UCLouvain

AGRO LOUVAIN BIOINGÉNIEURS

Faculté des bioingénieurs

Impact écologique de la culture de sapins de Noël en Ardenne belge

Etude de l'Azote Potentiellement Lessivable et de l'utilisation des produits phytosanitaires

Auteur : Destombes Cyril

Promoteur : Lambert Richard (SST/ELI/ELIE)

Lecteurs : Bertin Pierre(SST/ELI/ELIE)

De Toffoli Marc (SST/ELI/ELIE)

Année Académique : 2020 - 2021

Bioingénieur : sciences agronomiques

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier mon promoteur, Richard Lambert, pour l'accompagnement tout au long du processus de ce mémoire. Le sujet proposé m'a permis de comprendre une particularité de ma région natale à travers le prisme des connaissances acquises durant mes études de bioingénieur.

Merci également à Christine Leclerq et Antonio Ramirez, responsables du projet de gestion différenciée pour le PNHSFA, le GAL Ardenne Méridionale et Nov'ardenne de m'avoir présenter leur projet et aiguillés dans l'avancement de mon mémoire. Merci également pour la persévérance durant l'enquête auprès des producteurs. Un merci particulier à Antonio pour les conversations partagées durant les journées passées sur la route à visiter les parcelles.

Merci au personnel du Centre de Michamps, particulièrement à Raymond Blaise pour son efficacité et ses conseils durant les longues journées de prélèvements sur le terrain et à Bertrand Wavreille pour le suivi durant les manipulations au laboratoire ainsi que pour la disponibilité durant l'écriture de mon rapport.

Je remercie également Didier Ernould d'avoir pris de son temps pour me partager son expertise au sujet des sapins de Noël durant des longs entretiens téléphoniques.

Un immense merci à Axelle d'avoir partagé ma vie durant ces deux années particulières et de m'avoir soutenu et accompagné durant la rédaction de ce mémoire. Merci à Rom d'avoir pris du temps de ses vacances pour me relire et me conseiller et à Thib d'avoir pris du temps de son travail pour me dépanner en dernière minute. Enfin, merci à mes parents pour avoir relu l'entièreté de ce mémoire pour en vérifier l'orthographe mais surtout pour avoir cru en moi et m'avoir laissé trouver ma voie.

Table des matières

1 Introduction **1**

2 Synthèse Bibliographique **3**

2.1 La culture de sapin de Noël . . . 3
2.1.1 Impact écologique et image de la culture de sapin de Noël . . . 3
2.1.2 Approche économique . . . 4
2.1.3 Le sapin de Nordmann . . . 4
2.1.4 Le sapin de Noël "Véritable" . . . 5
2.1.5 Le sapin de Noël "Véritable et Écoresponsable" . . . 6
2.1.6 Itinéraire de culture . . . 6
2.2 La matière organique du sol . . . 9
2.3 Le cycle de l'azote . . . 10
2.3.1 La minéralisation . . . 10
2.3.2 Ammonification . . . 11
2.3.3 Nitrification . . . 11
2.3.4 L'inhibition biologique de la nitrification . . . 12
2.3.5 Immobilisation . . . 13
2.4 Pertes du cycle de l'azote . . . 13
2.4.1 Volatilisation de l'ammoniac . . . 13
2.4.2 Denitrification . . . 14
2.4.3 Lixiviation . . . 14
2.5 Cadre légal . . . 16
2.5.1 Directive Nitrate . . . 16
2.5.2 PGDA . . . 16
2.6 Azote Potentiellement Lessivable (APL) . . . 17
2.6.1 Facteurs influençant les résultats APL . . . 18
2.7 Gestion de l'azote en culture de sapins de Noël . . . 19
2.7.1 Croissance des sapins de Nordmann . . . 19
2.7.2 Absorption et dynamique de l'azote . . . 20
2.7.3 Fertilisation azotée . . . 21
2.8 Produits phytosanitaires . . . 23
2.8.1 Processus de dispersion des produits phytosanitaires . . . 23
2.8.2 Propriétés des produits phytosanitaires . . . 24
2.8.3 Mise au point sur le glyphosate . . . 26

