de sable et par la gêne occasionnée lors de la mastication de la pousse terminale.
- **Chaux** (*figure 10 et 11 : photo i*) : Avant d'être appliquée, la chaux, qui est à l'état de poudre, doit être mélangée avec de l'eau pour lui donner une consistance pâteuse. Pour la dilution, il est préconisé 0,65 litre d'eau pour 1kg de chaux, ce qui correspond à un volume permettant de traiter 125 à 140 plants. Elle est ensuite appliquée à l'aide d'une double brosse sur le tiers supérieur du plant. Le mode d'action de cette modalité est basé sur la protection de la pousse terminale via un effet gustatif engendré par la chaux et par la gêne occasionnée lors de la mastication du bourgeon par les ongulés

Tableau 2 : Caractéristiques des modalités de protections des plants.

Modalité	Description	Mode(s) d'action(s)
<i>Témoin</i>	Mode d'application : -- Condition(s) d'application(s) : -- Période(s) d'application(s) : -- Dosage : -- Fabricant : --	Aucun
<i>Gaine</i>	Mode d'application : Maintenue par deux tuteurs en acacia de 20 mm x 20 mm enfoncés dans le sol. La gaine est ensuite agrafée sur les piquets. Condition(s) d'application(s) : -- Période(s) d'application(s) : Au moment de la plantation Dosage : -- Fabricant : Nortène Modèle : Gaine Nortène®Pro CLIMATIC MIXTE 150cm	Mécanique
<i>Piquets</i>	Mode d'application : Trois piquets acacia 20 mm x 20 mm enfoncés à la massette, positionnés en forme de « tipi » au-dessus du plant et maintenus à l'extrémité par un fil de fer. Condition(s) d'application(s) : -- Période(s) d'application(s) : Au moment de la plantation Dosage : -- Fabricant : --	Mécanique
<i>Pince</i>	Mode d'application : Pince qui se fixe au niveau du bourgeon du terminal Condition(s) d'application(s) : -- Période(s) d'application(s) : Au moment de la plantation, puis un repositionnement est nécessaire quand la croissance de l'année en cours est terminée. Dosage : -- Fabricant : Signumat Produit : Manchon Cactus®	Mécanique, Répulsif visuel
<i>Graisse 1</i>	Mode d'application : Pulvérisation sur le 1/3 supérieur du plant. Condition(s) d'application(s) : Pas de vent, pas de pluie après le traitement pendant 6h, température au-dessus de 5°C Période(s) d'application(s) : mars/avril ; avant le débourrement Dosage : répulsif olfactif d'origine animal ou végétal / graisse de mouton : 64 g/kg ; 8ml/plant Fabricant : Kwizda ou Protecta Produit : Trico® Certiphyto obligatoire pour appliquer. AMM 2120057	Répulsif gustatif, Répulsif olfactif
<i>Graisse 2</i>	Mode d'application : Pulvérisation sur le 1/3 supérieur du plant. Condition(s) d'application(s) : Pas de vent, pas de pluie après le traitement pendant 6h, température au-dessus de 5°C Période(s) d'application(s) : mars/avril ; avant le débourrement & octobre /novembre après aoutement. Dosage : répulsif olfactif d'origine animal ou végétal / graisse de mouton : 64 g/kg, 8ml/plant Fabricant : Kwizda ou Protecta Produit : Trico® Certiphyto obligatoire pour appliquer. AMM 2120057	Répulsif gustatif, Répulsif olfactif
<i>Laine</i>	Mode d'application : à enrouler/déposer sur le 1/3 supérieur du plant. Condition(s) d'application(s) : --	Répulsif gustatif, Répulsif olfactif

	<p>Période(s) d'application(s) : mars/avril ; avant le débourrement &amp; octobre /novembre après aoutement.</p> <p>Dosage : une poignée par plant</p> <p>Fabricant : Société TRAILLE</p> <p>Produit : laine de mouton lavée</p>	
<i>Peinture</i>	<p>Mode d'application : Avec une double brosse sur le 1/3 supérieur du plant.</p> <p>Condition(s) d'application(s) : pas de pluie pendant l'application et 4h après application.</p> <p>Période(s) d'application(s) : mars/avril ; avant le débourrement &amp; octobre /novembre après aoutement.</p> <p>Dosage : 125 plants / litre ; dilution à 10% d'eau pour fluidifier la peinture</p> <p>Fabricant : Contact Forestier</p> <p>Produit : Peinture SEMA® bleue</p>	Répulsif gustatif, Répulsif olfactif, Répulsif visuel
<i>Pâte</i>	<p>Mode d'application : avec un gant ou une double brosse sur le 1/3 supérieur du plant.</p> <p>Condition(s) d'application(s) : pas de pluie pendant l'application et 4h après application.</p> <p>Période(s) d'application(s) : mars/avril ; avant le débourrement et octobre /novembre après aoutement.</p> <p>Dosage : 3kg pour 1000 plants</p> <p>Fabricant : Elaf-solutions</p> <p>Produit : Bourgeon pâte ELAF®</p>	Répulsif gustatif
<i>Chaux</i>	<p>Mode d'application : avec une double brosse sur le 1/3 supérieur du plant.</p> <p>Condition(s) d'application(s) : pas de pluie pendant l'application et 24h après application.</p> <p>Période(s) d'application(s) : mars/avril ; avant le débourrement et octobre /novembre après aoutement.</p> <p>Dosage : 1kg pour 125 plants</p> <p>Fabricant : chaux de Saint Astier</p> <p>Produit : chaux hydraulique (norme NF EN 459-1)</p>	Répulsif gustatif



Figure 10 : Modalités de protections installées sur des sapins de Douglas ; (a) Témoin, (b) Gaine, (c) Piquets, (d) Pince, (e) Graisse 1 & 2, (f) Laine, (g) Peinture, (h) Pâte, (i) Chaux. Crédit Photo : ©Florian Vast



Figure 11 : Modalités de protections installées sur des chênes sessiles : (a) Témoin, (b) Gaine, (c) Piquets, (d) Pince, (e) Graisse 1 & 2, (f) Laine, (g) Peinture, (h) Pâte, (i) Chaux. Crédit photos : ©Florian Vast

#### 4.4 Schéma expérimental

Le schéma expérimental repose sur un dispositif factoriel en blocs aléatoires. Chaque dispositif comprend 5 ou 10 blocs. Une unité expérimentale (UE) est définie comme un ensemble de 5 à 10 plants contigus soumis à une même modalité. Chaque bloc comporte 10 UE, et l'allocation des modalités aux UE de chaque bloc s'effectue par tirage aléatoire.

Les dispositifs expérimentaux ont été installés dans des plantations dont le projet opérationnel était sous la responsabilité du gestionnaire, sans altérer l'itinéraire technique, à l'exception des protections contre les ongulés. Plusieurs configurations de plantation ont été utilisées pour l'installation des dispositifs : plantation monospécifique en ligne, plantation mélangée en ligne, plantation monospécifique en placeau de 9 plants, ou en placeau de 16 plants. La mise en place des blocs et des UE varie selon le schéma de plantation.

Dans les plantations monospécifiques en ligne, le dispositif comprend 5 blocs et une UE comprend 10 plants. Ainsi, la configuration expérimentale correspond à 10 plants par UE  $\times$  10 UE par bloc  $\times$  5 blocs par site, ce qui représente 500 plants au total par site. La disposition sur le terrain des blocs et des UE au sein des blocs dépend de la configuration de la parcelle. Un exemple de disposition est fourni dans les figures 12 et 13.

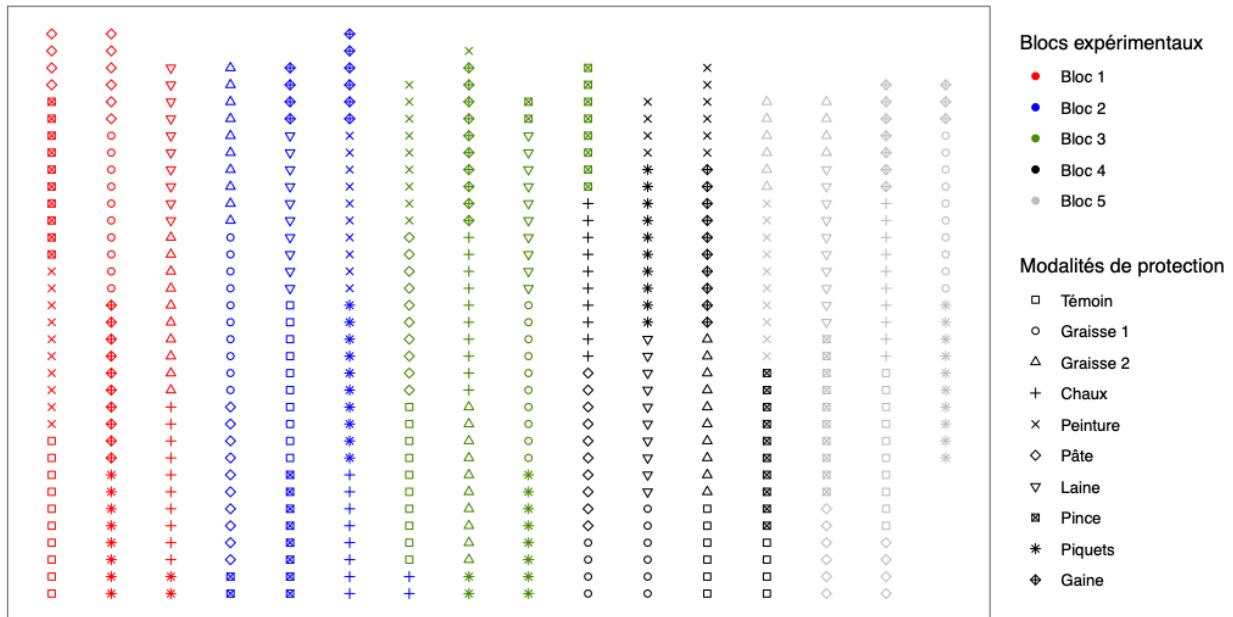


Figure 12 : Schéma d'un dispositif expérimental de plantation pure en ligne : site de Jouaville (57)



Figure 13 : Plantation expérimentale de sapin de Douglas, en ligne. Exemple du site de Jouaville (57). Crédit photo : ©Florian Vast

Dans les plantations mélangées en ligne, une seule espèce a été suivie et il n'a pas été possible de constituer des UE de 10 plants de la même espèce. Des UE de 5 plants ont alors été constituées. Le dispositif comporte 10 blocs. Ainsi, la configuration expérimentale correspond à 5 plants par UE  $\times$  10 UE par bloc  $\times$  10 blocs par site, ce qui représente 500 plants au total par site (tableau 3).

Dans les plantations monospécifiques en placeau de 9 plants, chaque placeau constitue une UE. Le dispositif comporte 5 blocs. Ainsi, la configuration expérimentale correspond à 9 plants par UE  $\times$  10 UE par bloc  $\times$  5 blocs par site, ce qui représente 450 plants au total par site (figures 14 et 15 ; tableau 3).

Dans les plantations monospécifiques en placeau de 16 plants, chaque placeau est divisés en 2 UE distinctes de 8 plants chacune. Chaque UE reçoit un traitement indépendant de l'UE adjacente, avec pour contrainte de ne pas appliquer la même modalité aux deux UE d'un même placeau. Ainsi, la configuration expérimentale correspond à 8 plants par UE  $\times$  10 UE par bloc  $\times$  10 blocs par site, ce qui représente 400 plants au total par site (tableau 3).

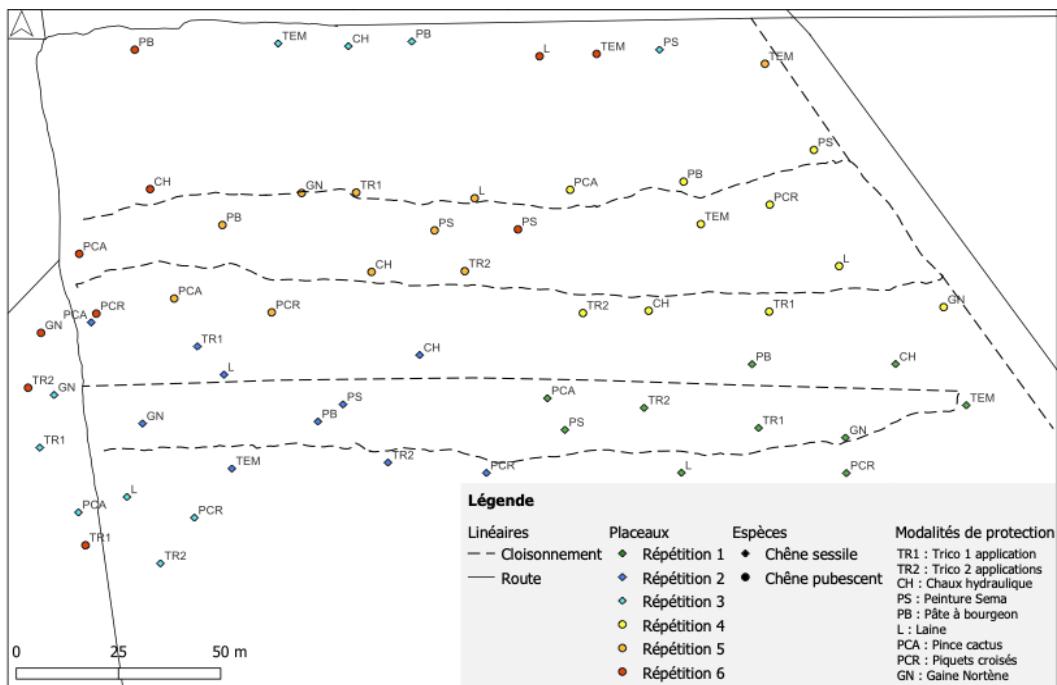


Figure 14 : Exemple d'un dispositif expérimental en placeau de 9 plants : Site de Fontainebleau (77). Sur ce site, chaque point correspond à un placeau de 9 plants.



Figure 15 : Placeau de 9 plants, protégés par des gaines, dispositif en forêt domaniale de 3 fontaines. Crédit photo : ©Tommy Nehl

Tableau 3 : Récapitulatif du nombre de plants en fonction du schéma de plantation

Schéma de plantation	Blocs	Plants par UE	Modalités	Plants par site
Monospécifique en ligne	5	10	10	500
Mélange en ligne	10	5	10	500
Placeau 9 plants	5	9	10	450
Placeau 16 plants	5	8	10	400

## 4.5 Variables mesurées

Les variables mesurées permettent d'évaluer l'efficacité des différentes modalités de protection sur divers paramètres (tableau 4). Deux types d'évaluation sont réalisés : un premier, portant sur les plants, permet d'apprécier les effets des modalités sur l'état sanitaire, l'incidence des dégâts, la croissance et les défauts identifiés ; un second, portant sur les dispositifs de protection, fournit une indication sur la durabilité de l'efficacité de ces modalités tout au long de la saison de végétation.

Tableau 4 : Récapitulatif des variables portant sur les plants et les protections, de leurs notations et de leurs descriptions

Variables	Espèces suivies	Notation	Description
État Sanitaire (Aspect général)	Résineux sempervirents	Sain	Les aiguilles sont majoritairement bien vertes, il n'y a pas de dessèchement de la tige et des branches
		Dépérissant niveau 1	Les aiguilles sont encore vertes mais plus de 10% présentent une décoloration (jaune). Moins de 10% de la hauteur de la tige est desséchée.
		Dépérissant niveau 2	Les feuilles et aiguilles sont encore vivantes mais plus de 10% sont déjà rouges, ou bien la tige présente un dessèchement marqué (>10%).
		Mort	Tige sèche sur toute sa longueur. En cas de doute, gratter la tige à la base pour vérifier que la tige est bien sèche
		Absent	Absence de plant à l'emplacement prévu.
État sanitaire (Aspect général)	Feuillus et mélèze	Sain	Il n'y a pas de dessèchement de la tige et des branches. En saison de végétation : une majorité des feuilles sont vertes
		Dépérissant niveau 1	Moins de 10% de la hauteur de la tige est desséchée. On ne considère pas qu'un bourgeon sec soit un signe de dépérissement.
		Dépérissant niveau 2	La tige présente un dessèchement marqué : + de 10% de la hauteur du plant est sèche
		Mort	Tige sèche sur toute sa longueur. En cas de doute, gratter la tige à la base pour vérifier que la tige est bien sèche
		Absent	Absence de plant à l'emplacement prévu.
Aboutissement terminal	Toutes	0	Pas de traces d'aboutissement
		1	Le bourgeon le plus haut par rapport à la verticale est consommé
Aboutissement latéral	Toutes	0	Pas de traces d'aboutissement

		1	Toutes les branches en dehors de la pousse terminale montrent des traces de consommation
<i>Frottis</i>	Toutes	0	Pas de traces de frottis
		1	Présence de frottis
<i>Hauteur du plant</i>	Toutes	Valeur mesurée en cm	La hauteur par rapport au niveau du sol du bourgeon le plus élevé. La mesure à la verticale sans redresser le plant.
<i>Défaut du plant</i>	Toutes	Rejets	A renseigner uniquement si la tige principale est morte. A la session de mesure suivante, le plus grand rejet est considéré comme la tige principale, on ne renseigne plus « rejet » dans la colonne défaut. Remarque : si présence de rejets alors que la tige principale est toujours vivante, on ne renseigne pas « rejet » dans la case défaut.
		Déchaussé	Le plant a été déchaussé (sorti de la terre) et se trouve à proximité de son emplacement
		Incliné	L'axe principal du plant est incliné. 3 niveaux possibles : 0-30°, 30-45° et >45° par rapport à la verticale
		Cime multiple	- Lorsque plusieurs branches (quelle que soit leur taille) qui partent du même point d'insertion sur la tige principale et dont les apex s'arrêtent au même niveau. - Quand il n'est pas possible d'identifier de dominance apicale claire.
		Nécrose	Nécrose visible sur le plant
		Frotture	Trace de frottement sur le plant lié à une protection (pique ou gaine)
		Autre	Autre défaut du plant, à préciser en commentaire
<i>Etat de la protection mécanique</i>	Toutes	Opérationnelle	La protection est positionnée telle que prévu dans le protocole et n'a pas subi de dommage qui nuisent à son rôle protecteur.
		Légèrement dégradée	La protection est mal positionnée ou bien a subi des dégâts qui peuvent nuire à son efficacité
		Dégradée	La cime du plant n'est plus protégée
		Nulle	La protection est absente
<i>Etat de la protection répulsive</i>	Toutes	Opérationnelle (figure 15)	Recouvrement d'1/3 à 1/4 de la partie supérieure du plant
		Légèrement dégradée	Moins d'1/4 du plant recouvert
		Dégradée (figure 15)	Traces éparses du répulsif encore visibles
		Nulle	Plus de traces visibles du produit
<i>Repositionnement_protection</i>	Toutes	Oui	La protection n'est plus considérée comme efficace, son repositionnement ou son remplacement est nécessaire pour la continuité des mesures. Par exemple, remontée les pinces, changer une gaine ou la repositionner, remplacer des piques.
		Non	Aucune modification à apporter à la protection
		NA	Valeur par défaut pour les plants des modalités répulsifs et la laine

#### 4.5.1 Présence d'ongulés sur la parcelle

L'objectif de ce suivi est d'identifier les espèces qui se rendent sur le dispositif, et d'estimer très approximativement la fréquence des visites par ces espèces. Dans chaque dispositif, un piège photographique (Marque : NUM'AXES, modèle : PIE1059 ; figure 16) est positionné sur un lieu de passage supposé des animaux, à proximité de la zone d'étude, permettant d'évaluer la présence et l'identification des espèces d'ongulés présentent. Son positionnement a fait l'objet d'une attention particulière afin de ne pas perturber la circulation de la faune sauvage.

La récolte des photos est mensuelle. Une analyse des photos est réalisée sur chaque dispositif à l'aide du logiciel de traitement de photo DEEPFAUNE, logiciel en libre accès : Version 2.1 du 2013-06-21. Le logiciel est téléchargeable sur le site <https://www.deepfaune.cnrs.fr>.



Figure 16 : Piège photographique NUM'AXES PIE1059, installé sur le site de Plainfaing (88). Crédit photo : ©Florian Vast

## 4.6 Identification des dégâts sur les plants

### 4.6.1 Abroutissement du plant

L'abrouissement est le principal enjeu lié à la présence d'ongulés sauvages en contexte sylvicole, qui peut, dans certains cas compromettre l'ensemble du renouvellement sylvicole. L'abrouissement des plants par les ongulés se définit par le prélèvement des bourgeons, des feuilles ou des pousses (Forêts de France, 2021) (figure 17). L'abrouissement peut avoir plusieurs conséquences au niveau du plant (retard et défauts de croissance, affaiblissement voire mortalité du plant). Ainsi en présence d'un abrouissement important et répété, des difficultés de réussite des plantations peuvent apparaître (Rietsch and Saïd, 2021).

En cas de doutes sur l'origine des dégâts observés sur les plants, on considère que ce n'est pas de l'abrouissement dû aux ongulés. Seules les consommations observées sur la pousse de l'année ne cours sont considérées. Deux types d'abrouissement sont notés sur chaque plant : l'abrouissement terminal et l'abrouissement latéral.



Figure 17: Exemples de différents types d'abrouissements : (a) abrouissement de la pousse terminale sur un sapin de Douglas, (b) abrouissement de la pousse terminale et d'une branche latérale sur un sapin de Douglas, (c) abrouissement d'une pousse terminale sur un chêne sessile, (d) abrouissement de la pousse terminale et des branches latérales sur un érable sycomore. Crédit photos : ©Florian Vast

#### 4.6.2 Frottis du plant.

Les frottis sont identifiables par la présence de lambeau d'écorce qui a été frottée par le cerf ou le chevreuil mâle. L'écorce est arrachée, la tige est dénudée, parfois même cassée (figure 18). On distingue deux types de frottis, celui en période de frayure (les mâles frottent leurs bois pour enlever le velours qui les recouvrent) et le frottis en période de rut, les jeunes mâles « attaquent » les jeunes arbres pour décharger leur agressivité, marquer leur territoire ou laisser des signaux olfactifs. Au niveau de l'arbre, les conséquences peuvent être variables en fonction de l'intensité du frottis, allant du bourrelet cicatriciel à la mort de l'individu ([Leroy-Terquem, 2021](#)).

On note la présence de frottis sur le plant. Seuls les frottis récents (non cicatrisés) sont notés. Si un frottis a déjà été observé la session précédente, on ne note plus sa présence.



Figure 18 : Exemples de dégâts de frottis sur sapin de Douglas sur le site de Plainfaing (88). Crédit photos : ©Florian Vast

#### 4.7 Mise en place et suivi des expérimentations

Les moyens d'identification des plants ont été choisis pour modifier le moins possible le comportement (attractivité ou au contraire répulsion vis-à-vis des plants) des cervidés. Le choix s'est porté sur un système de bague numérotée, installée au niveau du collet du plant, de manière qu'elle soit la moins perturbante possible vis-à-vis des ongulés (figure 19).



Figure 19 : Bague permettant l'identification d'un plant de sapin de Douglas. Crédit photo : ©Florian Vast

Le suivi de l'ensemble des arbres des 14 sites à lieu 2 fois par an, à deux périodes ciblées : la période 1, juste avant que les arbres amorcent leur débourrement, de manière à évaluer correctement les dégâts occasionnés pendant la période hivernale et pour pouvoir réappliquer les modalités dans les conditions optimales ; la période 2, juste après la phase d'aoutement des arbres pour évaluer leur consommation par les ongulés pendant les périodes printanières et estivales.

Afin d'assurer la précision et la fiabilité des mesures, une journée d'inter-calibration a lieu en mars 2024, permettant d'harmoniser les procédures expérimentales et minimiser les biais méthodologiques, entre les équipes de mesureurs des différents sites. Ce processus d'étalonnage est important pour garantir la validité des résultats et pour garantir leur reproductibilité dans le cadre de l'analyse statistique et de l'interprétation des données.

Au moment des sessions de notations, la variable « *repositionnement protection* » (tableau 4) est renseignée pour les protections mécaniques (gaines, piquets croisés, pinces cactus). Le repositionnement a lieu pour les protections mécaniques quand elles n'assurent leur rôle de protection (figure 20).



Figure 20 : État de modalités de protection considérées comme « nulle » ; (a) pince cactus située en dessous de l'accroissement annuel en hauteur, (b) Graisse1 située en dessous de l'accroissement annuel en hauteur, (c) Chaux située en dessous de l'accroissement annuel en hauteur, (d) et (e) Gaine trop petite pour protéger de l'abrutissement du cerf, (f) Pince qui ne protège pas le bourgeon terminal, (g) Piquets ne protégeant plus de l'abrutissement terminal et latéral. Crédit photos : ©Florian Vast

## 4.8 Analyse des données

### 4.8.1 Préparation et exploration des données

Avant de procéder à l'analyse, une phase d'homogénéisation et vérification des données a été réalisée sur les données collectées auprès des différents partenaires.

Ensuite, une analyse exploratoire, reposant notamment sur des représentations graphiques, a permis d'identifier d'éventuelles anomalies et de visualiser des relations potentielles entre les variables. Ces étapes ont contribué à une meilleure compréhension de la structure générale du jeu de données.

### 4.8.2 Choix des modèles statistiques

#### 4.8.2.1 *Variables analysées*

Le choix de la méthode statistique doit être guidé par la nature des données ainsi que par les objectifs spécifiques de l'analyse ([Warton et al., 2016](#)). Dans le cadre de cette étude, les variables de réponse incluent à la fois des variables binaires qui représentent, :

- (i) la mortalité, définie comme l'état vivant ou mort d'un individu,
- (ii) l'abrutissement terminal, correspondant à la consommation ou non du bourgeon terminal,
- (iii) l'abrutissement latéral, indiquant la consommation ou non des bourgeons latéraux,

et une variable continue :

- (iv) la hauteur des plants en centimètre.

Les variables explicatives intègrent à la fois des effets fixes, choisis pour représenter explicitement les facteurs analysés dans la population étudiée, et des effets aléatoires, permettant de prendre en compte les sources de variation non contrôlées. Les effets fixes comprennent : la modalité de protection (variable catégorielle), mesurée au niveau de l'unité expérimentale (UE). Les effets aléatoires incluent : le site quand l'analyse est au niveau du réseau et le bloc expérimental quand l'analyse est au niveau de chaque site.

#### 4.8.2.2 *Deux niveaux d'analyses : réseau et site*

Une première approche initialement envisagée consistait en l'élaboration d'un modèle statistique général multi-sites intégrant l'ensemble des observations, ce qui, en théorie, permet d'augmenter la puissance statistique en exploitant toutes les observations dans un modèle unique, et de fournir à la fois une analyse au niveau du réseau entier et au niveau de chaque site. Cependant, cette

démarche s'est trouvée limitée d'une part, par l'absence de variables détaillées caractérisant précisément chaque site et, d'autre part, l'existence d'interactions significatives quasi systématiques entre les variables explicatives et les variables reflétant les sites. Ceci indique que les effets des facteurs étudiés, varient selon le contexte local, et rend difficile l'interprétation des de ces effets.

Face à la l'occurrence systématique de ces interactions, pour avoir une meilleure compréhension des mécanismes influençant la mortalité et l'abrutissement des plants, il est apparu intéressant de combiner des analyses à deux niveaux :

- une analyse globale du réseau entier, sans distinguer les sites, pour dégager une tendance générale au niveau des 14 sites,
- des analyses site par site pour isoler les effets propres à chaque site, facilitant ainsi une interprétation plus précise des résultats qui prennent en compte la variabilité inter-sites observée dans le réseau.

#### 4.8.2.3 *Exploration des autocorrélations spatiales*

Plusieurs formes d'autocorrélation spatiales peuvent affecter l'analyse des variables mesurées sur les plants, et peuvent remettre en question l'hypothèse d'indépendance des observations entre elles. En effet, des autocorrélations peuvent apparaître entre plants voisins du fait de conditions de croissance similaires, liées à des facteurs environnementaux comme la nature du sol, la topographie, la proximité d'une lisière ou la composition de la végétation spontanée. Ces corrélations positives, peuvent s'étendre sur des distances allant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Les comportements des cervidés peuvent également générer des autocorrélations entre plants à plus courte distance : un cervidé qui entre dans une parcelle peut abrutir plusieurs plants voisins, induisant une probabilité similaire d'abrutissement pour les plants spatialement proches. Bien que la structure en blocs des dispositifs expérimentaux soit conçue pour contrôler une partie de cette variabilité spatiale, elle ne permet pas de capturer l'ensemble des corrélations résiduelles. Il est donc nécessaire d'évaluer, une fois les effets de blocs intégrés dans les modèles, l'existence éventuelle d'autocorrélations spatiales résiduelles afin de garantir la validité des inférences statistiques.

Les autocorrélations spatiales ont été évaluées pour les modèles expliquant l'abrutissement terminal. Pour cette évaluation, j'ai utilisé uniquement les dispositifs de plantation en ligne. Cette disposition permet une meilleure estimation de la distance entre les individus. Les positions des plants ont été reconstitués à partir de l'espacement théorique entre les lignes et entre les plants en supposant un espacement constant entre les plants. Les plantations en placeaux ont été exclues en raison de l'absence de repères spatiaux dans la parcelle suffisamment précis.

Dans un premier temps, j'ai construit un modèle linéaire généralisé (GLM) binomial en y introduisant un effets aléatoire lié aux blocs expérimentaux, qui s'est révélé statistiquement

significatif. Cependant, ce type de modèle suppose que les résidus du modèle, c'est-à-dire les différences entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle, sont indépendants les uns des autres. Lorsque cette hypothèse n'est pas vérifiée, une surestimation de la significativité des effets testés et à une mauvaise spécification du modèle peut survenir. Les autocorrélations entre les résidus peuvent avoir différentes origines dont, tout particulièrement, une structure spatiale des phénomènes étudiés.

Afin d'estimer l'existence de structures spatiales dans les données, j'ai évalué l'autocorrélation spatiale des résidus du modèle à l'aide d'un corrélogramme spatial basé sur l'indice de Moran. Ce test permet d'évaluer l'évolution de l'autocorrélation entre deux observations en fonction de la distance entre ces observations. J'ai choisi de calculer cet indice avec les paramètres suivants :

- Une classe de distance de 2m qui correspond à l'espacement moyen entre les plants dans la plupart des plantations.
- Une évaluation de la significativité de l'autocorrélation en réalisant 1000 permutations pour améliorer la robustesse de test. J'affecte aléatoirement une valeur de résidus aux coordonnées spatiales X et Y des plants et je répète cette simulation 1000 fois. Les 1000 permutations servent à construire une distribution de référence pour évaluer si l'autocorrélation spatiale observée est significativement différente de ce qu'on observerait par pur hasard, c'est-à-dire sans structure spatiale.

Afin de visualiser l'ajustement spatial du modèle, j'ai créé une carte qui représente les résidus du modèle. Chaque point correspond à la position d'une observation et la couleur indique l'intensité du résidu. Cette représentation permet de détecter d'éventuelles structures spatiales non prises en compte par le modèle. Pour améliorer la compréhension, j'ai réalisé l'interpolation d'une surface continue par B-splines avec la fonction *mba.surf* du package MBA. Les B-splines servent à créer des surfaces lisses, à partir d'un ensemble de points.

Pour illustrer une carte des résidus, à titre d'exemple, j'ai choisi de présenter la carte du dispositif de Jouaville (figure 21a) qui met en évidence des corrélations spatiales dans les résidus, avec des zones cohérentes de sous-estimation (résidus positifs) et de surestimation (résidus négatifs), visibles au sein même de certains blocs expérimentaux. Cela suggère la présence de facteurs spatialement structurés non pris en compte par le schéma expérimental et le modèle statistique. J'ai choisi de présenter ce site car c'est celui qui présente le plus fort taux d'aboutissement terminal.

Le calcul de l'indice de Moran (figure 21b), révèle une autocorrélation spatiale significative entre individus. Cette autocorrélation indique que l'hypothèse d'indépendance des résidus n'est pas respectée. Les graphiques d'autocorrélation spatiale des résidus (Moran) pour les autres sites plantés en ligne présentant une autocorrélation sont fournis en annexe 3.

Ces résultats convergents montrent que le modèle ne capture pas entièrement la variabilité spatiale observée, suggérant qu'une prise en compte plus explicite de la dimension spatiale pourrait améliorer la qualité des prédictions et la robustesse des inférences.

Pour remédier partiellement à ce problème, j'ai choisi de ne plus travailler au niveau des plants individuels mais de regrouper les données par unité expérimentale (UE). Cette approche, via un modèle généralisé mixte (GLMM), mise en œuvre avec le package *glmmTMB* avec R, permet de modéliser le nombre de plants abrutis ou morts sur le total de plants dans chaque UE, tout en tenant compte des effectifs variables.

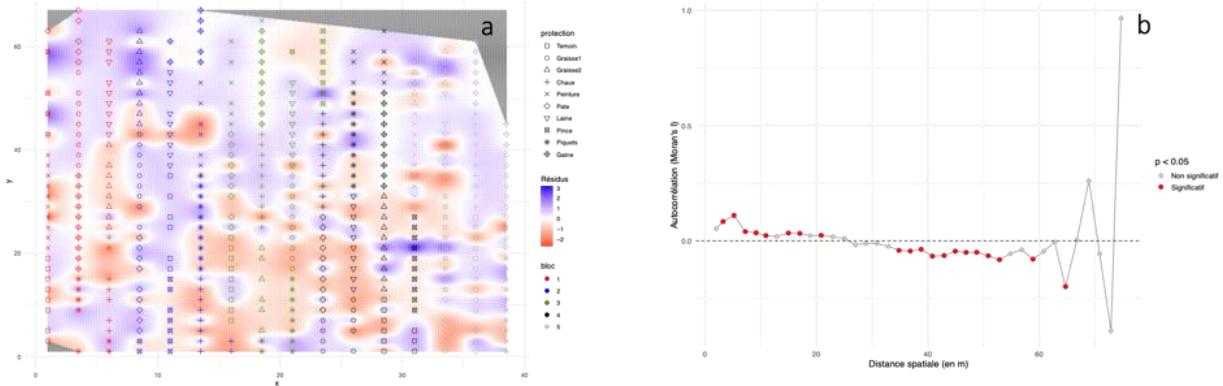


Figure 21 : Analyse des autocorrelations spatiales pour le site de Jouaville: (a) Carte de résidus du modèle d'abrutissement terminal et localisés avec les coordonnées cartésiennes de chaque plant, et (b) autocorrélation spatiale des résidus en utilisant l'indice de Moran.

Ce modèle combine une fonction de lien *logit* adaptée aux données binomiales avec des effets fixes, qui expliquent la variation moyenne en fonction des variables explicatives, et des effets aléatoires, qui modélisent la variabilité non expliquée liée aux blocs expérimentaux.

L'approche mixte permet ainsi de prendre en compte la non-indépendance des données au sein de groupes et d'obtenir des estimations robustes des paramètres tout en contrôlant les effets de structure spatiale.

#### 4.8.2.4 Présélection des variables explicatives

Une sélection des variables explicatives a été conduite dans le but d'obtenir un modèle à la fois explicatif et parcimonieux. À l'issue d'une phase exploratoire, les variables pertinentes et non redondantes ont été présélectionnées. La sélection définitive des variables fixes a ensuite été réalisée par une procédure descendante, consistant à retirer progressivement les prédicteurs, en conservant à chaque étape le modèle présentant la plus faible valeur d'AIC. Le modèle final a été évalué à l'aide des résidus simulés (package *DHARMA*) afin de vérifier la qualité de l'ajustement et la validité des inférences statistiques.

### 4.8.3 Modèles retenus

Pour comparer de manière cohérente les résultats au niveau du réseau et au niveau de chaque site, j'ai choisi de conserver la même structure de modèle. Ce choix repose sur trois arguments principaux :

1. Robustesse statistique : au niveau général, la comparaison des modèles par l'AIC a montré que l'inclusion de la variable « hauteur » améliorait systématiquement l'ajustement, quelle que soit la réponse considérée (mortalité, abrutissement terminal et latéral). En conservant cette structure de modèle, on s'assure que les analyses au niveau site par site reposent sur un cadre statistique validé.
2. Comparabilité entre niveaux : recourir à une même structure de modèle permet d'éviter l'introduction d'un biais méthodologique entre les deux niveaux d'analyse. Ainsi, les différences constatées entre sites peuvent être attribuées à des variations biologiques ou écologiques, plutôt qu'à un effet du choix du modèle.
3. Pertinence écologique : la hauteur est une variable clé pour expliquer à la fois la mortalité et la probabilité d'abrutissement, car elle reflète à la fois la vigueur de l'arbre et sa disponibilité pour les ongulés.

#### 4.8.3.1 Au niveau du réseau

Le choix d'un modèle intégrant l'ensemble des sites repose sur la volonté d'exploiter pleinement la diversité de l'ensemble des sites. En combinant toutes les données, ce modèle global permet d'estimer un effet moyen de la protection et de la hauteur des plants, tout en tenant compte de la variabilité inter-sites via un effet aléatoire. Cette approche permet de maximiser la puissance statistique. J'ai conçu 3 modèles, un pour la mortalité, un pour l'abrutissement terminal et un pour l'abrutissement latéral.

Pour chaque modalité de protection, le nombre de plants morts ou le nombre de plants présentant un abrutissement terminal ou le nombre de plants présentant un abrutissement latéral, dans chaque site, suit une loi binomiale, selon :

$$NbX_i \sim \text{Binomial}(n_i, p_i) \quad [\text{Eq 1}]$$

Avec :

- $i$  = numéro du site, compris entre 1 et 14
- $NbX_i$  = nombre de plants morts ou nombre de plants présentant un abrutissement terminal ou nombre de plants présentant un abrutissement latéral pour le site  $i$
- $n_i$  = le nombre de plants dans le site  $i$
- $p_i$  = la probabilité qu'un plant soit mort, ou présentant un abrutissement terminal ou présentant un abrutissement latéral, dans le site  $i$

Dans chaque modalité, la probabilité de mortalité, ou d'abrutissement terminal, ou d'abrutissement latéral des plants au niveau du réseau peut être exprimée selon le modèle GLM suivant :

$$\log\left(\frac{p_j}{1-p_j}\right) = \beta_0 + \mu_i + \theta_j \text{ protection}_j + \beta_1 \text{ hauteur\_moyenne}_j \quad [\text{Eq 2}]$$

Avec :

- $i$  = numéro du site, compris entre 1 et 14
- $j$  = numéro de la modalité de protection, compris entre 1 et 10
- $p_j$  = probabilité qu'un plant soit mort, ou présentant un abrutissement terminal ou présentant un abrutissement latéral dans la modalité  $j$
- $\text{protection}_j$  : modalité de protection  $j$
- $\text{hauteur\_moyenne}_j$  : hauteur moyenne des plants dans la modalité  $j$
- $\beta_0, \theta_j, \beta_1, \mu_i$  : paramètres du modèle

Le modèle utilisé permet d'estimer l'effet de la modalité de protection et de la hauteur moyenne des plants sur la probabilité qu'un plant soit mort ou abrouti (à son apex ou latéralement). Il s'agit d'un modèle linéaire généralisé à effet mixte (GLMM) avec une distribution binomiale et une fonction de lien *logit*, adaptée à la modélisation de variables réponses binaires agrégées sous forme de comptages (nombre de plants affectés parmi un total observé par site).

Un effet aléatoire de site est inclus dans le modèle afin de tenir compte de l'hétérogénéité non expliquée entre sites. Cette variabilité peut être liée à des différences locales non directement mesurées, telles que les conditions édaphiques, climatiques, biotiques ou des pratiques de gestion antérieures. Le terme aléatoire :  $\mu_{site} \sim \text{Normale}(0, \sigma^2)$  est supposé suivre une distribution normale centrée réduite, avec  $0$  = l'espérance et  $\sigma^2$  la variance.

La variable « modalité de protection » est traitée comme un facteur à dix niveaux, et la modalité « Témoin » (non protégée) est utilisée comme modalité de référence. Ce choix permet une interprétation directe des coefficients estimés : chaque coefficient représente l'effet relatif d'une modalité de protection donnée par rapport à l'absence de protection, ce qui facilite l'évaluation comparative de leur efficacité.

Enfin, la hauteur moyenne des plants dans chaque modalité est intégrée comme covariable continue. Elle permet de tester l'hypothèse selon laquelle la taille des plants influence leur probabilité d'être consommés ou de mourir, indépendamment de la protection appliquée.

L'ensemble des modèles incluant la variable hauteur des plants présentent des valeurs d'AIC plus faibles, témoignant d'un meilleur ajustement aux données.

De plus, les coefficients de dispersion restent proches de 1 pour tous les modèles testés, ce qui indique une absence de sur-dispersion ou de sous-dispersion problématique. La légère sous-dispersion observée dans les 3 modèles, reste dans des limites acceptables, ne remettant pas en cause la validité des modèles.

#### 4.8.3.2 Au niveau du site

Pour approfondir l'analyse et examiner plus finement la variabilité locale, j'ai développé des modèles « site par site », dans lesquels les valeurs des plants individuels sont regroupées par unité expérimentale et dans lequel un effet aléatoire « bloc » a été introduit.

Pour chaque modalité de protection et pour chaque site, le nombre de plants morts ou le nombre de plants présentant un abrutissement terminal ou le nombre de plants présentant un abrutissement latéral, dans chaque bloc, suit une loi binomiale, selon :

$$NbX_i \sim \text{Binomial}(n_i, p_i) \quad [\text{Eq 3}]$$

Avec :

- $i$  = numéro du bloc, compris entre 1 et 5
- $NbX_i$  = nombre de plants morts ou nombre de plants présentant un abrutissement terminal ou nombre de plants présentant un abrutissement latéral pour le bloc  $i$
- $n_i$  = le nombre de plants dans le bloc  $i$
- $p_i$  = la probabilité qu'un plant soit mort, ou présentant un abrutissement terminal ou présentant un abrutissement latéral, dans le bloc  $i$

Pour chaque modalité de protection et pour chaque site, la probabilité de mortalité ou d'abrutissement latéral, ou d'abrutissement latéral des plants peut être exprimée selon le modèle GLM suivant :

$$\log\left(\frac{p_j}{1-p_j}\right) = \beta_0 + \mu_i + \theta_j \text{ protection}_j + \beta_1 \text{ hauteur\_moyenne}_j \quad [\text{Eq 4}]$$

Avec :

- $i$  = numéro du bloc, compris entre 1 et 5
- $j$  : numéro de la modalité de protection, compris entre 1 et 10
- $p_j$  = probabilité qu'un plant soit mort, ou présentant un abrutissement terminal ou présentant un abrutissement latéral dans la modalité  $j$
- $\text{protection}_j$  : modalité de protection  $j$
- $\text{hauteur\_moyenne}_j$  : hauteur moyenne des plants dans la modalité  $j$
- $\beta_0, \theta_j, \beta_1, \mu_i$  : les paramètres du modèle

Le modèle utilisé permet d'estimer l'effet de la modalité de protection et de la hauteur moyenne des plants sur la probabilité qu'un plant soit mort ou abrutti (de manière terminale ou latérale). Il s'agit d'un GLMM, avec une distribution binomiale et une fonction de lien *logit*, approprié pour la modélisation de variables réponses binaires agrégées sous forme de comptages (nombre de plants affectés parmi un total observé par bloc).

Un effet aléatoire de bloc est inclus dans le modèle afin de prendre en compte l'hétérogénéité non expliquée entre blocs expérimentaux. Cette variabilité peut refléter des différences locales non mesurées, telles que les conditions édaphiques, climatiques, biotiques ou des effets liés à

l'installation des dispositifs. Le terme aléatoire :  $\mu_{site} \sim Normale(0, \sigma^2)$  est supposé suivre une distribution normale centrée réduite, avec 0 = l'espérance et  $\sigma^2$  la variance. La variable « modalité de protection » est modélisée comme un facteur à dix niveaux, avec la modalité « Témoin » (non protégée) définie comme modalité de référence. Ce codage permet une interprétation directe des coefficients estimés, chacun représentant l'effet relatif d'une modalité de protection par rapport à l'absence de protection, facilitant ainsi l'évaluation comparative de leur efficacité. Enfin, la hauteur moyenne des plants dans chaque modalité est incluse comme covariable continue, afin de tester l'hypothèse selon laquelle la taille des plants influe sur leur probabilité de mortalité ou d'abrutissement, indépendamment de la modalité de protection appliquée.

L'ensemble des analyses est réalisé sous *RStudio* (version 4.4.2, octobre 2024), avec les packages *lme4* et *glmmTMB* pour la modélisation, *ggplot2* pour la visualisation, et *DHARMa* pour le diagnostic des résidus. Le seuil de significativité retenu est de 0,05.



## 5 Résultats

---

### 5.1 Caractéristiques des sites

L'analyse des photos prises par les pièges photographiques sur les différents sites, a confirmé la présence de différentes espèces d'ongulés (tableau 5).

Tableau 5 : Espèces d'ongulés observées par les pièges photographiques sur chaque site

Site	Espèces observées
Crecy	<i>Cerf élaphe, chevreuil, sanglier</i>
Fontainebleau_P614	<i>Cerf élaphe, chevreuil, sanglier</i>
Fontainebleau_P673	<i>Cerf élaphe, chevreuil, sanglier</i>
Jouaville	<i>Chevreuil et Sanglier</i>
Macon	<i>Chevreuil et Sanglier</i>
Magland_M	<i>Cerf élaphe, chevreuil, sanglier</i>
Magland_S	<i>Cerf élaphe, chevreuil, sanglier, chamois</i>
Orleans_P118	<i>Cerf élaphe, chevreuil</i>
Orleans_P24	<i>Cerf élaphe, chevreuil</i>
Ourscamp	<i>Cerf élaphe, chevreuil</i>
Plainfaing	<i>Cerf élaphe, chevreuil et sanglier</i>
Retz	<i>Cerf élaphe, chevreuil et sanglier</i>
Saint Gobain	<i>Cerf élaphe, chevreuil et sanglier</i>
Sivry	<i>Chevreuil et Sanglier</i>

Après 6 mois, sur l'ensemble des sites, les protections mécaniques (gaines et piquets) demeurent majoritairement en bon état. Elles sont catégorisées comme « opérationnelles » ou seulement « légèrement dégradées », tandis que les autres modalités présentent un état fortement altéré, voire deviennent totalement inefficaces (figure 22).