3 Objectifs de l'étude **28**

4 Matériel et Méthode **29**
4.1 Contexte . . . 29
4.2 Présentation des sites d'étude . . . 29
4.3 Climat . . . 30
4.3.1 Variation du climat sur la zone d'étude . . . 30
4.3.2 Rétrospective climatique 2019 et 2020 . . . 31
4.4 Analyses de l'Azote Potentiellement Lessivable (APL) . . . 33
4.4.1 Méthode d'échantillonage et conservation . . . 33
4.4.2 Extraction des sols . . . 33
4.4.3 Mesure de la teneur en eau et de la charge caillouteuse . . . 34
4.4.4 Dosage des nitrates : colorimétrie à flux segmentés . . . 34
4.4.5 Comparaison avec les données APL dans d'autres cultures . . . 35
4.5 Enquête sur les produits phytosanitaires et les engrais appliqués . . . 36
4.5.1 Enquête . . . 36
4.5.2 Pondération . . . 37
4.6 Etude de la toxicité des différents herbicides utilisés . . . 38
4.7 Conseils de fertilisation . . . 39

5 Résultats **40**
5.1 Respect de l'anonymat . . . 40
5.2 Résultats Azote Potentiellement Lessivable . . . 40
5.2.1 Résultats généraux . . . 40
5.2.2 Lien entre la classe d'âge et le résultat APL . . . 42
5.2.3 Lien entre le pH et le résultat APL . . . 42
5.2.4 Étude des profils en fonction des différents horizons prélevés . . . 44
5.2.5 Lien entre le surplus de fertilisation et le résultat APL . . . 45
5.2.6 Comparaison des résultats APL avec les APL de référence du réseau SSA . . . 46
5.2.7 Comparaison des résultats APL avec d'autres cultures en Ardenne Belge . . . 47
5.3 Produits phytosanitaires . . . 48
5.3.1 Synthèse des matières actives utilisées . . . 48
5.3.2 Comparaison entre les quantités de matière active utilisées dans différentes filières wallonnes . . . 50
5.3.3 Étude de la toxicité des produits phytosanitaires utilisés . . . 51
5.4 Synthèse de la comparaison avec les principales cultures wallones . . . 52

6 Discussion **54**
6.1 APL . . . 54
6.1.1 Date d'échantillonage et différence entre 2019 et 2020 . . . 54
6.1.2 Variation de l'APL en fonction de la classe d'âge . . . 54

6.1.3 Importance de la lixiviation dans les jeunes parcelles 55
6.1.4 Impact des conseils de fertilisation 56
6.1.5 Comparaison avec les résultats APL en cultures traditionnelles en Wallonie 57
6.1.6 Limites des mesures APL 58
6.2 PPPs 58
6.2.1 Comparaison entre les producteurs 58
6.2.2 Comparaison avec d'autres cultures 59
6.2.3 Comparaison entre les différents phytosanitaires 60
6.2.4 Considérations sur les pépinières 61
6.3 Limite de l'étude 62
6.3.1 Limites des mesures APL 62
6.3.2 Critique de la méthodologie utilisée pour l'enquête 62

7 Conclusion **64**

Annexe A Tableau des résultats des analyses de sols **75**

Annexe B Exemple d'une feuille de conseil de fertilisation **78**

Table des figures

1 Variations mensuelles théoriques de la minéralisation de l'azote du sol. (Ballu et al., 2006) 8
2 Influence de la saison sur la vitesse de croissance de la partie aérienne et de la partie racinaire de la plupart des espèces de sapin de Noël aux Etats-Unis 20
3 Demande en nutriments en fonction de l'âge et de la taille des arbres. (Oregon State University, 2009) 22
4 Mobilité des pesticides dans l'environnement. 26
5 Répartition des parcelles suivies sur le territoire ardennais 29
6 Photo aérienne d'une jeune plantation de sapin de Noël 30
7 Moyenne et écart-type à la moyenne (en italique) des principaux indicateurs climatiques pour les deux zones bioclimatiques couverte par le projet(Van der Perre et al., 2015) 31
8 Cumul des précipitations durant la période de drainage à Libramont-Chevigny durant l'automne 2019 et 2020. Source : CRA-W/Agromet.be 32
9 Cumul des précipitations durant la période de drainage à Willerzie durant l'automne 2019 et 2020. Source : CRA-W/Agromet.be 32
10 Sonde pour le prélèvement des sols 34
11 Graphe de référence obtenu par extrapolation des résultats APL du réseau de ferme SSA pour la classe A2. Le graphe a été modifié pour montrer la méthode graphique utilisée pour interpoler les données. 36
12 Résultats APL des différentes parcelles échantillonnées en 2019 et 2020 . . 40
13 Répartion des résultats APL en fonction de la classe d'âge. Données de 2019 et 2020 43
14 Évolution des résultats APL de l'automne 2019 en fonction du pH 43
15 Comparaison des valeurs médianes de l'APL (kg $N-NO_3^-$/ha pour les différents horizons prélevés (0-30,30-60,60-90cm) en 2019 et 2020 44
16 Évolution des valeurs médianes de l'APL (kg $N-NO_3^-$/ha en fonction de l'horizon (0-30,30-60,60-90cm) pour les arbres âgées de deux ans et plus en 2019 45
17 Évolution des valeurs médianes de l'APL (kg $N-NO_3^-$/ha en fonction de l'horizon (0-30,30-60,60-90cm) pour les arbres âgées de moins de deux ans en 2019 45
18 Comparaison des médianes des résultats APL pour les différentes classes de cultures du réseau SSA et des sapins de Noël pour l'automne 2019 . . . 46
19 Comparaison des médianes des résultats APL pour les différentes classes de cultures du réseau SSA et des sapins de Noël pour l'automne 2020 . . . 47