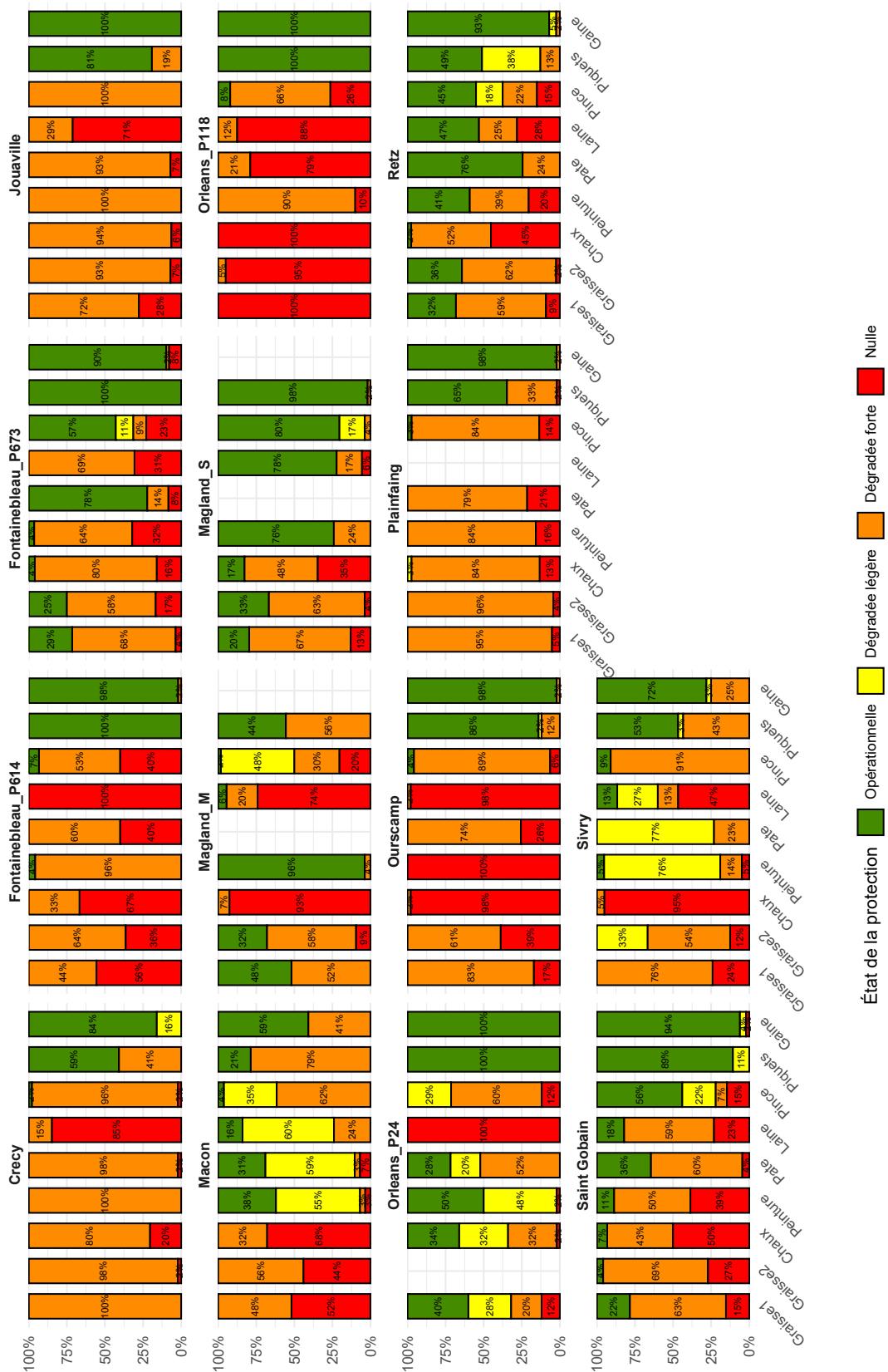


Figure 22 : État des protections après 6 mois d'installation, dans les différentes modalités et pour chaque site

## 5.2 Comparaison des modèles

La comparaison des modèles en s'appuyant sur le critère d'information d'Akaike (AIC) (tableau 6), montre un effet marqué sur la qualité de l'ajustement de la variable « hauteur ». Pour la mortalité, le modèle incluant la hauteur présente un AIC plus faible (1748,0) que le modèle sans hauteur (2301,2), soit une différence de 553 unités, indiquant que le modèle incluant cette variable est plus vraisemblable. Pour l'aboutissement terminal, le modèle avec hauteur (AIC = 1533,7) est légèrement plus vraisemblable que le modèle sans hauteur (AIC = 1536,1), avec une différence d'AIC de 2,4. Cette faible différence suggère que l'inclusion de la hauteur n'améliore pas la vraisemblance du modèle.

Enfin, pour l'aboutissement latéral, le modèle avec hauteur est clairement préférable (AIC = 1432,7 contre 1446,5), avec une différence d'AIC de 13,8 unités.

Par ailleurs, les modèles incluant la hauteur présentent des coefficients de dispersion proches de 1 (0,72629 à 0,8175), traduisant une bonne adéquation des modèles et une absence de sur-dispersion notable.

La variable « hauteur » a été conservée dans l'ensemble des modèles finaux, car elle améliore systématiquement l'ajustement statistique.

Tableau 6 : Tableau comparatif des AIC des modèles au niveau du réseau avec ou sans l'introduction de la hauteur moyenne des plants.

Modèles	AIC	Coefficient de dispersion
<i>Mortalité</i>		
<i>avec la hauteur</i>	<b>1748,0</b>	<b>0,8175</b>
<i>sans la hauteur</i>	2301,2	-
<i>Aboutissement terminal</i>		
<i>avec la hauteur</i>	<b>1533,7</b>	<b>0,78825</b>
<i>sans la hauteur</i>	1536,1	-
<i>Aboutissement latéral</i>		
<i>avec la hauteur</i>	<b>1432,7</b>	<b>0,72629</b>
<i>sans la hauteur</i>	1446,5	-

### 5.3 Mortalité, abrutissements et frottis au niveau du réseau

Les effectifs et la hauteur des plants utilisés pour les analyses graphiques et statistiques sont indiqué dans le tableau 7.

Tableau 7 : Effectifs des plants pour chaque variable analysée et hauteur moyenne des plants, dans chaque modalité pour les analyses graphiques et statistiques, pour chaque modalité, pour l'ensemble du réseau, à 1 an ; abr = abrutis ; term = terminal ; lat = latéral ; ht = hauteur ; moy = moyenne.

Protection	Total	Vivants	Morts	Abr_term	Abr_lat	Total_abr	Total_non_abr	Total_frottis	Ht_moy
Témoin	664	566	98	79	59	114	445	24	45,79
Graisse1	668	538	130	46	46	78	461	2	46,84
Graisse2	668	548	120	60	63	86	463	2	44,98
Chaux	668	551	117	91	82	126	431	5	46,4
Peinture	668	560	108	84	79	128	430	12	47,04
Pate	560	466	94	64	63	99	366	9	47,36
Laine	668	549	119	59	38	79	464	4	45,18
Pince	668	542	126	52	58	89	459	4	45,3
Piquets	668	608	60	69	64	103	504	2	48,51
Gaine	560	525	35	0	0	0	524	9	52,18
Toutes protections	<b>6460</b>	<b>5453</b>	<b>1007</b>	<b>604</b>	<b>552</b>	<b>902</b>	<b>4547</b>	<b>64</b>	<b>46,96</b>

#### 5.3.1 Taux d'abrutissement par site

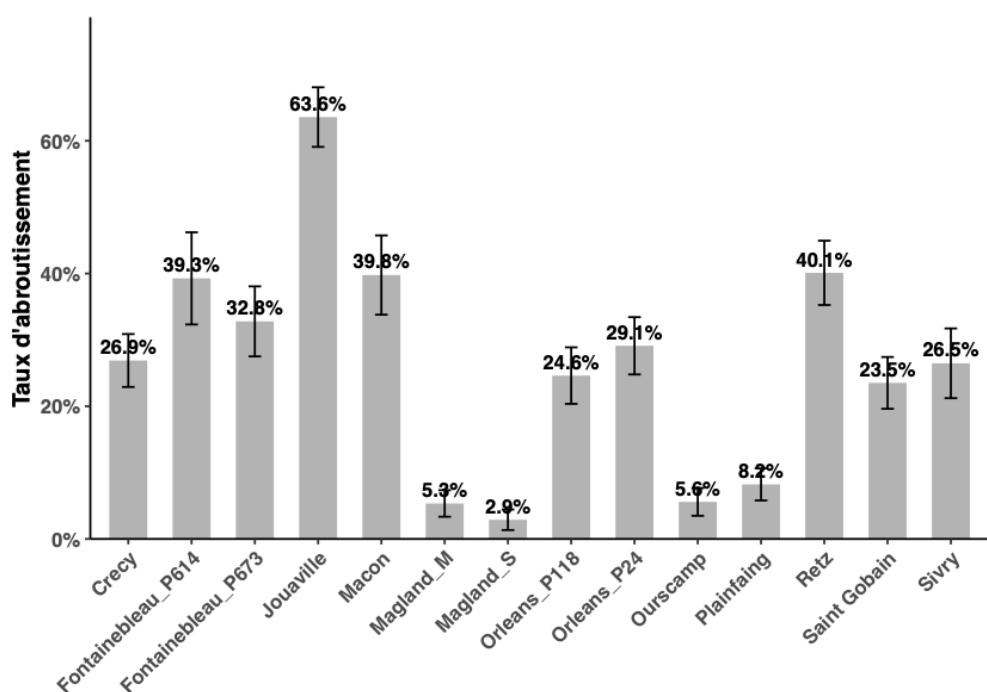


Figure 23 : Taux d'abrutissement du bourgeon terminal et des bourgeons latéraux des plants (toutes espèces confondues, toutes modalités confondues, pour l'ensemble des sites) un an après plantation : moyenne +/- intervalle de confiance à 95%

La figure 23 fournit un indice qualitatif de la pression d'abrutissement pour chaque site, estimant l'abrutissement total (abrutissement du bourgeon terminal ou des bourgeons latéraux) sur l'ensemble des plants de chaque site, toutes modalités de protection confondues. Une forte variabilité dans cet indice d'abrutissement total est observée entre les 14 sites expérimentaux, avec des valeurs comprises entre 2,9 % pour *Magland\_S* et 63,6 % pour *Jouaville*. Les sites de *Fontainebleau\_P673*, *Sivry* et *Saint-Gobain* présentent les taux d'abrutissement les plus élevés (> 39 %), témoignant d'une forte pression d'herbivorie dans ces sites. À l'inverse, les sites de *Macon*, *Magland\_M*, *Ourscamp* ou *Retz* présentent des niveaux très faibles (< 10 %).

### 5.3.2 Frottis

Sur l'ensemble des 5 445 plants observés (tableau 8), 67 ont été frottés, soit 1,23 % des effectifs. Les proportions varient selon les modalités, allant de 0,2 % (*Gaine*) à 2,3 % (*Chaux*), avec un témoin à 3,6 %. Certaines protections, comme la *graisse*, la *pince*, les *piquets* ou la *laine*, semblent réduire la fréquence des frottis par rapport au *témoin*. À l'inverse, d'autres modalités (*chaux*) présentent des taux proches de ceux du *témoin*, suggérant une efficacité limitée.

Tableau 8 : Effectifs et proportion des plants frottés (toutes espèces confondues, pour l'ensemble des sites) un an après plantation, en fonction du type de protection utilisé

Protection	Effectifs	Nombre de plants frottés	Proportion de plants frottés (%)
Témoin	557	20	3,6
Graisse1	534	5	0,9
Graisse2	540	2	0,4
Chaux	558	13	2,3
Peinture	564	9	1,6
Pate	456	7	1,5
Laine	549	2	0,4
Pince	551	5	0,9
Piquets	600	3	0,5
Gaine	536	1	0,2
<b>Toutes protections</b>	<b>5445</b>	<b>67</b>	<b>1,23</b>

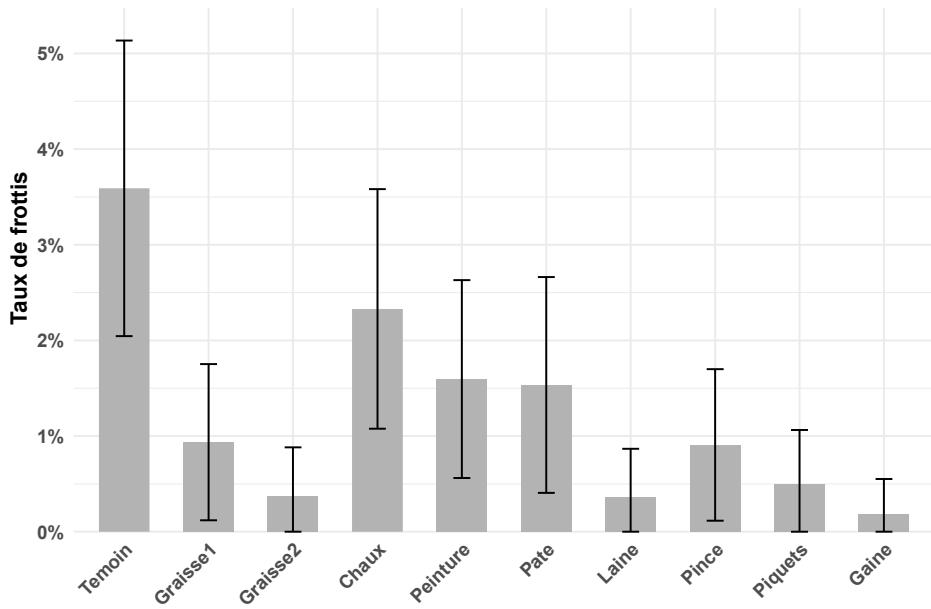


Figure 24 : Taux de plants frottés (toutes espèces confondues, pour l'ensemble des sites) un an après plantation, en fonction du type de protection utilisé : moyenne +/- intervalle de confiance à 95%

Au niveau du réseau, les taux de plants frottés sont très faibles (figure 24). En revanche, la variabilité des frottis entre les sites est importante, avec seulement deux sites qui présentent ce type de dégâts (figure 25).

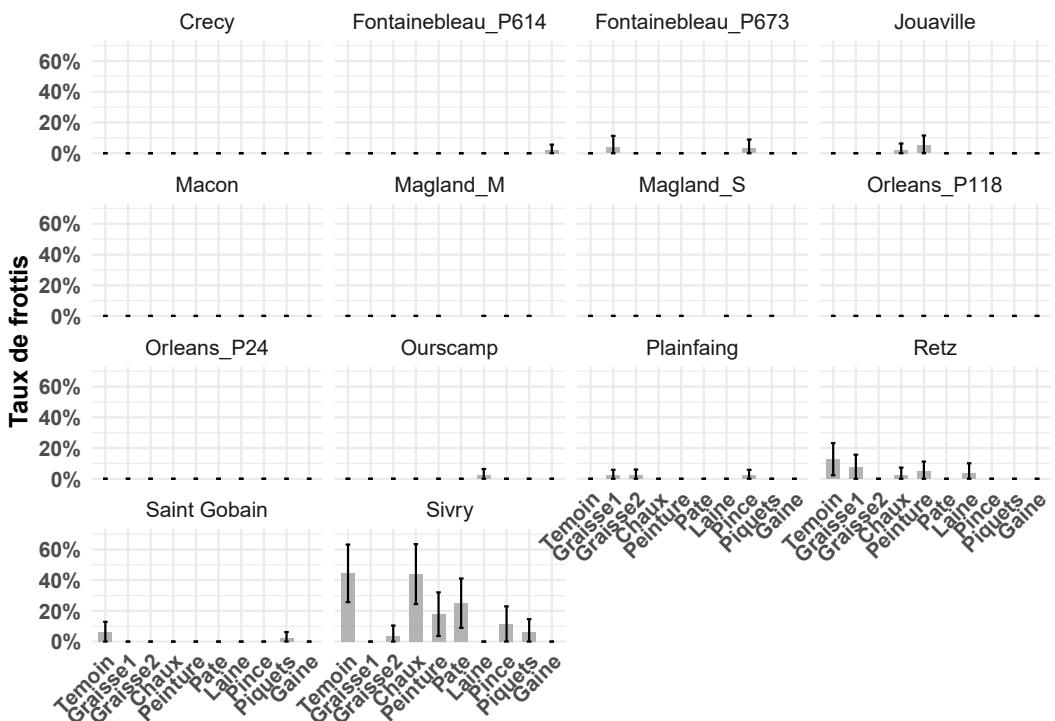


Figure 25 : Taux de plants frottés un an après plantation, en fonction de la modalité de protection, accompagnés de leurs intervalles de confiance à 95 %, pour chaque site.

Compte tenu des effectifs relativement faible, une analyse statistique risquerait d'apporter des résultats peu concluants. C'est pourquoi j'ai décidé de ne pas réaliser d'analyse statistique de ce type de dégât dans la suite du mémoire.

### 5.3.3 Mortalité

Au niveau du réseau, la mortalité des plants reste dans l'ensemble faible, avec des taux souvent inférieurs à 20 %. Elle varie toutefois selon les modalités de protection (figure 26, tableau 9). *Le témoin* enregistre une mortalité de 14,8 %. Les modalités *Piquets* et *Gaine* diminuent significativement la mortalité par rapport au témoin (9,0 % et 6,2 %, respectivement), tandis que la *Pince* l'augmente (18,9%) significativement ( $p < 0,001$  pour les 3 modalités). Les modalités *Graisse 1*, la *Graisse 2*, *Pince*, *Chaux*, *Peinture*, *Pâte* (16,8 %) et *Laine* ne diffèrent pas significativement ( $p > 0,05$ ) du *témoin* (mortalité = 19,5 ; 18,0 ; 18,9 ; 17,5 ; 16,2 ; 16,8 et 17,8 % ; respectivement).

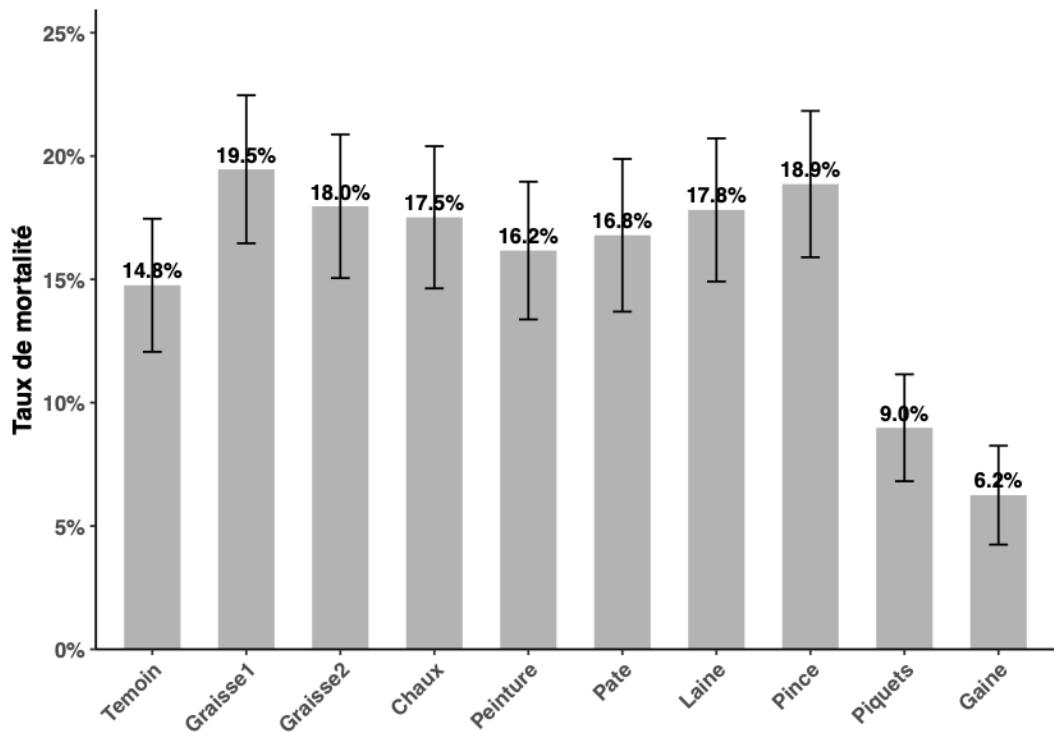


Figure 26 : Mortalité des plants (toutes espèces confondues, pour l'ensemble des sites) un an après plantation, en fonction du type de protection utilisé : moyenne +/- intervalle de confiance à 95%

Tableau 9 : Paramètres du modèle linéaire généralisé sur la mortalité (équation 2), pour les différentes modalités de protection, au niveau du réseau.

Variables explicatives	Coefficient estimé	Écart-type	Statistique z	Valeur de p	Significativité
<i>Protection :</i>					
<i>Ordonnée à l'origine</i>	-1,562	0,482	-3,238	<b>0,001</b>	**
<i>Graisse1</i>	0,237	0,187	1,266	0,205	
<i>Graisse2</i>	-0,024	0,192	-0,125	0,901	
<i>Chaux</i>	0,32	0,182	1,756	0,079	.
<i>Peinture</i>	0,174	0,186	0,938	0,348	
<i>Pate</i>	-0,048	0,192	-0,25	0,803	
<i>Laine</i>	0,272	0,184	1,479	0,139	
<i>Pince</i>	0,379	0,181	2,097	<b>0,036</b>	*
<i>Piquets</i>	-0,866	0,229	-3,778	<b>&lt; 0,001</b>	***
<i>Gaine</i>	-0,871	0,227	-3,828	<b>&lt; 0,001</b>	***
<i>Hauteur Moyenne :</i>	-0,021	0,005	-4,069	<b>&lt; 0,001</b>	***

La hauteur moyenne des plants influence significativement leur survie (tableau 9) : en moyenne, les plus grands sont moins susceptibles de mourir (coefficient estimé = -0,021,  $p < 0,001$ ). Pour les sites de *Crécy*, *Fontainebleau\_P614*, *Fontainebleau\_P673*, *Jouaville*, *Macon*, *Ourscamp*, *Plainfaing*, *Retz*, *Saint-Gobain* et *Orléans\_P118*, les plants de petite taille présentent une mortalité plus élevée (figure 27). Certains sites se distinguent par une mortalité quasi nulle, quelle que soit la hauteur des plants (*Magland\_M*, *Magland\_S* et *Orléans\_P24*). Un seul site, *Sivry*, présente une mortalité plus importante pour les plants les plus grands.

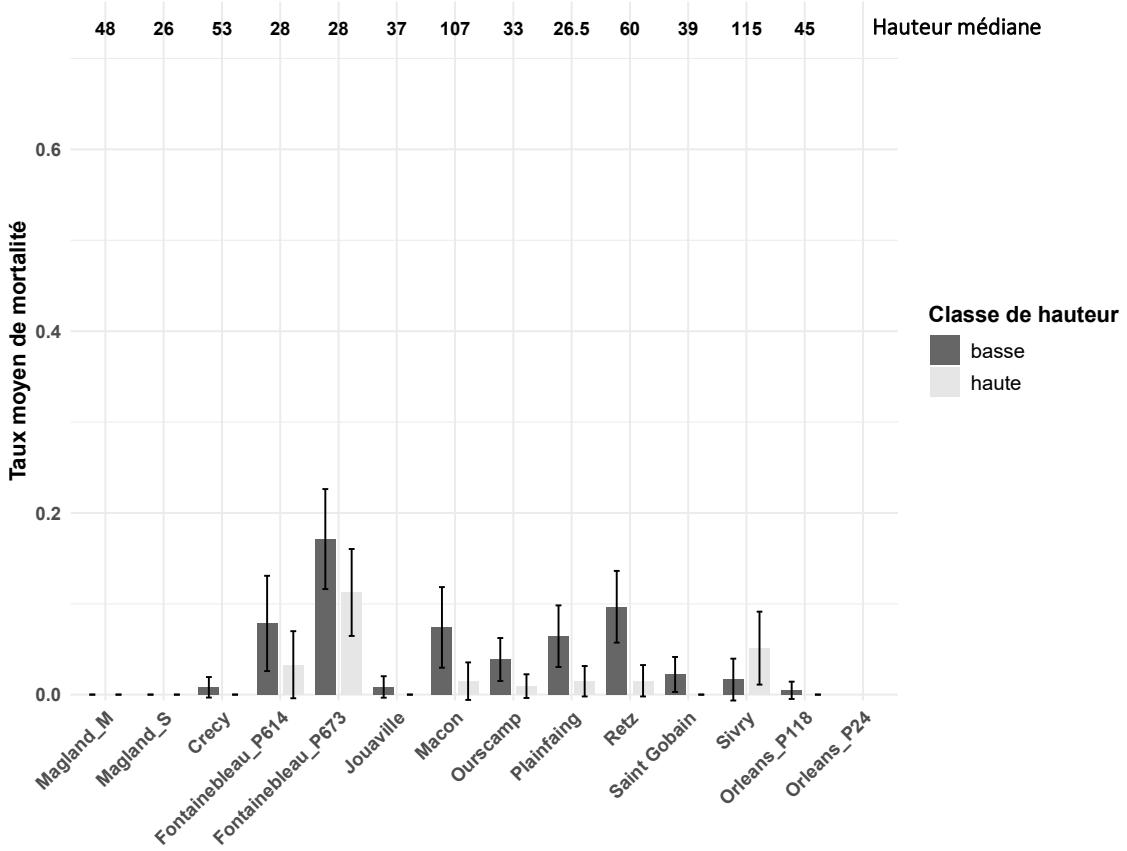


Figure 27: Mortalité des plants en fonction de la hauteur médiane des plants (toutes modalités confondues, pour chaque site) un an après plantation : moyenne +/- intervalle de confiance à 95%. Pour chaque site, les plants sont classés en deux classes de hauteur : classe « basse » qui correspond aux plants dont la hauteur est inférieure à la médiane et classe « haute » aux plants dont la hauteur est supérieure à la médiane. Pour chaque site, la valeur médiane de la hauteur (cm) est indiquée en haut de la figure.

### 5.3.4 Abroutissement du bourgeon terminal

Au niveau du réseau, l'abrouissement du bourgeon terminal des plants reste faible dans l'ensemble, avec des taux inférieurs à 25 %. Il varie toutefois selon les modalités de protection (figure 28, tableau 10). Le *témoin* enregistre un abrouissement du bourgeon terminal de 19,1 %. Les modalités *Graisse1*, *Graisse2*, *Laine*, *Pince*, *Piquets*, diminuent significativement la mortalité par rapport au *témoin* (15,4 %, 10,7 %, 15,5 %, 9 %, 13,7% ; respectivement et  $p = 0,002, 0,037, 0,021, 0,013, 0,02$  ; respectivement). Les modalités *Chaux*, *Peinture* et *Pâte* montre une consommation du bourgeon terminale plus importante par rapport au *Témoin* (23,2 %, 22,2 %, 21,9% ; respectivement) mais cette différence n'est pas statistiquement significative.

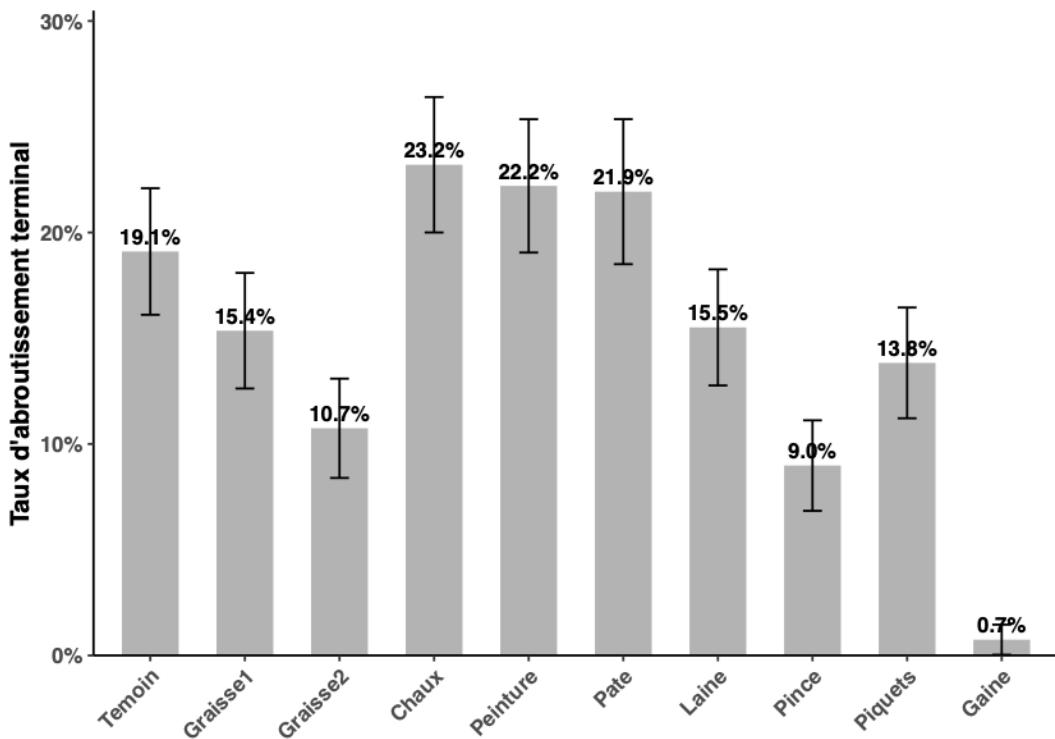


Figure 28 : Abrutissement du bourgeon terminal (toutes espèces confondues, pour l'ensemble des sites) observés un an après plantation, en fonction du type de protection utilisé : moyenne +/- intervalle de confiance à 95 %

Tableau 10 : Paramètres du modèle linéaire généralisé sur l'abrutissement du bourgeon terminal (équation 1), pour les différentes modalités de protection au niveau du réseau

Variables explicatives	Coefficient estimé	Écart-type	Statistique z	Valeur de p	Significativité
<i>Protection :</i>					
Ordonnée à l'origine	-2,496	0,506	-4,933	< 0,001	***
Graisse1	-0,669	0,216	-3,099	<b>0,002</b>	**
Graisse2	-0,421	0,202	-2,081	<b>0,037</b>	*
Chaux	0,248	0,187	1,325	0,185	
Peinture	-0,045	0,193	-0,234	0,815	
Pate	-0,379	0,204	-1,857	0,063	.
Laine	-0,475	0,205	-2,317	<b>0,021</b>	*
Pince	-0,522	0,21	-2,492	<b>0,013</b>	*
Piquets	-0,462	0,199	-2,328	<b>0,02</b>	*
Gaine	-22,089	3332,274	-0,007	0,995	
Hauteur Moyenne :	0,011	0,005	2,074	<b>0,038</b>	*

La hauteur moyenne des plants influence significativement la consommation du bourgeon terminal (tableau 10) : en moyenne, les plus grands sont moins susceptibles d'être consommés (coef estimé = 0,011, p < 0,038). Pour les sites de *Magland\_M*, *Magland\_S*, *Crécy*, *Fontainebleau\_P614*, *Macon*, *Ourscamp*, *Plainfaing*, *Saint-Gobain* et *Sivry*, les plants de petite taille présentent un

abrutissement terminal plus élevée (figure 29). Pour les sites de *Fontainebleau\_P673*, *Jouaville*, *Retz* et *Orléans\_P118*, ce sont les plus situés au-dessus de la hauteur médiane qui sont les plus consommés

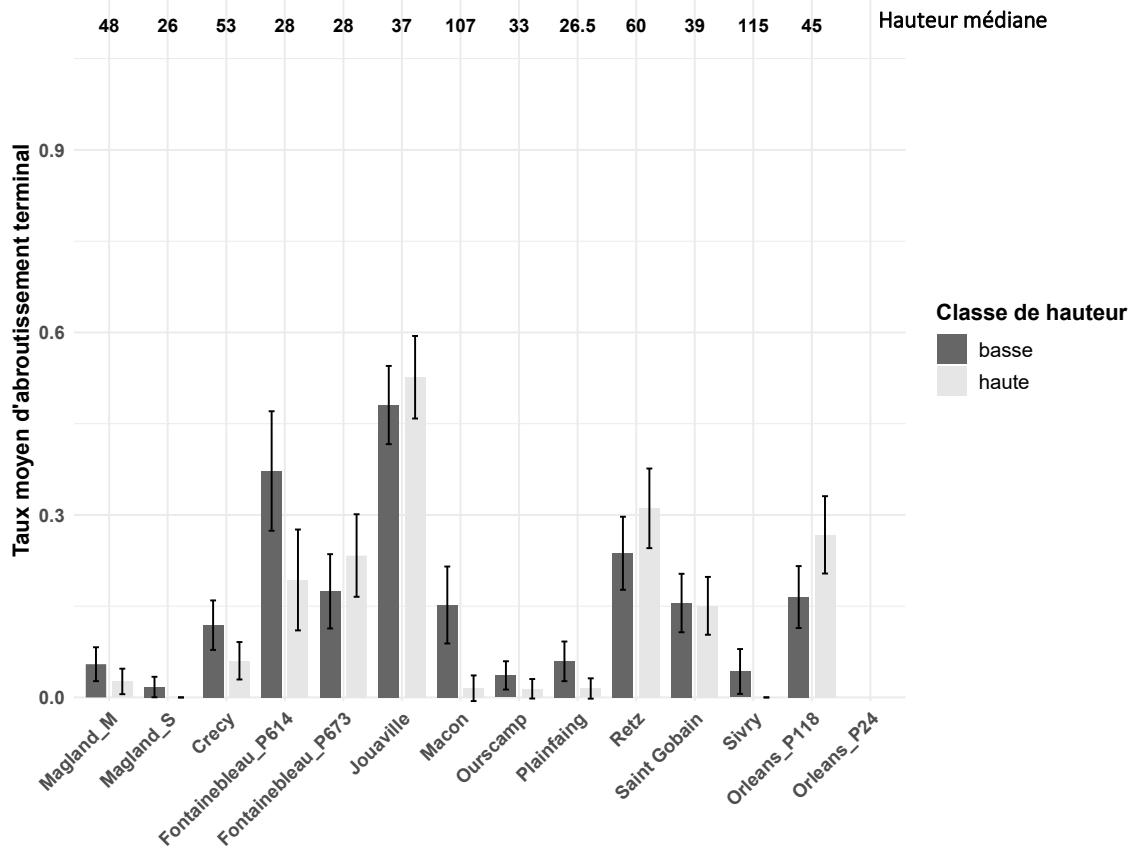


Figure 29 : Abrutissement du bourgeon terminal des plants en fonction de la hauteur médiane des plants (toutes modalités confondues, pour chaque site) un an après plantation : moyenne +/- intervalle de confiance à 95%. Pour chaque site, les plants sont classés en deux classes de hauteur : classe « basse » qui correspond aux plants dont la hauteur est inférieure à la médiane et classe « haute » aux plants dont la hauteur est supérieure à la médiane. Pour chaque site, la valeur médiane de la hauteur (cm) est indiquée en haut de la figure.

### 5.3.5 Abrutissement des bourgeons latéraux

Au niveau du réseau, l'abrutissement des bourgeons latéraux des plants reste faible dans l'ensemble, avec des taux inférieurs à 25 %. Il varie toutefois selon les modalités de protection (figure 30, tableau 11). Le *témoin* enregistre un abrutissement du bourgeon terminal de 21,8 %. Les modalités *Graisse1* et *Laine* diminuent significativement la mortalité par rapport à *Témoin* (18,2 %, 16,2 % ; respectivement et  $p = 0,037, 0,012$  ; respectivement). Les modalités *Graisse2*, *Pince*, *Piquets* montre une consommation des bourgeons latéraux plus faible que *Témoin* (18,7 %, 15,8 %, 15% ; respectivement) mais cette différence n'est pas significative. D'autres modalités enregistrent une consommation des bourgeons latéraux plus importante que *Témoin*. C'est le cas pour les

modalités *Chaux*, *Peinture* et *Pâte* (23,7%, 23,6 %, 21 % ; respectivement), ces différences ne sont pas significatives.

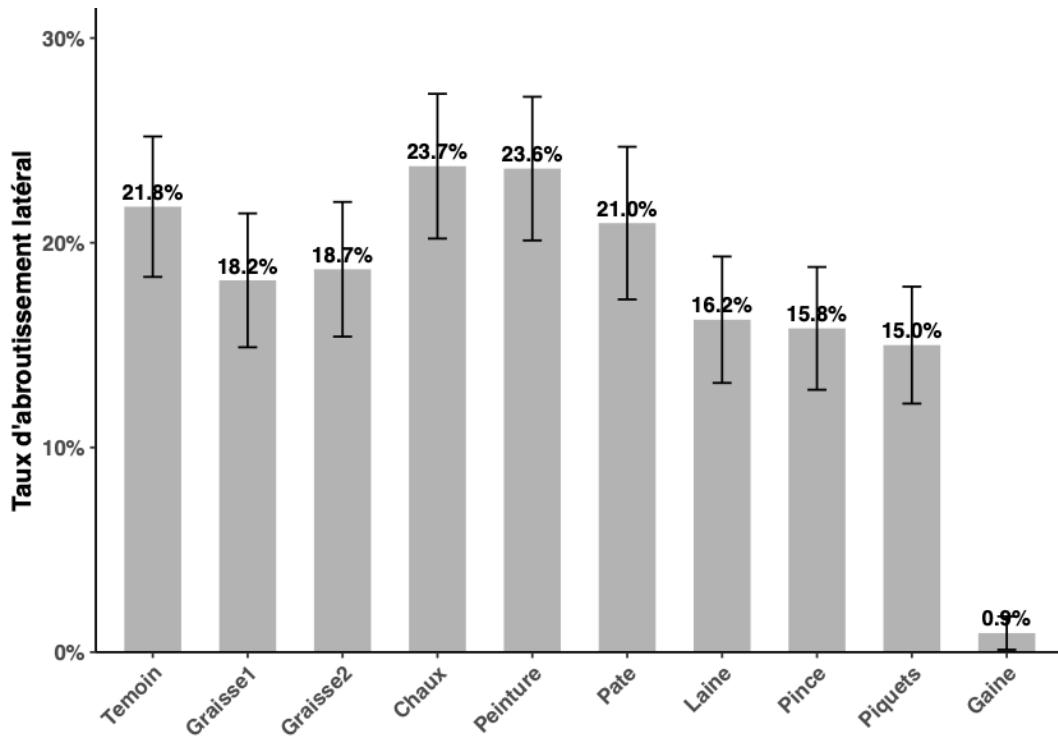


Figure 30 : Taux d'abrutissement latéral (toutes espèces confondues, pour l'ensemble des sites) observés un an après plantation, en fonction du type de protection utilisé : moyenne +/- intervalle de confiance à 95%

Tableau 11 : Paramètres du modèle linéaire généralisé sur l'abrutissement des bourgeons latéraux (équation 1), pour les différentes modalités de protection, au niveau du réseau

Variables explicatives	Coefficient estimé	Ecart-type	Statistique z	Valeur de p	Significativité
<i>Protection :</i>					
Ordonnée à l'origine	-3,503	0,572	-6,124	<b>&lt; 0,001</b>	***
Graisse1	-0,476	0,228	-2,086	<b>0,037</b>	*
Graisse2	-0,062	0,212	-0,293	0,769	.
Chaux	0,351	0,206	1,707	0,088	.
Peinture	0,252	0,207	1,217	0,223	.
Pâte	-0,081	0,215	-0,378	0,706	.
Laine	-0,599	0,239	-2,506	<b>0,012</b>	*
Pince	-0,175	0,215	-0,813	0,416	.
Piquets	-0,247	0,214	-1,154	0,248	.
Gaine	-21,763	3421,539	-0,006	0,995	.
Hauteur Moyenne :	0,021	0,005	3,931	<b>&lt; 0,001</b>	***

La hauteur moyenne des plants influence significativement la consommation des bourgeons latéraux (tableau 11) : en moyenne, les plus grands sont plus susceptibles d'être consommés (coefficient estimé = 0,021,  $p < 0,001$ ). Pour les sites de *Magland\_M*, *Magland\_S*, *Fontainebleau\_P614*, *Macon*, les plants de petite taille présentent un abrutissement latéral plus faible (figure 31). Pour les sites de *Fontainebleau\_P673*, *Jouaville*, *Plainfaing*, *Retz*, *Saint Gobain*, *Sivry* et *Orléans\_P118*, ce sont les plus situés au-dessus de la hauteur médiane qui sont les plus consommés.

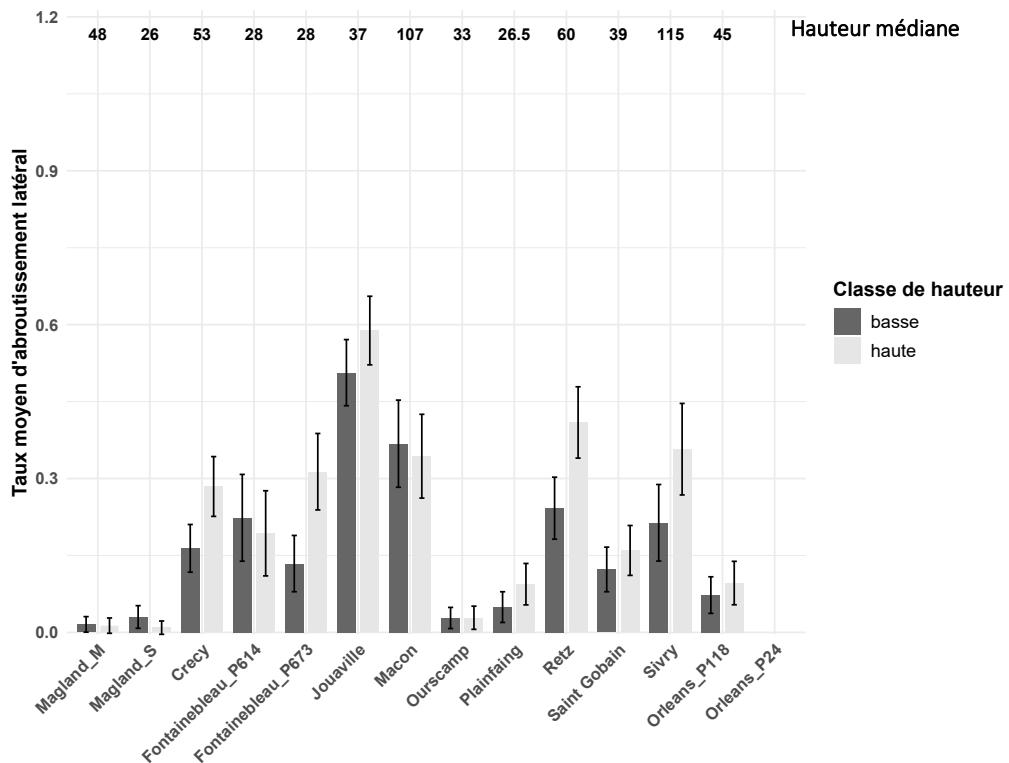


Figure 31 : Abrutissement des bourgeons latéraux des plants en fonction de la hauteur médiane des plants (toutes modalités confondues, pour chaque site) un an après plantation : moyenne +/- intervalle de confiance à 95%. Pour chaque site, les plants sont classés en deux classes de hauteur : classe « basse » qui correspond aux plants dont la hauteur est inférieure à la médiane et classe « haute » aux plants dont la hauteur est supérieure à la médiane. Pour chaque site, la valeur médiane de la hauteur (cm) est indiquée en haut de la figure.

## 5.4 Mortalité et abrutissement au niveau des sites

Les effectifs et la hauteur des plants utilisés pour les analyses graphiques et statistiques sont détaillés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Effectifs des plants pour chaque variable analysée et hauteur moyenne des plants, dans chaque modalité pour les analyses graphiques et statistiques, pour chaque site, à 1 an ; abr = abrutis ; term = terminal ; lat = latéral ; Ht = hauteur ; moy = moyenne.

Site	Total	Vivants	Morts	Abr_term	Abr_lat	Total_abr	Total_non_abr	Ht_moy
Crecy	496	478	18	34	48	68	410	53,38
Fontainebleau_P614	540	198	342	95	60	104	85	25,6
Fontainebleau_P673	540	356	184	76	54	92	259	27,93
Jouaville	500	444	56	9	6	15	429	37,45
Macon	300	275	25	34	92	97	189	104,83
Magland_M	432	429	3	21	7	26	406	49,74
Magland_S	432	428	4	4	9	13	419	26,29
Orleans_P118	400	394	6	70	58	112	282	47,32
Orleans_P24	500	428	72	38	2	40	387	36,01
Ourscamp	500	478	22	14	11	22	448	32,04
Plainfaing	500	410	90	11	0	11	393	26,75
Retz	500	423	77	120	111	155	262	53,28
Saint Gobain	500	463	37	73	47	99	351	40,07
Sivry	320	249	71	5	47	48	227	115,15
<b>Total</b>	<b>6460</b>	<b>5453</b>	<b>1007</b>	<b>604</b>	<b>552</b>	<b>902</b>	<b>4547</b>	<b>48,27</b>

### 5.4.1 Mortalité

Au niveau de chaque site, des différences marquées apparaissent entre les modalités de protections et entre certains sites (figure 32, annexe 1). Pour le site de *Fontainebleau\_P614*, les modalités : *Peinture*, *Piquets* et *Gaine* montrent une diminution statistiquement significative de la mortalité par rapport au témoin ( $p = 0,08$ ,  $0,031$  et  $0,007$  ; respectivement). Pour le site de *Fontainebleau\_P673*, la modalité *Gaine* diminue significativement la mortalité en comparaison au *témoin* ( $p = 0,002$ ). En revanche, pour 4 sites, certaines modalités de protection montrent une mortalité supérieure, statistiquement significative, en comparaison au *Témoin*. C'est le cas pour le site d'*Ourscamp* avec la modalité *Peinture* ( $p = 0,035$ ), le site de *Plainfaing* pour la modalité *Gaine* ( $p = 0,022$ ) et les sites de *Retz* et *Saint-Gobain* avec la modalité *Laine* ( $p = 0,014$  et  $0,027$  ; respectivement). Pour les autres sites et pour les autres modalités, les différences observées sur la mortalité ne sont pas significatives.