20 Comparaison des résultats des analyses APL pour les principales cultures en Ardenne Belge pour l'année 2020 47
21 Répartition des matières actives utilisées comme herbicides 49
22 Photo aérienne d'une parcelle plantée en 2018 et désherbée avec 1,620 kg de glyphosate à l'hectare 49
23 Photo aérienne d'une parcelle plantée en 2017 et désherbée à l'aide de 45g/ha de flazasulfuron 49
24 Comparaison de la quantité de matière active (kg/ha) utilisée par type de culture en Wallonie (Comité régional PHYTO et CORDER asbl, 2020) 51
25 Étude de l'impact environnemental des principales cultures wallones et des sapins de Noël grâce aux indicateurs des matières actives appliquées (kg/ha) et des résultats APL (kg/ha). 52
26 Applications de produits phytosanitaires pondérées par la superficie totale cultivée 53

Liste des tableaux

1 Facteurs impactant la nitrification 12
2 Classes de culture pour l'établissement des références APL 19
3 Variabilité du reliquat azoté (en kg $N-NO_3^-$/ha) en culture de sapin de Noël dans la couche 0-90cm durant l'année 2019 et 2020 42
4 Moyenne de fertilisation azotée pour les différents producteurs suivis par le projet 45
5 Application de produits phytosanitaires par les différents producteurs en kg de matière active par hectare 48
6 Application d'insecticides par les producteurs 50
7 Comparaison de la toxicité des herbicides utilisés en culture de sapins de Noël 51

Liste des acronymes

APL Azote Potentiellement Lessivable

AOA Ammonia-Oxidizing Archaea

AOB Ammonia-Oxidizing Bacteria

CIRC Centre International de Recherche sur le Cancer

CRAAQ Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec

DJA Dose Journalière Admissible

DSE Dose Sans Effet

ELI Earth and Life Institute

GAL Groupe d'Action Locale

GRENeRA Groupe de Recherche Environnement et Ressources Azotées

NOB Nitrite-Oxidizing Archaea

NPK Azote Phosphore Potassium

PGDA Programme de Gestion de l'Azote

SAU Surface Agricole Utile

SPW Service Public Wallonie

ULg Université de Liège

1 Introduction

La culture de sapins de Noël fait partie des piliers de l'économie agricole de l'Ardenne belge. En effet, les sols agricoles sont peu enclins à accueillir des cultures classiques et les rendements obtenus sont faibles, à cause notamment de la pauvreté des sols et du climat. C'est pour cette raison que la surface agricole utile a progressivement évolué vers une augmentation de la superficie des prairies, de moins de 50% en 1950 à plus de 75% en 2011 (CPDT, 2014). Le moteur économique de cette transition a été la disparition des petites exploitations, poussée par la vision productiviste de la politique agricole européenne et la mécanisation (CPDT, 2014). Dans le même temps, la tradition de l'arbre de Noël, qui serait apparue début du XVIe siècle en Alsace, se popularise dans nos régions après la Première et la Seconde Guerre Mondiale (Ghislain, 2016 ; Ville de Saint-Hubert (correspondance sortante), 2015). Malgré le fait que la tradition soit amenée par les allemands, elle sera perpétuée car attribuée aux alliés. A la fin des années 90 et au début des années 2000, la superficie cultivée va tripler grâce à l'exportation croissante. Aujourd'hui, la qualité des sapins wallons est reconnue dans toute l'Europe.