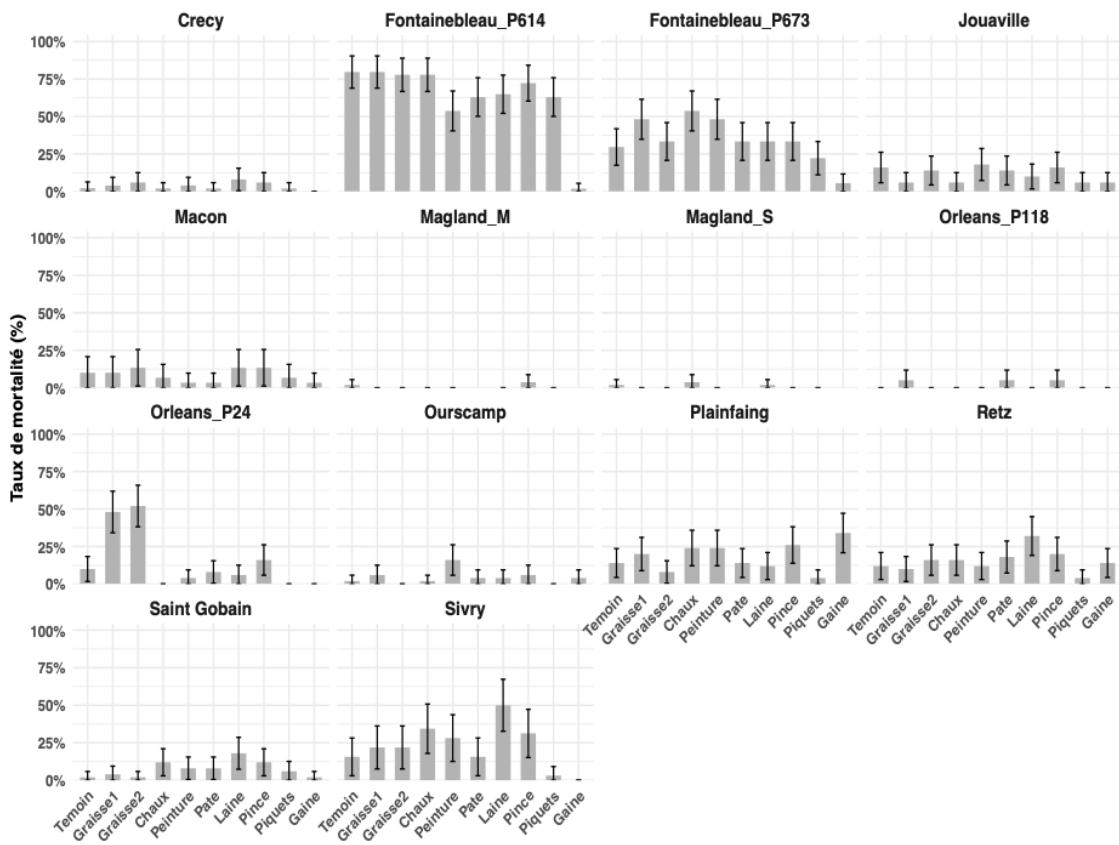


Figure 32 : Taux de mortalité des plants un an après plantation, en fonction du type de protection utilisé, accompagnés de leurs intervalles de confiance à 95 %, pour chaque site

Un effet significatif de la variable *hauteur moyenne* des plants, avec un coefficient négatif indique que les plants présentant une hauteur plus élevée sont moins susceptibles de mourir. C'est le cas pour les sites de *Plainfaing* (coef = -0,144 ; p=0,001\*\*\*) et de *Fontainebleau\_P614* (coef = -0,08 ; p=0,001\*\*\*).

Les modèles de mortalité n'ont pas permis d'estimer les coefficients pour la modalité *Gaine* dans certains sites (annexe 1), en raison du faible nombre de plants morts dans cette modalité sur ces sites (tableau 13). Hormis pour les sites de *Plainfaing* et de *Retz* où la mortalité des plants de la modalité *Gaine* est respectivement de 18 et 8 arbres, le nombre de plants morts est égal ou proche de 0, empêchant les modèles de converger pour cette modalité.

Tableau 13 : Effectifs des arbres ayant subi un abrutissement terminal, un abrutissement latéral ou qui sont morts, toutes essences confondues, pour l'ensemble des sites, pour la modalité « gaine » ; Eff = effectifs ; abr = abrutis ; term = terminal ; lat = lat

Site	Eff.total	Eff_abr_term	Eff_abr_lat	Eff_mort	%_abr_term	%_abr_lat	%_mort
Crecy	50	0	0	0	0	0	0
Fontainebleau_P614	54	2	0	1	3,8	0	1,9
Fontainebleau_P673	54	0	1	4	0	2	7,4
Jouaville	50	0	0	3	0	0	6
Macon	30	1	4	1	3,6	14,8	3,3
Orleans_P118	40	0	0	0	0	0	0
Orleans_P24	50	0	0	0	0	0	0
Ourscamp	50	0	0	2	0	0	4
Plainfaing	50	0	0	18	0	0	36
Retz	50	0	0	8	0	0	16
Saint Gobain	50	1	0	1	2	0	2
Sivry	32	0	0	0	0	0	0

#### 5.4.2 Abrutissement du bourgeon terminal

Au niveau de chaque site, des différences marquées apparaissent entre les modalités de protections pour 1 site, celui d'Orléans\_P118 (figure 33, annexe 1). Pour ce site, les modalités : *Graisse1*, *Graisse2*, *Laine*, *Pince* et *Piquets* montrent une diminution statistiquement significative de l'abrutissement par rapport au *témoin* ( $p = 0,043$ ,  $0,007$ ,  $0,047$ ,  $0,01$ , et  $0,028$  ; respectivement). Pour les autres sites et pour les autres modalités, les différences observées sur la l'abrutissement terminal ne sont pas statistiquement significatives.

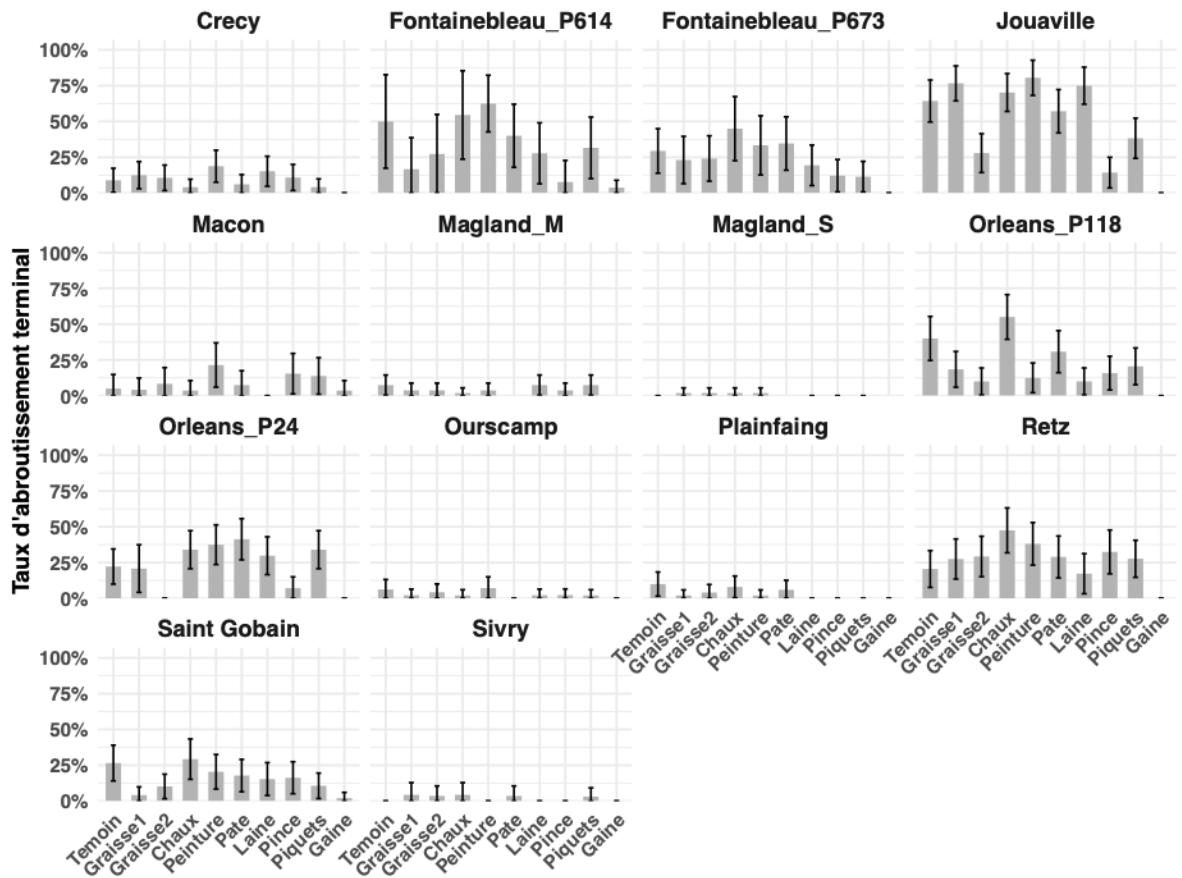


Figure 33 : Taux d'abrutissement du bourgeon terminal des plants un an après plantation, en fonction du type de protection utilisé, accompagnés de leurs intervalles de confiance à 95 %, pour chaque site

Un effet significatif de la variable *hauteur moyenne* des plants, avec un coefficient positif indique que les plants présentant une hauteur plus élevée sont plus susceptibles d'être consommée. C'est le cas pour le site de *Retz* ( $p=0,03$ ). Le modèle d'abrutissement terminal n'a pas permis d'estimer les coefficients pour la modalité *Gaine* dans certains sites (annexe 1), en raison du faible nombre de plants morts dans cette modalité sur ces sites (tableau 13).

#### 5.4.3 Abrutissement des bourgeons latéraux

Au niveau de chaque site, des différences marquées apparaissent entre les modalités de protections (figure 34, annexe 1) pour 3 sites. Pour les sites de *Macon* et de *Retz*, la modalité *Laine* montre une diminution significative de l'abrutissement des bourgeons latéraux ( $p = 0,07$ ,  $p = 0,014$  ; respectivement). Pour le site de *Crécy*, il y a également une diminution significative de l'abrutissement latéral pour la modalité *Pince* ( $p = 0,036$ ). Pour les autres sites et pour les autres modalités, les différences observées sur l'abrutissement latéral ne sont pas significatives.

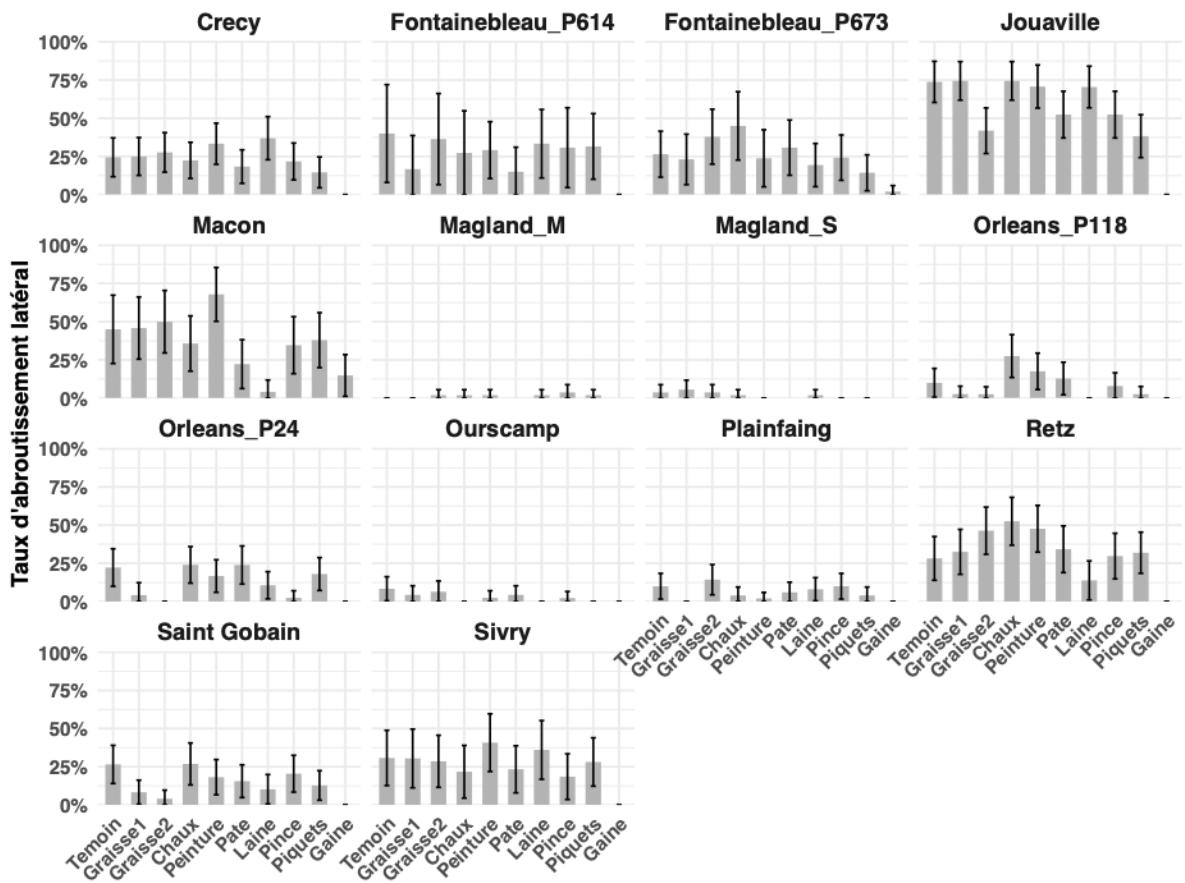


Figure 34 : Taux d'abrutissement latérales des arbres un an après plantation, en fonction du type de protection utilisé, accompagnés de leurs intervalles de confiance à 95 %, pour chaque site

Un effet significatif de la variable *hauteur moyenne* des plants, avec un coefficient positif indique que les plants présentant une hauteur plus élevée sont plus susceptibles d'être consommée. C'est le cas pour les sites de *Retz* et *Saint-Gobain* ( $p < 0,001$  et  $p = 0,018$  ; respectivement). A l'inverse, pour le site de *Macon* ( $p = 0,031$ ), le coefficient négatif indique que les plants les plus petits sont plus susceptibles d'être consommés.

Le modèle d'abrutissement latéral n'a pas permis d'estimer les coefficients pour la modalité *Gaine* dans certains sites (annexe 1), en raison du faible nombre de plants morts dans cette modalité sur ces sites (tableau 13).

## 6 Discussions générales et perspectives

---

### 6.1 Effets des méthodes de protection

La mise en place et le suivi sur une année du réseau de dispositifs expérimentaux a permis de valider, au moins partiellement, les trois hypothèses de travail, à savoir :

- Hypothèse 1 : Les **dommages d'aboutissements occasionnés par les ongulés sur les plants sont réduits** par leurs protections individuelles, validant ainsi l'hypothèse 1. En effet, plusieurs modalités de protection, notamment les protections mécaniques (gaines, piquets et pince) et certains répulsifs (graisse 1, laine), ont significativement réduit les aboutissements terminaux et latéraux par rapport aux plants non protégés. La gaine, en particulier, a montré une efficacité quasi-totale dans la prévention de ce type de dommages.
- Hypothèse 2 : Les **différentes méthodes de protection individuelle**, qui relèvent de différents mécanismes d'action (effets mécaniques, répulsifs gustatifs, olfactifs ou visuels) **diffèrent dans leur efficacité à réduire les dommages occasionnés**. Cette hypothèse est également validée. Une distinction est apparue entre l'efficacité des protections mécaniques et celle des répulsifs. Les gaines et les piquets montrent de meilleurs résultats par rapport aux répulsifs en termes de réduction de la mortalité et d'aboutissement. Des différences significatives ont été observées au sein des répulsifs, certains montrant une efficacité très limitée, voire contre-productive, entraînant un taux d'aboutissement plus élevé dans certains cas.
- Hypothèse 3 : **La survie des plants est améliorée** par leurs protections individuelles. Cette hypothèse est partiellement validée. Seules les protections mécaniques, telles que les piquets et les gaines, ont significativement réduit la mortalité des plants par rapport au témoin. Les traitements répulsifs n'ont pas montré d'effet significatif sur la survie des plants et ont parfois été associés à des taux de mortalité égaux ou supérieurs à ceux des témoins.

Les protections individuelles réduisent effectivement les dégâts d'aboutissements occasionnés par les ongulés sur les plants (Gill et al 1992 ; Thyroff et al., 2022). Dans mon étude, une distinction nette est apparue entre les protections mécaniques et les répulsifs, les premières se montrant généralement supérieures en efficacité. Aussi, les protections individuelles améliorent la survie des plants, bien que cet effet soit principalement le fait des protections mécaniques.

L'efficacité des protections mécaniques, en particulier la gaine et les piquets, est une conclusion majeure de cette étude. La gaine s'est avérée être de loin la protection la plus efficace, offrant une efficacité quasi-totale dans la prévention de l'aboutissement terminal et latéral, et réduisant significativement la mortalité. Les piquets, en tant que protection mécanique partielle, ont également démontré de bonnes performances, ce qui constitue un résultat surprenant par rapport à mes attentes initiales. À ma connaissance, il s'agit de la première étude à évaluer l'efficacité de

ce type de barrière physique en plantation forestière. Ces résultats soulignent donc l'importance potentielle des protections mécaniques, même partielles, et ouvrent de nouvelles perspectives pour la gestion et la conception des dispositifs de protection des plantations.

L'étude révèle des performances variables des répulsifs, généralement moins efficaces que certaines protections mécaniques comme les gaines ou les piquets. Cette observation est cohérente avec la littérature, qui montre que l'efficacité des répulsifs peut varier selon le contexte (Elmeros et al., 2011 ; Kimball et al., 2011). Dans notre étude, où la concentration, la date d'application étaient fixées et les conditions similaires pour tous les dispositifs, les différences observées entre répulsifs et protections mécaniques reflètent probablement les limites intrinsèques des répulsifs face aux ongulés, plutôt que des variations expérimentales. Malgré cette variabilité générale, les modalités « *Graisse1 & 2* » ont montré une efficacité significative dans la réduction de l'abrutissement terminal au niveau du réseau global.

Les résultats montrent également l'influence de la hauteur moyenne des plants sur la mortalité et l'abrutissement. Les plants plus grands meurent moins, suggérant une meilleure capacité à surmonter les stress initiaux de transplantation. Cependant, les plants plus hauts étaient également plus sujets à l'abrutissement terminal et latéral ce qui suggère que ces arbres seraient plus facilement détectables et accessibles pour les ongulés (Renaud et al., 2003). Cette dualité est en accord avec d'autres études qui montrent que les cervidés ont une préférence de consommation qui se situe à une hauteur d'environ 75 cm, rendant les petits plants moins fréquemment abrutis que les plants plus grands (Maldacho et al., 2025).

La saison joue un rôle déterminant dans l'évaluation de l'abrutissement par les cervidés. En effet, la majorité des études sur les impacts de l'abrutissement se sont concentrées sur l'hiver (Bergqvist et al., 2014). Bien que les cervidés consomment également des pousses d'arbres pendant l'été, les connaissances sur les effets d'une consommation estivale restent limitées (Nichols et Spong, 2014). Les comparaisons entre l'abrutissement hivernal et estival sont rares, ce qui limite la compréhension des impacts saisonniers sur les espèces végétales et les écosystèmes forestiers (Herder et al., 2009). Ainsi, la saisonnalité constitue un facteur essentiel à prendre en compte pour évaluer correctement l'abrutissement et orienter les stratégies de gestion des interactions entre les cervidés et les arbres. Gazeau (2024) a ainsi mis en évidence l'augmentation de la consommation de plants de chêne sessile par le cerf au cours du débourrement des bourgeons, qui a été mise en relation avec une modification de la digestibilité des plants pour le cerf durant cette période. La digestibilité des végétaux joue en effet un rôle important dans le choix alimentaire des ongulés, et elle peut varier avec le temps et les conditions climatiques (Rietsch & Saïd, 2021).

Un aspect particulier de cette étude est la forte variation des taux de mortalité et d'abrutissement entre les 14 sites expérimentaux, allant de 2,9% à 63,6% d'abrutissement total un an après plantation. Cette variation souligne l'importance des conditions locales telles que la pression d'ongulés, l'accessibilité des sites, la diversité des habitats, les pratiques de gestion cynégétique et sylvicole (Maldacho et al., 2025). La diversité des sites couverts par cette étude en France et en Belgique, en plaine et en montagne, avec différentes espèces d'arbres et de schémas de plantation

constitue un atout majeur de l'étude, permettant de prendre en compte une gamme de contextes bien plus large que la plupart des études sur le sujet, souvent limitées à un ou quelques sites. Ce large panel de situations permet d'obtenir des résultats robustes et les résultats obtenus renforcent l'idée qu'une méthode unique ne peut être appliquée et que les stratégies de protection doivent impérativement s'adapter à un diagnostic localisé.

Une comparaison intéressante peut être faite entre la *gaine* et les enclos. L'efficacité quasi-totale de la *gaine* à protéger les plants individuels de l'abrutissement et de la mortalité la rapproche de l'effet d'une clôture. La différence fondamentale réside dans le niveau d'action : la *gaine* protège un plant individuel, tandis qu'une clôture exclut les ongulés de toute une parcelle. Si la *gaine* peut être considérée comme une "micro-clôture" pour le plant, la pose d'une clôture au niveau de la parcelle a des effets plus larges. Elle modifie l'ensemble de la végétation au sein de la parcelle (Boulanger et al., 2015), la soustrayant à l'abrutissement, ce qui peut entraîner une compétition accrue avec les essences d'intérêt (Côté et al., 2004). De plus, les clôtures de parcelle peuvent influencer le comportement des ongulés à l'extérieur, augmentant la pression d'abrutissement dans les zones non protégées et fragmentant le paysage (Baltzinger et al., 2018). A contrario, les *gaines*, en ciblant uniquement les plants d'intérêt, évitent ces effets indirects sur la végétation environnante. Elles constituent une solution plus localisée, potentiellement moins coûteuse et plus flexible que les clôtures pour des objectifs de protection ciblés.

## 6.2 Considérations méthodologiques

Les résultats de cette étude sont encourageants et ouvrent de nouvelles pistes pour l'adaptation des itinéraires sylvicoles face à la pression des ongulés. Pour approfondir les connaissances acquises et développer des stratégies de gestion face à l'augmentation des populations d'ongulés, plusieurs axes de recherche et d'expérimentation sont envisagés. Le réseau de sites que nous avons mis en place et que j'ai étudié dans ce travail est de grande ampleur, tant par le nombre de modalités de protections testées que par le nombre de sites installés selon le même protocole. Cette ampleur a permis l'obtention de résultats robustes, qui sont valides à travers une large gamme de conditions pédoclimatiques et d'espèces d'arbres.

Néanmoins, la durée d'observation utilisée dans ce travail (une année) ne permet qu'une compréhension tronquée des dynamiques à long terme de l'efficacité des protections et de la vulnérabilité des plants. Les dispositifs installés seront suivis pendant une durée plus longue (2 à 4 ans) et les mesures complémentaires combleront en partie cette limitation actuelle. Un suivi pluriannuel semble indispensable pour déterminer à quelle hauteur les plants atteignent un "stade de sécurité" où ils sont moins sujets aux dégâts causés par les ongulés, voire hors de portée des ongulés, en fonction de la dynamique de croissance des espèces d'arbres. Cela aiderait à optimiser la durée de maintien des protections. Un suivi prolongé permettrait également d'évaluer la durée de vie réelle de chaque protection, la fréquence nécessaire de ré-application ou de repositionnement, et d'identifier les modalités les plus robustes face aux contraintes environnementales. Enfin, il est important d'évaluer l'impact à long terme de l'abrutissement et

des protections sur la qualité future des arbres. Les dégâts répétés peuvent avoir des conséquences néfastes sur l'architecture des plants, notamment une perte de dominance apical ([Mårell et al. 2012 ; Forêts de France, 2021](#)), (figure 35).



Figure 35 : Hêtres ayant subi des abrutissements successifs en forêt domaniale de Lutzelhouse. Crédit photo : ©Nicolas Masson

Le faible nombre de plants affectés par le frottis dans notre étude (1,26 % au niveau du réseau) n'a pas permis de conduire une analyse approfondie de ce type de dommage, sauf à souligner que ce dommage sur les arbres est peu important comparé à l'abrutissement. Cette faible incidence pourrait s'expliquer par la taille réduite des plants au moment de l'installation, ou par la disponibilité d'autres espèces d'arbres plus grandes situées dans un environnement proche. La rareté de ce type de dégâts implique une puissance statistique insuffisante pour estimer de manière fiable l'effet des modalités de protection sur ce type de dommage. En conséquence, j'ai considéré le frottis comme un indicateur descriptif dans cette étude. Un suivi prolongé des dispositifs est donc nécessaire pour évaluer si la fréquence des frottis augmente avec la croissance des plants et pour mieux caractériser son effet à moyen et long terme sur la survie, la croissance et la qualité des plants.

L'étude a également été confrontée à l'absence de variables détaillées caractérisant précisément la pression des cervidés. Bien que des pièges photographiques aient identifié les espèces présentes, l'estimation de la fréquence de visite est purement qualitative. Ces manques limitent effectivement la capacité à expliquer l'origine de la variabilité inter-sites observée. Néanmoins, il est reconnu que la pression des ongulés dans un site est difficile à estimer précisément, sans disposer

d'équipements spécifiques pour suivre les populations d'ongulés. Une quantification plus précise au niveau local, de la densité ou de l'intensité de fréquentation par les ongulés est également importante pour relier la pression d'herbivorie aux dégâts observés. Il existe en France plusieurs territoires d'étude dans lesquels les animaux sont équipés de GPS qui permettent de connaître leur position et leurs déplacements. Installer des dispositifs expérimentaux semblables aux dispositifs de mon étude dans de tels territoires permettrait de mieux étudier l'impact de la pression d'ongulés sur l'efficacité des protections. Néanmoins, réaliser ces expérimentations dans les territoires d'études existants offrirait un réseau de sites plus réduit que le réseau que nous avons installés. En complément d'une caractérisation de la pression d'ongulés, la collecte d'informations approfondies sur l'environnement local permettra d'aller plus loin dans la compréhension de la forte variabilité inter-sites, une caractérisation environnementale détaillée semble nécessaire. Cela inclut la topographie, le microclimat, la composition et la densité de la flore spontanée (notamment les ressources alimentaires alternatives pour les ongulés comme la ronce ou le lierre), et les éléments structurants du paysage (routes, lisières, corridors).

L'évaluation de l'efficacité des dispositifs de protection individuelle sur la survie des plants est rendue complexe par la pression exercée par les ongulés, notamment via l'abrutissement, qui confond les effets propres aux modalités testées avec ceux liés aux dommages. L'intégration d'un bloc enclos, avec les mêmes modalités de protection, permettrait de lever cette contrainte en excluant totalement les ongulés et en offrant ainsi une base de référence pour isoler l'effet réel des protections sur la mortalité. Un tel dispositif offrirait également la possibilité de quantifier les effets intrinsèques des protections sur la survie et la croissance des plants, indépendamment des dégâts. Par exemple, les répulsifs appliqués peuvent avoir un impact sur la photosynthèse (figure 36), tandis que les gaines de protection modifient le microclimat autour du plant (température, humidité, disponibilité lumineuse), avec des conséquences potentielles sur sa dynamique de croissance. Ces effets pourraient être comparés au témoin enclos non protégé, permettant ainsi de distinguer l'effet propre de chaque modalité. Toutefois, il convient de souligner qu'une comparaison directe entre les plants du bloc enclos et ceux des blocs exclos n'est pas envisageable. En effet, la présence d'un enclos modifie la composition spécifique et la dynamique de la végétation ([Märell et al., 2012](#) ; [Bernes et al., 2018](#)), ce qui influe sur l'intensité de la compétition herbacée et, par conséquent, sur la performance des plants. L'interprétation des résultats doit donc intégrer ces effets afin de dissocier l'impact des protections individuelles de celui des conditions écologiques propres aux enclos.

J'ai observé l'existence d'autocorrélations spatiales significatives dans les dispositifs expérimentaux, pour l'abrutissement apical des plants. Pour remédier à ce problème, j'ai dû regrouper les observations par unité expérimentale, ce qui a eu pour conséquence de perdre l'information existant au niveau individuel. Pour conserver cette information, il serait nécessaire de pouvoir intégrer ces corrélations dans les modèles statistiques. Dans cet objectif, il faudrait concevoir différemment les dispositifs expérimentaux, avec notamment le choix de sites où l'on peut caractériser facilement les sources d'hétérogénéité du comportement des ongulés (proximité des lisières, type de végétation avoisinant les plants), l'installation d'un nombre plus restreint de

modalités ou d'un nombre plus important de plants observés par modalité, de manière à conserver de la puissance statistique malgré l'ajout des différents interactions spatiales.

L'autocorrélation spatiale identifiée justifie l'intégration de modèles spatiaux avancés (par exemple, des Modèles Linéaires Généralisés Spatiaux, ou approches de type INLA : Integrated Nested Laplace Approximations) qui gèrent directement les structures de dépendance spatiale. Cela permettrait potentiellement de revenir à des analyses au niveau individuel, augmentant la finesse des inférences statistiques sans surcharger le modèle.



Figure 36 : Modalités pouvant créer des perturbations physiologiques ou mécaniques sur les plants ; (a) Chaux, (b) Peinture, (c) Laine, (d) Pince. Crédit photo : ©Florian Vast

### 6.3 Recommandations pour la gestion

Les gestionnaires forestiers ou sylviculteurs sont confrontés à un défi majeur : protéger les jeunes plants des dégâts causés par les ongulés, dont les populations sont en augmentation afin de préserver les objectifs de production de bois.

Cette étude a montré que pour prévenir des dégâts liés aux ongulés, si le choix du sylviculteur est d'utiliser des protections individuelles, il faut alors privilégier des protections mécaniques, particulièrement les gaines. Celles-ci sont en effet efficaces pour préserver les jeunes plants contre l'abrutissement des ongulés. Elles agissent comme une barrière physique complète, empêchant l'accès direct des animaux aux parties vulnérables de l'arbre. L'efficacité de ces gaines est indéniable sur le terrain, se traduisant par des taux de mortalité et d'abrutissement (terminal et latéral) proches de zéro. Elles réduisent la mortalité et l'abrutissement terminal et latéral de manière significative, comme cela a été observé dans la plupart des sites de l'étude. Dans mon étude, je n'ai testé qu'une hauteur de *gaine*. Néanmoins, nous savons que pour avoir un effet optimal, la hauteur des gaines doit dépasser celle des atteintes potentielles des ongulés, par exemple de 1,20 m à 1,50 m pour le chevreuil et jusqu'à 1,80 m pour le cerf élaphe.

Alors que l'efficacité des gaines est confirmée par nos résultats, l'utilisation des répulsifs, en particulier la *Graisse*, apparaît comme une modalité de protection inefficace pour lutter contre les dégâts d'abrutissement. Pourtant cette méthode est très répandue auprès des gestionnaires sylvicoles qui la considère comme une solution fiable. Cette étude démontre l'absence d'effet protecteur, contredisant les croyances ancrées par la profession. De la même manière, les autres répulsifs et les pinces n'offrent pas une protection satisfaisante. Ces résultats imposent de tirer une conclusion claire : ces dispositifs doivent être déconseillés de façon explicite. Leurs usages constituent, non seulement une perte de temps et de ressources, mais il entretient également une illusion de protection qui peut compromettre la réussite des plantations. La gestion sylvicole doit ainsi progresser en abandonnant ces méthodes inefficaces au profit de dispositifs dont l'efficacité est scientifiquement démontrée, comme les *gaines*.

Un atout essentiel de notre approche expérimental, repose sur la comparaison systématique des dispositifs de protection avec un témoin non protégé placé dans des conditions semblables. Cette démarche permet de limiter les biais d'interprétation liés à la variabilité des contextes locaux (figure 37). L'efficacité apparente des répulsifs, souvent interprété par les gestionnaires lorsque les plants protégés présentent de faibles niveaux d'abrutissement, en est une bonne illustration. Dans nos dispositifs, bien que situés dans des zones supposées de forte pression d'ongulés, les témoins non protégés ont eux aussi montré des taux d'abrutissement faibles. Cela indique que le niveau réduit de dégâts ne peut être attribué aux répulsifs. En l'absence de témoins, une conclusion biaisée quant à leur efficacité aurait été certaine. Dans un contexte marqué par la forte variabilité spatiale et temporelle de la pression d'ongulés et par la difficulté de son estimation, la présence d'un témoin non protégé constitue donc une condition indispensable pour évaluer de manière fiable l'efficacité des méthodes de protection.



Figure 37 : Exemples de la variabilité de 3 sites du réseau PICO : (a) site de Plainfaing (88) en avril 2025, (b) site de Plainfaing (88) en septembre 2025, avec une végétation dominante constitué de ronce, (c) site d'Orléans (45) en mars 2025, la végétation dominante est la fougère aigle, (d) plantation de pin maritime sur le site d'Orléans montrant de nombreuses empreintes de cerf élaphe, (e et f) plantation en ligne sur le site Jouaville (57) au moment de l'installation. Crédit photo : ©Florian Vast

Les *gaines* sont très majoritairement fabriquées à partir de plastique ou de polypropylène. Ces protections mécaniques se dégradent avec le temps sous l'effet des intempéries (vent, neige, gel, soleil), de la croissance de l'arbre lui-même, ou de l'action répétée des animaux. Ces dégradations, génèrent de la pollution par la décomposition de ces matériaux plastiques dans l'environnement. Cela constitue un aspect crucial à considérer dans une perspective de sylviculture durable. Des gaines en matériaux biosourcés et biodégradables existent actuellement sur le marché, il serait intéressant de mettre en place des expérimentations pour évaluer leurs performances techniques, économiques et ergonomiques. Ces gaines devront à la fois être suffisamment résistantes pour apporter une protection durant les 1<sup>e</sup> année de la vie du plant, et devront ensuite effectivement se dégrader spontanément.

Le choix du type de protection doit également se réfléchir en fonction d'autres critères que celui de l'efficacité vis-à-vis de l'abrutissement. Dans un contexte où le manque d'ouvriers forestiers est important, et où les dépenses engendrées par les plantations peuvent-être élevées, une évaluation ergonomique de la mise en place des différentes protections et une évaluation du coût de la pose et de la dépose des protections sont des éléments complémentaires à prendre en compte dans le choix de la méthode de protection. Ces aspects sont étudiés dans le cadre du projet PICO. Les résultats pourront permettre de raisonner le choix de l'utilisation de certaines modalités de protection par une évaluation multicritère reposant sur l'efficacité, la pénibilité pour les opérateurs et le coût d'installation.

Pour finir, il est important de rappeler qu'en complément de ces protections individuelles, d'autres stratégies pour réduire le niveau de dégâts causées par les ongulés sur les plants existent :

- La réduction des populations d'ongulés par des prélèvements cynégétiques est une action importante pour diminuer la pression d'herbivorie, bien que ses effets se manifestent sur le long terme.
- La gestion des habitats par l'aménagement du milieu forestier, par exemple en créant des zones de gagnage (ouverture des peuplements plantés, éclaircies ou diminution de la densité des plants, entretien des cloisonnements), peut offrir des ressources alimentaires alternatives aux ongulés, détournant leurs pressions des essences d'intérêt sylvicole.
- Les clôtures au niveau de la parcelle, sont très efficaces pour exclure temporairement les cervidés et favoriser la croissance en hauteur. Cependant, elles sont coûteuses en matériel et en main d'œuvre, et peuvent entraîner une barrière physique pour les animaux, augmentant la pression d'abrutissement dans les zones non clôturées.

Une approche adaptée au contexte local est primordiale, les parcelles peuvent être très différentes les unes des autres et la pression d'herbivorie peut varier fortement d'un site à l'autre.



## 7 Références bibliographiques :

---

1. Balandier, P., Mårell, A., Prévosto, B., Vincenot, L., 2022. Tamm review: Forest understorey and overstorey interactions: So much more than just light interception by trees. *For. Ecol. Manag.* 526, 120584. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120584>.
2. Ballon, P., Guibert, B., Hamard, J.P., Guillon, N., 1999. Sensibilité de quelques essences forestières de reboisement à l'abrutissement par le Chevreuil (*Capreolus capreolus*). *Rev. For. Fr.* 20. <https://doi.org/10.4267/2042/5414>.
3. Ballon, P., Hamard, J.P., Klein, F., 2005. Importance des dégâts de cervidés en forêt. Principaux acquis et recommandations suite à la mise en place d'un observatoire national. *Rev. For. Fr.* 399. <https://doi.org/10.4267/2042/5061>.
4. Baltzinger, M., Mårell, A., Archaux, F., Pérot, T., Leterme, F., Deconchat, M., 2016. Overabundant ungulates in French Sologne? Increasing red deer and wild boar pressure may not threaten woodland birds in mature forest stands. *Basic Appl. Ecol.* 17, 552–563. <https://doi.org/10.1016/j.baee.2016.04.005>.
5. Baltzinger, M., Mårell, A., Deconchat, M., Barrier, R., 2018. Open game fences and their socio-spatial effects: Placing red deer, placing humans, managing territories. *TRACE :: J. Hum.-Anim. Stud.* 4, 28–61. <https://doi.org/10.23984/fjhas.67671>.
6. Barančeková, M., Krojerová-Prokešová, J., Homolka, M., 2007. Impact of deer browsing on natural and artificial regeneration in foodplain forest. *Folia Zoologica* 56, 354–364.
7. Barrere, J., Petersson, L.K., Boulanger, V., Collet, C., Felton, A.M., Löf, M., Saïd, S., 2021. Canopy openness and exclusion of wild ungulates act synergistically to improve oak natural regeneration. *For. Ecol. Manag.* 487, 118976. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118976>.
8. Bergquist, J., Löf, M., Örlander, G., 2009. Effects of roe deer browsing and site preparation on performance of planted broadleaved and conifer seedlings when using temporary fences. *Scand. J. For. Res.* 24, 308–317. <https://doi.org/10.1080/02827580903117420>.
9. Bernes, C., Macura, B., Jonsson, B.G., Junninen, K., Müller, J., Sandström, J., Löhmus, A., Macdonald, E., 2018. Manipulating ungulate herbivory in temperate and boreal forests: effects on vegetation and invertebrates. A systematic review. *Environ. Evid.* 7, 13. <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0125-3>.
10. Bieber, C., Ruf, T., 2005. Population dynamics in wild boar *Sus scrofa*: ecology, elasticity of growth rate and implications for the management of pulsed resource consumers. *J. Appl. Ecol.* 42, 1203–1213. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01094.x>.

11. Bison, M., Loison, A., 2022. Les ongulés sauvages de France Métropolitaine. Rapport EFESE, CGDD. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/efese\\_cgdd\\_rapport\\_ongules\\_sauvages\\_france\\_decembre2022.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/efese_cgdd_rapport_ongules_sauvages_france_decembre2022.pdf)
12. Blumstein, D.T., 2016. Habituation and sensitization: new thoughts about old ideas. *Anim. Behav.* 120, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2016.05.012>.
13. Bonnot, N., Morellet, N., Verheyden, H., Cargnelutti, B., Lourtet, B., Klein, F., Hewison, A.J.M., 2013. Habitat use under predation risk: hunting, roads and human dwellings influence the spatial behaviour of roe deer. *Eur. J. Wildl. Res.* 59, 185–193. <https://doi.org/10.1007/s10344-012-0665-8>.
14. Borowski, Z., Gil, W., Bartoń, K., Zajączkowski, G., Łukaszewicz, J., Tittenbrun, A., Radliński, B., 2021. Density-related effect of red deer browsing on palatable and unpalatable tree species and forest regeneration dynamics. *For. Ecol. Manag.* 496, 119442. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119442>.
15. Boulanger, V., 2010. Pression d'herbivorie et dynamique des communautés végétales : influence à court et moyen termes des populations de cervidés sur la diversité des communautés végétales en forêt (phdthesis). Université de Nancy.
16. Boulanger, V., Baltzinger, C., Saïd, S., Ballon, P., Picard, J.-F., Dupouey, J.-L., 2015. Decreasing deer browsing pressure influenced understory vegetation dynamics over 30 years. *Ann. For. Sci.* 72, 367–378. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0431-z>.
17. Boulanger, V., Dupouey, J., Archaux, F., Badeau, V., Baltzinger, C. et al., 2018. The role of ungulates in nowadays temperate forests. A response to Fløjgaard et al. *Glob. Change Biol.* 24. <https://doi.org/10.1111/gcb.14122>.
18. Boulanger, V., Saïd, S., Laurent, L., Henry, C., 2024. Réduire le déséquilibre forêt-ongulés pour permettre le renouvellement des forêts. *Rendez-vous Tech. ONF* 80, 45-48.  
(hal-04867704)
19. Brown, J.S., Laundre, J.W., Gurung, M., 1999. The Ecology of Fear: Optimal Foraging, Game Theory, and Trophic Interactions. *J. Mammal.* 80, 385–399. <https://doi.org/10.2307/1383287>.
20. Buzek, J., Malmström, C., 2009. Règlement (CE) no 1069/2009 du Parlement européen et du Conseil établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux.
21. Candaele, R., Ligot, G., Licoppe, A., Lievens, J., Fichefet, V., Jonard, M., André, F., Lejeune, P., 2022. Ungulates and Succession Dynamics Restrict Tree Species Richness in Temperate Oak-Beech Forests. *SSRN Electron. J.*  
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4292675>.
22. CDAF., 2022. Guide pour optimiser les régénérations forestières, Fiche technique REGE n°7 : les protections contre le gibier.  
[https://srfb.be/wp-content/uploads/2022/12/17\\_fiche-technique-7\\_protection-gibier.pdf](https://srfb.be/wp-content/uploads/2022/12/17_fiche-technique-7_protection-gibier.pdf)

23. Canellas, C., Gibelin, A.-L., Lassègues, P., Kerdoncuff, M., Dandin, P., Simon, P., 2014. Les normales climatiques spatialisées Aurelhy 1981-2010 : températures et précipitations. *La Météorologie* 8, 47. <https://doi.org/10.4267/2042/53750>.
24. Carpio, A.J., Apollonio, M., Acevedo, P., 2021. Wild ungulate overabundance in Europe: contexts, causes, monitoring and management recommendations. *Mammal Rev.* 51, 95–108. <https://doi.org/10.1111/mam.12221>.
25. Chauchard, S., Carcaillet, C., Guibal, F., 2018. Fir expansion not controlled by moderate densities of large herbivores: a Mediterranean mountain grassland conservation issue. *Ann. For. Sci.* 75, 94. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0774-y>.
26. Chevassus-au-Louis, B., Badré, M., Hirbec, P. et al., 2020. Forêts françaises en crise : nature, climat, société. *Rev. For. Fr.* 72, 287–295. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2020.5330>.
27. Chevrier, T., 2016. Quel est l'impact d'une communauté d'ongulés sur les essences forestières ? *Faune sauvage* 312, 32-38.
28. Côté, S.D., Rooney, T.P., Tremblay, J.-P., Dussault, C., Waller, D.M., 2004. Ecological Impacts of Deer Overabundance. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35, 113–147. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105725>.
29. Daburon, H., 1963. Les dégâts de cerf et de chevreuil en forêt. *Rev. For. Fr.* 11, 860-874. <https://doi.org/10.4267/2042/24509>.
30. D'Aprile, D., Vacchiano, G., Meloni, F., Garbarino, M., Motta, R., Ducoli, V., Partel, P., 2020. Effects of Twenty Years of Ungulate Browsing on Forest Regeneration at Paneveggio Reserve, Italy. *Forests* 11, 612. <https://doi.org/10.3390/f11060612>.
31. Decors, A., 2005. L'écorçage par le cerf (*Cervus elaphus*) : une autovermifugation par les tanins. *Médecine vétérinaire et santé animale.* (dumas-04571231)
32. El Hani, A., Conover, M.R., 1995. Comparative Analysis of Deer Repellents. *Natl. Wildl. Res. Cent. Repel. Conf.* 1995.
33. Elmeros, M., Winbladh, J.K., Andersen, P.N., Madsen, A.B., Christensen, J.T., 2011. Effectiveness of odour repellents on red deer and roe deer: a field test. *Eur. J. Wildl. Res.* 57, 1223–1226. <https://doi.org/10.1007/s10344-011-0517-y>.
34. Fesneau, M., 2023. Ouverture du guichet et annonce des résultats de l'appel à manifestation d'intérêt "renouvellement forestier". <https://agriculture.gouv.fr/france-2030-ouverture-du-guichet-et-annonce-des-resultats-de-lappel-manifestation-dinteret>

35. Forêts de France, 2021. Dégâts de gibier : l'abrutissement, partie 1. Fiche technique. [https://plateforme-nationale-foret-gibier.cartogip.fr/documents/FdF646-sept2021\\_p36-37\\_Abrutissement.pdf](https://plateforme-nationale-foret-gibier.cartogip.fr/documents/FdF646-sept2021_p36-37_Abrutissement.pdf)
36. Fortuny, X., Carcailliet, C., Chauchard, S., 2020a. Selective and taxon-dependent effects of semi-feral cattle grazing on tree regeneration in an old-growth Mediterranean mountain forest. *For. Ecosyst.* 7, 11. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00222-7>.
37. Fuller, R.J., 2001. Ecological impacts of increasing numbers of deer in British woodland. *Forestry* 74, 193–199. <https://doi.org/10.1093/forestry/74.3.193>
38. Gazeau, T., 2024. Expérimentation sur la protection individuelle de semis de chêne pédonculé contre le cerf élaphe à la réserve de la Haute-Touche.
39. Gebert, C., Verheyden-Tixier, H., 2008. Variations of diet composition of Red Deer (*Cervus elaphus* L.) in Europe. *Mammal Rev.* 31, 189–201. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2001.00090.x>.
40. Gill, R.M.A., 2001. The impact of deer on woodlands: the effects of browsing and seed dispersal on vegetation structure and composition. *Forestry* 74, 209–218. <https://doi.org/10.1093/forestry/74.3.209>.
41. Gill, R.M.A., 1992. A Review of Damage by Mammals in North Temperate Forests: 3. Impact on Trees and Forests. *Forestry* 65, 363–388. <https://doi.org/10.1093/forestry/65.4.363a>.
42. Green, A.J., Baltzinger, C., Lovas-Kiss, Á., 2022. Plant dispersal syndromes are unreliable, especially for predicting zochory and long-distance dispersal. *Oikos* 2022, oik.08327. <https://doi.org/10.1111/oik.08327>.
43. Guerisoli, M. de las M., Pereira, J.A., 2020. Deer damage: A review of repellents to reduce impacts worldwide. *J. Environ. Manage.* 271, 110977. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110977>.
44. Herder, M.D., Bergström, R., Niemelä, P., Danell, K., Lindgren, M., 2009. Effects of Natural Winter Browsing and Simulated Summer Browsing by Moose on Growth and Shoot Biomass of Birch. *Ann. Zool. Fenn.* 46, 63–74. <https://doi.org/10.5735/086.046.0107>.
45. Horsley, S.B., Stout, S.L., DeCalesta, D.S., 2003. White-tailed deer impact on the vegetation dynamics of a northern hardwood forest. *Ecol. Appl.* 13, 98–118. <https://doi.org/10.1890/1051-0761>.
46. Kimball, B.A., Taylor, J., Perry, K.R., Capelli, C., 2009. Deer Responses to Repellent Stimuli. *J. Chem. Ecol.* 35, 1461–1470. <https://doi.org/10.1007/s10886-009-9721-6>.
47. König, A., Hudler, M., Dahl, S.-A., Bolduan, C., Brugger, D., Windisch, W., 2020. Response of roe deer to seasonal and local changes in dietary energy content and quality. *Anim. Prod. Sci.* 60, 1315. <https://doi.org/10.1071/AN19375>.