Les années 50 marquent également le début de ce que l'historien Donald Worster nomme "l'âge écologique". Pour la première fois, la contamination irréversible de l'atmosphère par l'explosion de la première bombe atomique fait planer la menace d'une catastrophe écologique mondiale (Matagne, 2003). L'écologie et son équivalent agricole l'agroécologie, vont se développer en tant que courant de pensée et en tant que sciences. Elles vont progressivement mettre le doigt sur les problèmes du modèle économique basé sur une croissance infinie dans un monde aux ressources finies. En effet, l'utilisation excessive d'engrais et de pesticides sont des piliers de l'intensification agricole de ces dernières décennies et le résultat de cette utilisation massive sur les écosystèmes et les espèces non-ciblées sont de mieux en mieux compris (Silva et al., 2019). Le débat est progressivement entré dans le domaine du public et touche depuis une dizaine d'années une plus grande partie de la population, particulièrement chez les jeunes (Kovacs, 2012).

C'est dans ce contexte que la culture de sapins de Noël wallonne, développée sur le modèle de l'agriculture conventionnelle pour devenir une des plus compétitive du marché européen, a progressivement été décriée par les habitants de la région, soucieux de l'augmentation rapide de la superficie cultivée et de l'impact sur les écosystèmes. Pourtant, il semble que cet élan de bonne volonté écologique ne soit pas basé sur des faits scientifiques mais sur une série de croyances populaires. En effet, il n'existe pas, ou très peu, de sources sur l'impact écologique de la culture de sapins de Noël en Ardenne belge. Il semble en effet qu'elle est principalement basée sur les principes du savoir paysan et de la tradition familiale et qu'elle échappe à un recensement et un accompagnement institutionnel et scientifique à la hauteur de son impact économique. Ce manque de contrôle contribue

probablement à la mauvaise réputation de la culture, principalement d'un point de vue foncier.

A travers cette étude, nous espérons offrir un état des lieux concernant l'impact écologique de la culture de sapins de Noël, basé sur une étude des pratiques et de la lixiviation du nitrate. Le but est également de situer la culture par rapport à d'autres productions agricoles wallonnes et ardennaises afin de déterminer sa participation relative à la pollution et à la dégradation des écosystèmes. Nous tâcherons également d'étudier les différences de pratiques entre producteurs. Enfin, nous discuterons des raisons qui entraînent ces divergences et tâcherons de déterminer certains leviers permettant de les atténuer dans une optique de protection des écosystèmes.

2 Synthèse Bibliographique

2.1. La culture de sapin de Noël

2.1.1. Impact écologique et image de la culture de sapin de Noël

La culture de sapin de Noël a été largement décriée ces dernières années (Inter-Environnement Wallonie et al., 2016 ; Marcy et al., 2018) pour son impact sur l'environnement et la biodiversité. Les critiques souvent formulées le sont envers la destruction de prairies de grande qualité biologique. Cette destruction ainsi que l'utilisation excessive de produits phytosanitaires seraient une menace pour la biodiversité. Pourtant, les conclusions d'un rapport sur les populations d'oiseaux indique qu'en milieu de culture de prairie intensive avec un faible ratio de haies (>70m/ha), les cultures de sapins de Noël augmentent la densité et la diversité des populations d'oiseaux en recréant de l'homogénéité structurelle(Gailly et al., 2017). Des résultats similaires ont été obtenus en Allemagne (Fartmann et al., 2018). Ces résultats sont à nuancer car la qualité de l'habitat n'a pas été étudiée et cela pourrait être un point particulièrement sensible pour la reproduction de ces oiseaux. Il se pourrait que l'utilisation de produits phytosanitaires aie un impact sur les sources de nourriture et que les parents soient contraints de s'éloigner des parcelles de sapins de Noël pour nourrir leur descendance.