48. Kuijper, D.P.J., Sahlén, E., Elmhagen, B. et al., 2016. Paws without claws? Ecological effects of large carnivores in anthropogenic landscapes. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 283, 20161625. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.1625>.
49. Le Saout, S., Padié, S., Chamaillé-Jammes, S. et al., 2014. Short-term effects of hunting on naïve black-tailed deer. *Can. J. Zool.* 92, 915–925. <https://doi.org/10.1139/cjz-2014-0122>.
50. Leroy, M., Bontemps, J.-D., Brahic, E. et al., 2021. Quels besoins de connaissances pour construire le futur des forêts en France ? *Rev. For. Fr.* 73, 7–19. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2021.4992>.
51. Leroy-Terquem, É., 2021. Entretenir sa forêt. *Forêt de France* 36-37, Fiche technique 37. [https://www.fransylva.fr/uploads/files/e889c49e-b2bb-47ef-afe8 f0bc43d9d567.pdf](https://www.fransylva.fr/uploads/files/e889c49e-b2bb-47ef-afe8-f0bc43d9d567.pdf)
52. Linnell, J.D.C., Cretois, B., Nilsen, E.B. et al., 2020. The challenges and opportunities of coexisting with wild ungulates in the human-dominated landscapes of Europe's Anthropocene. *Biol. Conserv.* 244, 108500. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108500>.
53. Löf, M., Barrere, J., Engman, M., Petersson, L.K., Villalobos, A., 2021. The influence of fencing on seedling establishment during reforestation of oak stands. *Eur. J. For. Res.* 140, 807–817. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01369-w>.
54. Löf, M., Dey, D.C., Navarro, R.M., Jacobs, D.F., 2012. Mechanical site preparation for forest restoration. *New For.* 43, 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>.
55. Madalcho, A.B., Gazda, A., Szwagrzyk, J., 2025. Ungulate browsing patterns and forage abundance determine the regeneration of palatable tree species. *For. Ecosyst.* 12, 100288. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100288>.
56. Maizeret, C., Boutin, J.-M., Bidet, F., Carlino, J.-P., 1991. Influence de la composition chimique des végétaux sur les choix alimentaires des chevreuils. *Rev. Écol. Terre Vie* 46, 39–52. <https://doi.org/10.3406/revec.1991.2018>.
57. Maizeret, C., Tixier, H., Ballon, P., Dukan, P., Guibert, B., 1999. Les Dégâts alimentaires du chevreuil en milieu forestier. *Rev. For. Fr.* 405. <https://doi.org/10.4267/2042/5446>.
58. Mårell, A., Ballon, P., Hamard, J.-P., Boulanger, V., 2012. Les dispositifs de type enclos-exclos : des outils au service de la gestion et de la recherche. *Rev. For. Fr.* <https://doi.org/10.4267/2042/47473>.
59. Martin, J.-L., Baltzinger, C., 2002. Interaction among deer browsing, hunting, and tree regeneration. *Can. J. For. Res.* 32, 1254–1264. <https://doi.org/10.1139/x02-043>.
60. Ministère de l'agriculture., 2019. Distances de sécurité pour les traitements phytopharmaceutiques à proximité des habitations. <https://agriculture.gouv.fr/distances-de-securite-pour-les-traitements-phytopharmaceutiques-proximite-des-habitations>

61. Nichols, R.V., Spong, G., 2014. Ungulate browsing on conifers during summer as revealed by DNA. *Scand. J. For. Res.* 29, 650–652. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.960895>
62. ONF., 2024. Les 4 principaux dégâts forestiers causés par les grands ongulés. <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/%2B/221a::cerfs-chevreuils-sangliers-trop-dongules-nuit-aux-forets.html>
63. Pérez-Barbería, F.J., Hooper, R.J., Gordon, I.J., 2013. Long-term density-dependent changes in habitat selection in red deer (*Cervus elaphus*). *Oecologia* 173, 837–847. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2686-8>.
64. Pollard, E., Cooke, A.S., 1994. Impact of muntjac deer on EGG-laying sites of the white admiral butterfly. *Biol. Conserv.* 70, 189–191. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(94\)90287-9](https://doi.org/10.1016/0006-3207(94)90287-9).
65. Putman, R.J., Moore, N.P., 1998. Impact of deer in lowland Britain on agriculture, forestry and conservation habitats. *Mammal Rev.* 28, 141–164. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2907.1998.00031.x>.
66. Ramirez, J.I., Jansen, P.A., Poorter, L., 2018. Effects of wild ungulates on the regeneration, structure and functioning of temperate forests. *For. Ecol. Manag.* 424, 406–419. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.016>.
67. Redick, C.H., Jacobs, D.F., 2020. Mitigation of Deer Herbivory in Temperate Hardwood Forest Regeneration: A Meta-Analysis. *Forests* 11, 1220. <https://doi.org/10.3390/f11111220>.
68. Reimoser, F., Gossow, H., 1996. Impact of ungulates on forest vegetation and its dependence on the silvicultural system. *For. Ecol. Manag.* 88, 107–119. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03816-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03816-9).
69. Reimoser, F., Putman, R., 2011. Impacts of wild ungulates on vegetation: costs and benefits. *Ungulate Management in Europe*, 144–191. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511974137.007>.
70. Renaud, P.C., Verheyden-Tixier, H., Dumont, B., 2003. Damage to saplings by red deer (*Cervus elaphus*): effect of foliage height and structure. *For. Ecol. Manag.* 181, 31–37. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00126-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00126-9).
71. Requardt, A., Schuck, A., Köhl, M., 2009. Means of combating forest dieback - EU support for maintaining forest health and vitality. *IForest* 2, 38–42. <https://doi.org/10.3832/ifor0480-002>.
72. Rietsch, A., Saïd, S., 2021. Influence de la disponibilité alimentaire et du climat sur l'aboutissement. Utilisation de la méthode Aldous dans la réserve nationale de chasse et de faune sauvage de La Petite Pierre. Rapport ONCFS.

73. Rooney, T.P., 2001. Deer impacts on forest ecosystems: a North American perspective. *Forestry* 74, 201–208. <https://doi.org/10.1093/forestry/74.3.201>.
74. Saïd, S., Richard, E., Storms, D., Hamann, J.-L., 2012. La connaissance du régime alimentaire du cerf et du chevreuil. *Faune sauvage* 295, 8-11.
75. Saint-Andrieux, C., 2023. Prélèvements ongulés sauvages 2022-2023. Ongulés sauvages le réseau, 1-8. [https://ofb.gouv.fr/sites/ofb-gouv-fr/files/2025-11/fichetcgg\\_2022\\_2023.pdf](https://ofb.gouv.fr/sites/ofb-gouv-fr/files/2025-11/fichetcgg_2022_2023.pdf)
76. Saint-Andrieux, C., Bonenfant, C., Toïgo, C. et al., 2009. Factors Affecting Beech *Fagus sylvatica* Bark Stripping by Red Deer in a Mixed Forest. *Wildl. Biol.* 15, 187–196. <https://doi.org/10.2981/07-100>.
77. Shiiba, Y., Takeda, K., Matsushima, K., 2021. Effects of adding a commercial capsaicin fertilizer on the feeding behavior of sika deer. *Anim. Sci. J.* 92. <https://doi.org/10.1111/asj.13529>.
78. Shvidenko, A., Barber, C. V., Persson, R., Gonzalez, P., Hassan, R., Lakyda, P., McCallum, I., Nilsson, S., Pulhin, J., van Rosenburg, B., & Scholes, R. (2005). Forest and woodland systems. In R. M. Hassan, R. Scholes & N. Ash (Eds.), *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends* (Vol. 1 of the Millennium Ecosystem Assessment series, pp. 585–621). Washington, DC: Island Press.
79. Storms, D., Aubry, P., Hamann, J.-L. et al., 2008. Seasonal variation in diet composition and similarity of sympatric red deer and roe deer. *Wildl. Biol.* 14, 237–250. [https://doi.org/10.2981/0909-6396\(2008\)14%255B237:SVIDCA%255D2.0.CO;2](https://doi.org/10.2981/0909-6396(2008)14%255B237:SVIDCA%255D2.0.CO;2).
80. Stutz, R.S., Verschuur, L., Leimar, O., Bergvall, U.A., 2019. A mechanistic understanding of repellent function against mammalian herbivores. *Ecol. Process.* 8, 25. <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0179-3>.
81. Taccoen, A., Piedallu, C., Seynave, I. et al., 2021. Climate change impact on tree mortality differs with tree social status. *For. Ecol. Manag.* 489, 119048. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119048>.
82. Thyroff, E.C., Burney, O.T., Oliet, J.A., Redick, C.H., Jacobs, D.F., 2022. Toward Identifying Alternatives to Fencing for Forest Restoration. *Land* 11, 966. <https://doi.org/10.3390/land11070966>.
83. Tixier, H., Duncan, P., Scehovic, J. et al., 1997. Food selection by European roe deer: effects of plant chemistry. *J. Zool.* 242, 229–245. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1997.tb05799.x>.
84. Tixier, H., Maizeret, C., Duncan, P. et al., 1998. Development of feeding selectivity in roe deer. *Behav. Processes* 43, 33–42. [https://doi.org/10.1016/S0376-6357\(97\)00084-3](https://doi.org/10.1016/S0376-6357(97)00084-3).
85. Van Der Putten, W.H., De Ruiter, P.C. et al., 2004. Trophic interactions in a changing world. *Basic Appl. Ecol.* 5, 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2004.09.003>.

86. Van Lerberghe, P., 2014. Protéger les arbres contre les dégâts du gibier - Les manchons grillagés. ResearchGate, 1-67.  
[https://www.researchgate.net/publication/280546712\\_Proteger\\_les\\_arbres\\_contre\\_les\\_degats\\_du\\_gibier\\_-\\_Les\\_manchons\\_grillages](https://www.researchgate.net/publication/280546712_Proteger_les_arbres_contre_les_degats_du_gibier_-_Les_manchons_grillages).
87. VerCauteren, K.C., Lavelle, M.J., Hygnstrom, S., 2006. Fences and Deer-Damage Management: A Review of Designs and Efficacy. USDA Staff Publ. 99.  
[https://digitalcommons.unl.edu/icwdr\\_usdanwrc/99](https://digitalcommons.unl.edu/icwdr_usdanwrc/99)
88. Ward, J.S., Williams, S.C., Linske, M.A., 2018. Influence of invasive shrubs and deer browsing on regeneration in temperate deciduous forests. *Can. J. For. Res.* 48, 58–67. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0208>.
89. Warton, D. I., Blanchet, F. G., O'Hara, R. B., Ovaskainen, O., Taskinen, S., Walker, S. C., & Hui, F. K. C. (2016). Extending joint models in community ecology: A response to Beissinger et al. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(10), 737–738. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.07.007>
90. Weisberg, P.J., Bugmann, H., 2003. Forest dynamics and ungulate herbivory: from leaf to landscape. *For. Ecol. Manag.* 181, 1–12.  
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00123-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00123-3).
91. Welch, D., Staines, B.W., Scott, D. et al., 1991. Leader Browsing by Red and Roe Deer on Young Sitka Spruce Trees in Western Scotland. *Forestry* 64, 61–82. <https://doi.org/10.1093/forestry/64.1.61>.



## 8 Annexes

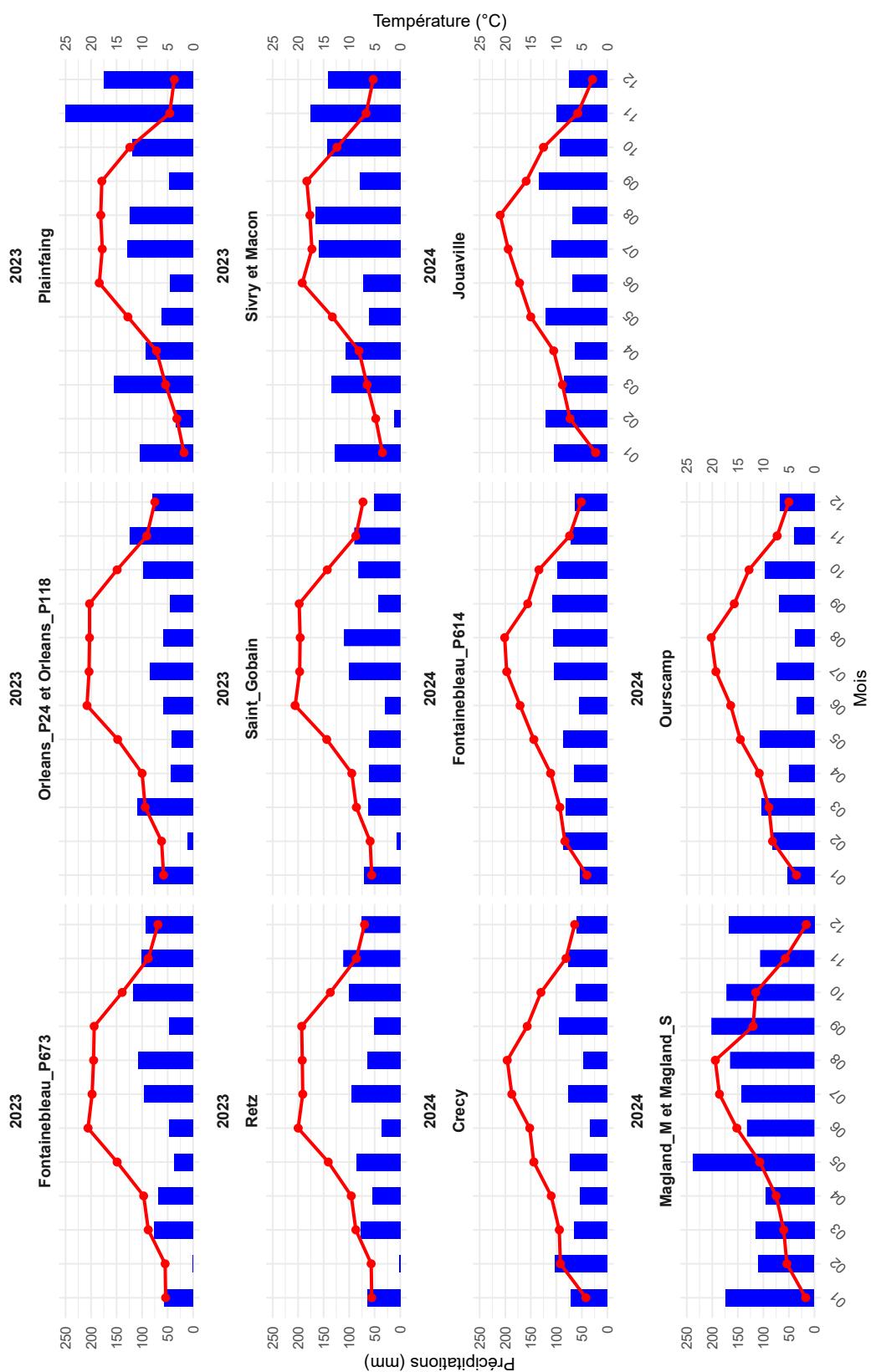
Annexe 1 : Paramètres des modèles linéaires généralisés de la mortalité, de l'abrutissement terminal et de l'abrutissement latéral, en fonction des modalités de protection et de la hauteur des plants (équation 2), pour chaque site

	Mortalité				Abrutissement Terminal				Abrutissement Latéral			
	Coef. estimé	Ecart-type	Statistique z	Valeur de p	Coef. estimé	Ecart-type	Statistique z	Valeur de p	Coef. estimé	Ecart-type	Statistique z	Valeur de p
<b>Crecy</b>												
Ordonnée à l'origine	-7,5	2,438	-3,077	0,002**	-0,105	1,971	-0,053	0,958	-4,427	1,872	-2,366	0,018*
Protection :												
Graisse1	0,252	1,282	0,197	0,844	1,407	0,869	1,62	0,105	1,318	0,868	1,519	0,129
Graisse2	0,717	1,234	0,581	0,561	0,685	0,913	0,75	0,453	1,479	0,855	1,729	0,084.
Chaux	-0,58	1,473	-0,394	0,694	0,393	1,061	0,371	0,711	1,014	0,889	1,14	0,254
Peinture	0,341	1,275	0,267	0,789	1,411	0,868	1,626	0,104	1,419	0,87	1,631	0,103
Pate	-0,151	1,437	-0,105	0,916	0,798	0,904	0,883	0,377	1,19	0,891	1,335	0,182
Laine	1,373	1,148	1,196	0,232	1,187	0,879	1,351	0,177	1,359	0,873	1,558	0,119
Pince	1,176	1,182	0,995	0,32	1,062	0,878	1,21	0,226	1,783	0,85	2,098	<b>0,036*</b>
Piquets	-0,042	1,441	-0,029	0,977	-11,71	218,933	-0,053	0,957	0,494	0,966	0,511	0,609
Gaine	-12,597	468,985	-0,027	0,979	-14,478	1028,474	-0,014	0,989	-7,971	35,516	-0,224	0,822
Hauteur Moyenne :	0,068	0,041	1,642	0,101	-0,06	0,035	-1,703	0,089.	0,014	0,03	0,487	0,626
<b>Fontainebleau_P614</b>												
Ordonnée à l'origine	2,116	0,655	3,232	0,001**	-0,468	1,214	-0,386	0,7	-1,201	1,365	-0,88	0,379
Protection :												
Graisse1	0,881	0,563	1,566	0,117	-1,809	1,127	-1,605	0,109	-1,222	1,256	-0,973	0,331
Graisse2	0,096	0,574	0,167	0,867	-0,903	1,044	-0,865	0,387	-0,218	1,144	-0,191	0,849
Chaux	0,078	0,535	0,145	0,885	1,166	1,322	0,882	0,378	1,772	1,4	1,266	0,205
Peinture	-1,513	0,572	-2,645	<b>0,008**</b>	1,145	1,117	1,025	0,305	1,751	1,224	1,431	0,152
Pate	-0,882	0,609	-1,448	0,148	-0,957	0,982	-0,974	0,33	-0,571	1,114	-0,513	0,608
Laine	-0,923	0,586	-1,576	0,115	1,237	1,315	0,941	0,347	1,809	1,391	1,3	0,194
Pince	-0,767	0,56	-1,369	0,171	-1,775	1,019	-1,742	0,082.	-2,358	1,406	-1,677	0,094.
Piquets	-1,288	0,598	-2,156	<b>0,031*</b>	-0,701	0,982	-0,714	0,475	-0,415	1,11	-0,374	0,709
Gaine	-3,086	1,138	-2,712	<b>0,007**</b>	-13,952	40,633	-0,343	0,731	-12,544	31,776	-0,395	0,693
Hauteur Moyenne :	-0,08	0,023	-3,401	<b>0,001***</b>	0,079	0,042	1,904	0,057.	0,075	0,047	1,583	0,113
<b>Fontainebleau_P673</b>												
Ordonnée à l'origine	-1,107	0,861	-1,286	0,198	-1,199	1,4	-0,857	0,391	-1,752	1,741	-1,006	0,314
Protection :												
Graisse1	-0,072	0,531	-0,135	0,893	0,532	0,663	0,802	0,423	-0,541	0,952	-0,568	0,57
Graisse2	0,204	0,445	0,459	0,646	0,858	0,633	1,356	0,175	1,047	0,721	1,451	0,147
Chaux	0,766	0,457	1,675	0,094.	0,843	0,693	1,216	0,224	0,173	0,842	0,206	0,837
Peinture	0,213	0,453	0,472	0,637	0,707	0,66	1,071	0,284	-0,518	0,96	-0,539	0,59
Pate	0,204	0,445	0,458	0,647	0,519	0,646	0,804	0,422	-0,265	0,828	-0,321	0,749
Laine	0,211	0,455	0,464	0,642	-0,773	0,747	-1,035	0,301	-1,266	0,912	-1,389	0,165
Pince	0,215	0,461	0,466	0,641	0,052	0,7	0,074	0,941	0,411	0,754	0,545	0,586
Piquets	-0,389	0,513	-0,758	0,448	-0,06	0,703	-0,086	0,932	0,356	0,774	0,459	0,646
Gaine	-2,095	0,681	-3,075	<b>0,002**</b>	-12,003	74,786	-0,161	0,872	-13,162	106,146	-0,124	0,901
Hauteur Moyenne :	0,004	0,024	0,165	0,869	-0,003	0,042	-0,076	0,94	0,006	0,052	0,113	0,91
<b>Jouaville</b>												
Ordonnée à l'origine	-3,185	1,964	-1,622	0,105	-6,172	3,778	-1,634	0,102	0,141	4,839	0,029	0,977
Protection :												
Graisse1	-1,074	0,727	-1,477	0,14	-12,105	326,649	-0,037	0,97	-8,381	48,645	-0,172	0,863
Graisse2	-0,21	0,579	-0,362	0,717	-0,72	1,247	-0,577	0,564	-0,073	1,434	-0,051	0,959
Chaux	-1,131	0,721	-1,569	0,117	-0,761	1,255	-0,607	0,544	-7,863	46,265	-0,17	0,865
Peinture	0,101	0,552	0,183	0,855	0,471	0,944	0,499	0,618	0,823	1,251	0,658	0,511
Pate	0,003	0,617	0,004	0,997	-12,647	443,213	-0,029	0,977	-0,496	1,549	-0,32	0,749
Laine	-0,505	0,625	-0,809	0,419	-0,702	1,248	-0,562	0,574	-8,156	46,265	-0,176	0,86
Pince	0,124	0,586	0,211	0,833	-12,436	411,255	-0,03	0,976	-8,196	46,998	-0,174	0,862
Piquets	-1,163	0,723	-1,608	0,108	-0,804	1,247	-0,645	0,519	-0,274	1,45	-0,189	0,85
Gaine	-1,237	0,736	-1,68	0,093.	-15,743	1543,64	-0,01	0,992	-7,609	43,031	-0,177	0,86
Hauteur Moyenne :	0,036	0,049	0,735	0,462	0,081	0,093	0,875	0,382	-0,099	0,124	-0,795	0,427
<b>Macon</b>												
Ordonnée à l'origine	-4,525	1,957	-2,312	0,021*	2,266	2,028	1,117	0,264	2,346	1,217	1,928	0,054.
Protection :												
Graisse1	-0,121	0,874	-0,138	0,89	-0,236	0,918	-0,258	0,797	-0,276	0,597	-0,462	0,644
Graisse2	0,543	0,844	0,643	0,52	-0,046	0,768	-0,06	0,952	-1,066	0,602	-1,771	0,077.
Chaux	-0,539	0,965	-0,558	0,577	-0,087	0,854	-0,102	0,919	-0,153	0,576	-0,266	0,79
Peinture	-1,154	1,197	-0,964	0,335	0,438	0,934	0,469	0,639	0,881	0,597	1,477	0,14
Pate	-1,259	1,195	-1,054	0,292	0,016	0,855	0,019	0,985	-0,312	0,58	-0,538	0,59
Laine	0,253	0,825	0,306	0,759	-11,605	140,343	-0,083	0,934	-2,299	0,853	-2,696	<b>0,007**</b>
Pince	0,356	0,828	0,429	0,668	-0,449	0,824	-0,546	0,585	-0,644	0,578	-1,115	0,265
Piquets	-0,485	0,964	-0,503	0,615	-0,619	0,889	-0,696	0,487	-0,972	0,616	-1,578	0,114
Gaine	-1,212	1,195	-1,014	0,311	-12,298	123,352	-0,1	0,921	-13,132	116,803	-0,112	0,91
Hauteur Moyenne :	0,022	0,017	1,273	0,203	-0,036	0,019	-1,933	0,053.	-0,024	0,011	-2,161	<b>0,031*</b>

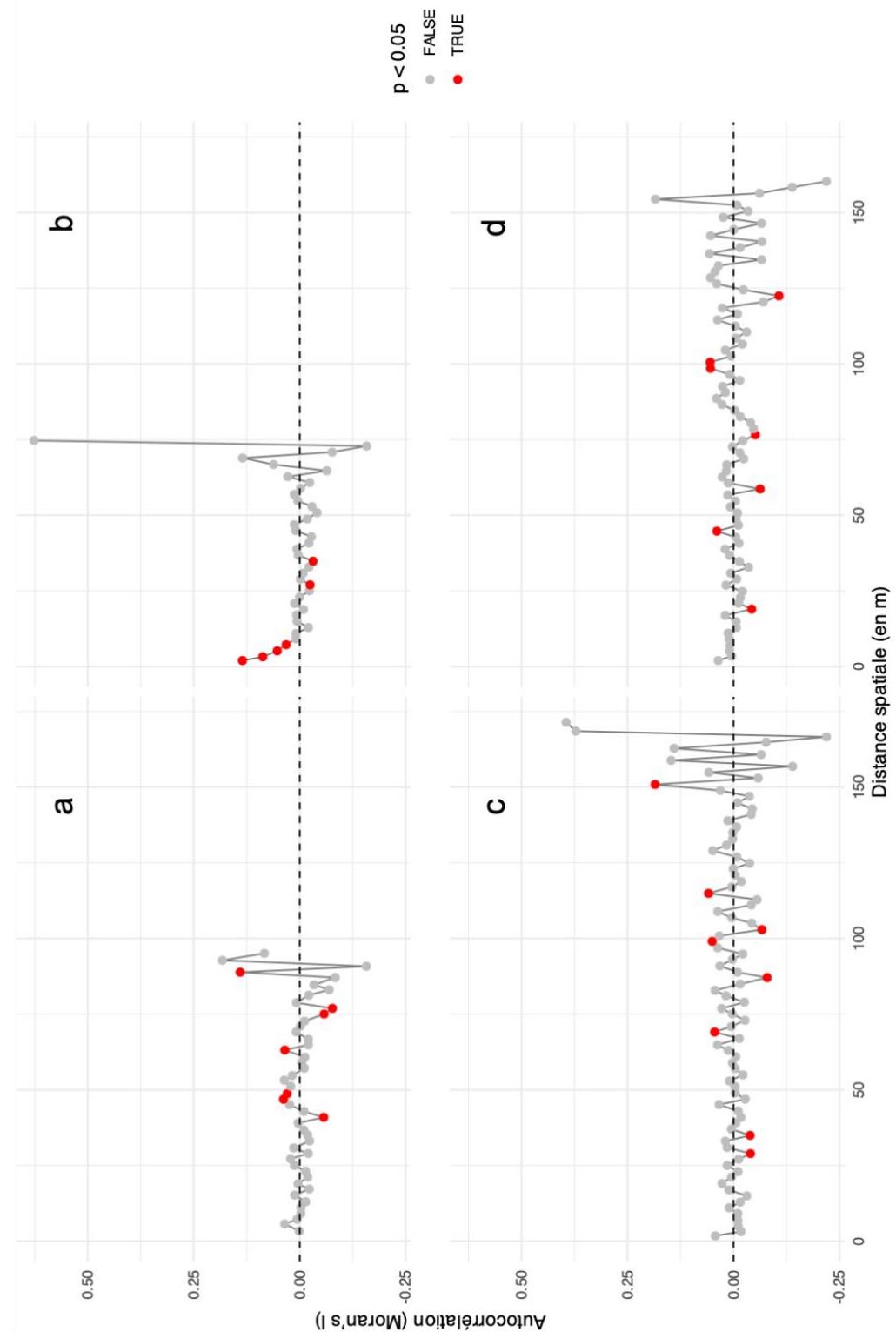
<b>Magland_M</b>													
Ordonnée à l'origine	-3,028	4,114	-0,736	0,462	-0,128	1,537	-0,084	0,933	-8,797	162,829	-0,054	0,957	
Protection :													
Graisse1	-13,5	848,325	-0,016	0,987	-0,693	0,895	-0,773	0,439	-5,132	2320,963	-0,002	0,998	
Graisse2	-13,249	728,532	-0,018	0,985	-0,813	0,891	-0,912	0,362	10,195	162,792	0,063	0,95	
Chaux	-10,235	160,992	-0,064	0,949	-1,484	1,138	-1,304	0,192	10,094	162,792	0,062	0,951	
Peinture	-9,531	113,325	-0,084	0,933	-0,747	0,894	-0,836	0,403	10,307	162,792	0,063	0,95	
Pate													
Laine	-13,183	706,532	-0,019	0,985	-0,062	0,739	-0,083	0,934	10,211	162,792	0,063	0,95	
Pince	0,555	1,34	0,414	0,679	-1,023	0,904	-1,131	0,258	10,283	162,791	0,063	0,95	
Piquets	-12,662	551,781	-0,023	0,982	0,012	0,741	0,016	0,988	10,137	162,792	0,062	0,95	
Gaine													
Hauteur Moyenne :	-0,024	0,079	-0,303	0,762	-0,048	0,031	-1,572	0,116	-0,117	0,083	-1,405	0,16	
<b>Magland_S</b>													
Ordonnée à l'origine	-20,865	13,448	-1,552	0,121	-20,553	0	0	0	3,022	9,155	0,33	0,741	
Protection :													
Graisse1	-16,072	2631,738	-0,006	0,995	18,914	0	0	0	0,626	0,978	0,641	0,522	
Graisse2	-15,439	1218,223	-0,013	0,99	18,971	0	0	0	0,429	1,168	0,367	0,714	
Chaux	-0,103	1,427	-0,072	0,943	18,924	0	0	0	-0,38	1,329	-0,286	0,775	
Peinture	-15,244	1149,979	-0,013	0,989	18,941	0	0	0	-10,426	159,677	-0,065	0,948	
Pate													
Laine	-1,262	2,027	-0,622	0,534	-17,764	0	0	0	-0,891	1,325	-0,673	0,501	
Pince	-15,086	665,773	-0,023	0,982	-16,305	0	0	0	-10,751	175,719	-0,061	0,951	
Piquets	-16,752	2729,234	-0,006	0,995	-17,776	0	0	0	-10,831	155,843	-0,069	0,945	
Gaine													
Hauteur Moyenne :	0,662	0,522	1,269	0,205	-0,088	0	0	0	-0,266	0,365	-0,729	0,466	
<b>Orleans_P118</b>													
Ordonnée à l'origine	-14,323	718,982	-0,02	0,984	2,146	2,066	1,038	0,299	-3,227	3,182	-1,014	0,31	
Protection :													
Graisse1	13,654	718,954	0,019	0,985	-1,343	0,665	-2,019	<b>0,043*</b>	-0,751	1,064	-0,706	0,48	
Graisse2	-4,563	5090,529	-0,001	0,999	-2,167	0,806	-2,689	<b>0,007**</b>	-0,839	1,218	-0,689	0,491	
Chaux	-3,87	5011,968	-0,001	0,999	0,071	0,607	0,117	0,907	0,88	0,837	1,051	0,293	
Peinture	-3,865	4816,618	-0,001	0,999	-1,04	0,681	-1,527	0,127	0,018	1,11	0,016	0,987	
Pate	14,037	718,954	0,02	0,984	-0,68	0,682	-0,998	0,318	0,745	0,852	0,875	0,382	
Laine	-4,509	4904,931	-0,001	0,999	-1,454	0,731	-1,99	<b>0,047*</b>	0,399	1,02	0,391	0,696	
Pince	13,274	718,955	0,018	0,985	-1,967	0,765	-2,571	<b>0,01*</b>	-0,808	1,016	-0,795	0,427	
Piquets	-3,986	4918,042	-0,001	0,999	-1,485	0,675	-2,198	<b>0,028*</b>	-0,843	1,259	-0,669	0,503	
Gaine	-3,726	4789,675	-0,001	0,999	-17,29	1068,954	-0,016	0,987	-15,936	629,118	-0,025	0,98	
Hauteur Moyenne :	-0,061	0,137	-0,445	0,656	-0,054	0,042	-1,269	0,205	0,026	0,062	0,416	0,678	
<b>Orleans_P24</b>													
Ordonnée à l'origine	-1,429	1,179	-1,213	0,225	-2,185	1,577	-1,385	0,166	-0,618	11,428	-0,054	0,957	
Protection :													
Graisse1	0,795	0,812	0,979	0,327	-9,572	98,011	-0,098	0,922	-0,235	17,516	-0,013	0,989	
Graisse2	-1,377	1,269	-1,085	0,278	-9,74	91,098	-0,107	0,915	-0,414	17,664	-0,023	0,981	
Chaux	-11,753	140,976	-0,083	0,934	0,638	0,76	0,841	0,401	-0,229	6,943	-0,033	0,974	
Peinture	-0,981	0,869	-1,128	0,259	-1,423	0,96	-1,481	0,138	1,565	4,963	0,315	0,753	
Pate	-0,33	0,717	-0,46	0,645	-0,685	0,898	-0,763	0,446	-0,241	6,916	-0,035	0,972	
Laine	-0,559	0,766	-0,73	0,465	-0,464	0,817	-0,568	0,57	-0,274	5,004	-0,055	0,956	
Pince	-0,508	0,778	-0,653	0,514	0,714	0,773	0,924	0,355	-0,188	7,825	-0,024	0,981	
Piquets	-9,868	63,441	-0,156	0,876	-0,569	0,827	-0,687	0,492	-0,258	5,595	-0,046	0,963	
Gaine	-9,594	58,401	-0,164	0,87	-15,352	775,622	-0,02	0,984	-0,502	3,218	-0,156	0,876	
Hauteur Moyenne :	-0,023	0,03	-0,762	0,446	-0,03	0,031	-0,96	0,337	0,078	0,19	0,412	0,68	
<b>Ourscamp</b>													
Ordonnée à l'origine	-3,724	2,104	-1,77	0,077	-5,736	2,532	-2,265	<b>0,023*</b>	-2,611	2,885	-0,905	0,366	
Protection :													
Graisse1	1,143	1,181	0,968	0,333	-1,25	1,185	-1,055	0,291	-0,728	1,262	-0,577	0,564	
Graisse2	-14,157	1165,485	-0,012	0,99	-0,501	0,943	-0,531	0,595	0,007	1,047	0,006	0,995	
Chaux	-0,021	1,439	-0,015	0,988	-9,573	64,127	-0,149	0,881	-0,036	1,039	-0,035	0,972	
Peinture	2,307	1,095	2,107	<b>0,035*</b>	-0,401	0,954	-0,42	0,674	-9,634	89,359	-0,108	0,914	
Pate	0,675	1,272	0,531	0,595	-0,426	0,969	-0,439	0,66	-0,032	1,031	-0,031	0,976	
Laine	0,697	1,254	0,556	0,578	0,081	0,867	0,094	0,925	0,045	1,033	0,043	0,966	
Pince	1,153	1,179	0,978	0,328	-1,176	1,184	-0,994	0,32	-9,655	84,463	-0,114	0,909	
Piquets	-13,012	663,07	-0,02	0,984	-9,476	58,34	-0,162	0,871	-9,667	82,928	-0,117	0,907	
Gaine	0,71	1,25	0,568	0,57	-10,261	77,572	-0,132	0,895	-10,056	105,705	-0,095	0,924	
Hauteur Moyenne :	-0,011	0,057	-0,191	0,849	0,094	0,075	1,248	0,212	-0,019	0,093	-0,205	0,838	
<b>Plainfaing</b>													
Ordonnée à l'origine	1,819	1,195	1,522	0,128	-0,208	2,857	-0,073	0,942	-16,251	0	0	0	
Protection :													
Graisse1	0,753	0,558	1,351	0,177	-17,554	4042,279	-0,004	0,997	-1,607	0	0	0	
Graisse2	-0,276	0,674	-0,409	0,682	-18,062	4690,496	-0,004	0,997	-1,916	0	0	0	
Chaux	0,903	0,539	1,674	0,094	0,172	0,862	0,199	0,842	-1,447	0	0	0	
Peinture	0,594	0,544	1,092	0,275	-16,956	2690,279	-0,006	0,995	-1,579	0	0	0	
Pate	-0,061	0,584	-0,104	0,917	-1,267	1,181	-1,073	0,283	-1,69	0	0	0	
Laine	0,067	0,606	0,111	0,911	-17,694	3882,32	-0,005	0,996	-1,822	0	0	0	
Pince	0,751	0,532	1,413	0,158	-1,048	1,181	-0,888	0,375	-1,483	0	0	0	
Piquets	-0,916	0,844	-1,085	0,278	0,07	0,904	0,077	0,939	-1,828	0	0	0	
Gaine	1,183	0,517	2,289	<b>0,022*</b>	-16,817	2708,839	-0,006	0,995	-1,364	0	0	0	
Hauteur Moyenne :	-0,144	0,044	-3,302	<b>0,001***</b>	-0,089	0,109	-0,816	0,415	-439,134	0	0	0	

<b>Retz</b>												
Ordonnée à l'origine	-1,384	0,775	-1,786	0,074.	-2,965	0,828	-3,583	0***	-4,453	0,973	-4,575	0***
Protection :												
Graisse1	0,045	0,69	0,065	0,948	-0,88	0,57	-1,545	0,122	-0,951	0,604	-1,574	0,115
Graisse2	0,527	0,616	0,856	0,392	-0,238	0,533	-0,446	0,656	-0,469	0,577	-0,812	0,417
Chaux	0,475	0,603	0,788	0,43	0,485	0,515	0,942	0,346	0,621	0,546	1,136	0,256
Peinture	0,178	0,645	0,276	0,783	-0,315	0,533	-0,591	0,554	-0,336	0,563	-0,597	0,551
Pate	0,463	0,579	0,8	0,424	0,111	0,52	0,213	0,831	-0,036	0,587	-0,062	0,951
Laine	1,327	0,542	2,451	<b>0,014*</b>	-1,263	0,645	-1,959	0,05.	-2,23	0,903	-2,47	<b>0,014*</b>
Pince	0,754	0,584	1,291	0,197	-1,114	0,589	-1,89	0,059.	-0,385	0,563	-0,684	0,494
Piquets	-0,843	0,912	-0,924	0,355	-0,455	0,636	-0,715	0,474	-0,783	0,668	-1,172	0,241
Gaine	0,378	0,633	0,596	0,551	-10,9	34,947	-0,312	0,755	-9,697	19,262	-0,503	0,615
Hauteur Moyenne :	-0,016	0,014	-1,107	0,268	0,049	0,016	2,992	<b>0,003**</b>	0,075	0,019	4,05	<b>0***</b>
<b>Saint-Gobain</b>												
Ordonnée à l'origine	-3,676	1,659	-2,216	0,027*	-1,703	0	0	0	-5,556	1,625	-3,419	<b>0,001***</b>
Protection :												
Graisse1	0,721	1,242	0,58	0,562	-1,439	0	0	0	-0,686	0,745	-0,921	0,357
Graisse2	0,009	1,432	0,006	0,995	-1,553	0	0	0	-0,389	0,676	-0,575	0,565
Chaux	1,896	1,1	1,723	0,085.	0,02	0	0	0	0,551	0,641	0,861	0,389
Peinture	1,468	1,142	1,286	0,198	-0,275	0	0	0	-0,079	0,672	-0,118	0,906
Pate	1,478	1,151	1,284	0,199	-1,074	0	0	0	-0,609	0,709	-0,859	0,39
Laine	2,384	1,076	2,215	<b>0,027*</b>	-0,102	0	0	0	-0,585	0,803	-0,728	0,467
Pince	1,914	1,103	1,736	0,083.	-0,845	0	0	0	0,039	0,662	0,058	0,953
Piquets	1,136	1,173	0,969	0,333	-1,238	0	0	0	-0,716	0,773	-0,926	0,354
Gaine	0,047	1,457	0,032	0,974	-14,85	0	0	0	-8,874	19,143	-0,464	0,643
Hauteur Moyenne :	-0,006	0,035	-0,163	0,87	0,023	0	0	0	0,097	0,041	2,363	<b>0,018*</b>
<b>Sivry</b>												
Ordonnée à l'origine	-2,994	2,431	-1,232	0,218	11,299	15,085	0,749	0,454	-4,007	3,601	-1,113	0,266
Protection :												
Graisse1	0,391	0,657	0,595	0,552	-8,118	63,014	-0,129	0,897	-1,5	0,833	-1,801	0,072.
Graisse2	0,435	0,656	0,664	0,507	-8,812	72,136	-0,122	0,903	-0,897	0,763	-1,174	0,24
Chaux	1,024	0,623	1,643	0,1	0,796	1,351	0,589	0,556	-1,135	0,843	-1,347	0,178
Peinture	0,8	0,636	1,258	0,209	-0,474	1,934	-0,245	0,806	0,226	0,759	0,298	0,766
Pate	0,009	0,694	0,012	0,99	-8,218	47,994	-0,171	0,864	-0,766	0,747	-1,025	0,305
Laine	1,336	0,663	2,016	<b>0,044*</b>	-8,929	132,482	-0,067	0,946	-1,46	1,263	-1,156	0,247
Pince	0,851	0,637	1,335	0,182	-8,063	57,586	-0,14	0,889	-1,128	0,79	-1,428	0,153
Piquets	-1,83	1,139	-1,607	0,108	0,751	1,781	0,421	0,673	0,445	0,765	0,582	0,561
Gaine	-13,681	375,618	-0,036	0,971	-7,859	45,703	-0,172	0,863	-17,211	1231,36	-0,014	0,989
Hauteur Moyenne :	0,011	0,021	0,534	0,593	-0,132	0,137	-0,968	0,333	0,016	0,029	0,528	0,598

Annexe 2 : Diagrammes ombrothermiques des 14 sites du projet PICO, présentés selon l'année d'installation (2023 ou 2024). Les sites portant deux noms partagent les mêmes données météorologiques. Données issues de : <https://www.data.gouv.fr/datasets/donnees-climatologiques-de-base-mensuelles/>



Annexe 3 : Autocorrélation spatiale des résidus (indice de Moran's) selon la distance, pour les sites de : a ; Crecy, b ; Retz, c ; Ourscamp, d ; Saint Gobain. Les points rouges indiquent des valeurs significatives ( $p < 0,05$ ). La ligne horizontale en pointillés représente l'absence d'autocorrélation spatiale attendue





**ÉCOLE PRATIQUE DES HAUTES ÉTUDES - PSL**  
**SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE**

***Protection des plantations sylvicoles contre les cervidés : comparaison de dispositifs de protections individuels, abrutissement et mortalité des plants***

Florian VAST  
15/12/2025

**Résumé :**

L'augmentation des populations de cervidés, en particulier du chevreuil (*Capreolus capreolus*) et du cerf élaphhe (*Cervus elaphus*), constitue une menace majeure pour le renouvellement forestier en France. L'abrutissement et le frottis exercés par ces ongulés compromettent la survie, la croissance et la qualité morphologique des jeunes plants, fragilisant ainsi la capacité des forêts à se régénérer naturellement ou par plantation, dans un contexte où les surfaces à reboiser augmentent. Dans ce cadre, l'objectif de ce travail était d'évaluer l'efficacité technique de différents dispositifs de protection individuelle des jeunes plants contre les ongulés, afin d'identifier des solutions opérationnelles pour réduire les dommages et améliorer la survie des plants.

L'expérimentation a été conduite sur un réseau de quatorze sites de plantation, constituant une diversité de conditions pédoclimatiques et sylvicoles en France et en Belgique. Huit essences forestières, incluant feuillus et résineux, ont été étudiées. Dix modalités de protection ont été comparées, couvrant un large spectre de mécanismes d'action : Témoin non protégé, Graisse1, Graisse2, Chaux, Peinture, Pâte, Laine, Pince, Piquets, Gaine, représentant des barrières mécaniques, et des répulsifs olfactifs, gustatifs et visuels. Les dispositifs expérimentaux, organisés en blocs randomisés, ont fait l'objet d'un suivi d'un an avec deux campagnes d'observations. Les variables mesurées concernaient l'abrutissement terminal et latéral, le frottis, la mortalité et l'état des dispositifs.

Les résultats confirment partiellement les trois hypothèses, indiquant une efficacité globale des protections individuelles contre l'abrutissement et la mortalité. Les gaines se distinguent comme le dispositif le plus performant, avec une mortalité réduite à 6,2 % et une prévention totale de l'abrutissement terminal et latéral, alors que les témoins présentaient 14,8 % de mortalité et 19,1 % d'abrutissement terminal. Les piquets montrent également une efficacité notable (9,0 % de mortalité). En revanche, les répulsifs (graisse, peinture, pâte, chaux, laine) et les pinces présentent des effets plus variables, souvent sans différence significative avec les témoins. Enfin, une forte hétérogénéité entre les quatorze sites (2,9–63,6 % d'abrutissement total) met en évidence l'importance d'adapter les dispositifs aux conditions locales.

Aucune méthode de protection ne permet de supprimer totalement les dommages. Néanmoins, le recours à des protections individuelles adaptées aux conditions locales constitue un levier efficace pour améliorer le succès des plantations forestières dans un contexte de forte pression des cervidés. L'étude ouvre ainsi des perspectives opérationnelles pour les gestionnaires, tout en soulignant la nécessité d'approches intégrées combinant protection, régulation des populations d'ongulés et diversification des itinéraires sylvicoles, afin d'assurer la pérennité du renouvellement forestier face aux changements globaux.

**Mots clés :** Plantation, Cerf, Chevreuil, Abrutissement, Mortalité, Protections individuelles