Ces dix dernières années ont aussi vu le développement du secteur des sapins artificiels, prétendument plus écologiques, pour faire concurrence au sapin de Noël traditionnel. Les opinions sont divisées sur le sujet et le fiasco du sapin de Noël de la Grand Place de Bruxelles en 2012 a grandement relancé les débats en Belgique. Au Canada et aux USA, des Analyses du Cycle de Vie (ACV), commandées par les associations de producteurs locaux ont été réalisées par des organismes indépendants afin de déterminer quelle est l'alternative la plus écologique entre ces deux solutions. Les deux études révèlent des résultats en faveur du sapin traditionnel. La première (Couillard et al., 2009) révèle qu'un arbre traditionnel émet l'équivalent de 3,1 kg/an de CO_2 sur l'entièreté de son cycle de vie alors qu'un artificiel en émet 8,1. Ces chiffres sont dans les deux cas relativement négligeables puisqu'ils correspondent respectivement à un trajet en voiture de 125 et 325km en voiture. La deuxième étude (PE Americas, 2010) révèle des résultats similaires en nuançant l'impact du sapin traditionnel. Il se comporte soit comme une source ou comme un puits de carbone selon qu'il soit brûlé ou enfoui à la fin de son cycle de vie. En Ardenne, ils sont traditionnellement brûlés au grand air dans les traditionnels "Grands Feux" et donc on ne peut considérer les kg de CO_2 fixés comme un argument valable. Dans tous les cas, un sapin artificiel doit être réutilisé un certain nombre d'années variant en fonction des études et des scénarios envisagés pour rattraper sa dette environnementale

par rapport au sapin traditionnel. De plus, les deux études rappellent qu'aucun des deux types de sapins ne constitue un impact significatif sur l'environnement comparé aux modes de vie occidentaux.

2.1.2. Approche économique

D'un point de vue économique, la culture de sapin de Noël possède une importance capitale pour le secteur horticole wallon. La surface cultivée est de 3175 hectares selon une étude cartographique (Lejeune, 2018) réalisée par l'ULg Gembloux AgroBioTech soit 0.43% de la Surface Agricole Utile (SAU) wallonne. L'essentiel de cette surface est cultivée dans le sud du pays, principalement en province de Luxembourg (58%), de Namur (27%) et dans une plus faible mesure sur les Hauts Plateaux liégeois. Elle prend une place considérable dans certaines communes de la province du Luxembourg mais ne dépasse pas les 10% de la SAU de ces communes(UAP, 2020).

Le chiffre d'affaires généré par la culture de sapin de Noël est estimé à 50 millions d'euros par an, plus au moins 10% selon la conjecture. 80% des sapins cultivés sont exportés ce qui fait de la Belgique le troisième pays exportateur européen après l'Allemagne et le Danemark (Bosseler et al., 2017). Le secteur offre 500 jobs directs et 500 jobs indirects (transporteurs, spécialistes de la mécanique, saisonniers,etc.), soit un emploi tous les trois hectares.

2.1.3. Le sapin de Nordmann

La variété principalement cultivée est le sapin de Nordmann (*Abies nordmanniana*) représentant 80% de la surface cultivée en Wallonie. Les autres espèces cultivées sont 10% d'épicéa commun (*Picea Abies*), 5% de sapin de Fraser (*Abies Fraseri* et 5 % d'autres variétés. Étant donné la superficie importante cultivée et du fait que la totalité des parcelles suivies dans cette étude est cultivée en sapin de Nordmann, nous considérerons uniquement cette variété pour la suite de ce mémoire.

Le sapin de Nordmann est originaire du Caucase occidental et de la chaîne Pontique (Nord-Est de la Turquie), il pousse à une altitude de 400 à 1200m. Dans cette région du monde, la température moyenne est de 7,5°C à 10,5°C et les précipitations comprises entre 600 et 1500 mm/an(Leurquin, 2009). L'arbre est très résistant au froid et aux gelées printanières ce qui explique son adaptation au climat frais ardennais. D'autres conditions le rendent particulièrement adapté à cette région : les précipitations suffisantes toute l'année, un sol acide et pauvre qui permet de ralentir la croissance et de garder un aspect compact et bien fourni de l'arbre. Le système racinaire du genre *Abies* est pivotant, ce qui l'empêche d'être cultivé en motte, contrairement au genre *Picea*(UAP, 2018a). Ces dernières années, les étés secs ont impactés le développement de jeunes arbres (UAP, 2020), mais le Nordmann reste plus résistant à la sécheresse que tous les autres arbres de Noël (George et al., 2015) grâce à sa capacité à réguler sa transpiration très tôt.

(ACRVF et al., p. d.)

Outre ses qualités concernant la résistance au climat, il est particulièrement adapté à la culture de sapins de Noël puisqu'il a tendance à conserver ses aiguilles plus longtemps que d'autres espèces de conifères une fois coupé. D'un autre côté, il est souvent plus cher qu'un épicéa puisque sa croissance est plus lente. La culture de sapin de Noël a un cycle relativement long, qui varie selon la hauteur que l'on désire obtenir (de 80cm à 3m). La récolte a principalement lieu pour des sapins ayant une taille de 1m à 1m75. Les sapins sont sélectionnés dans les parcelles pour être coupés ou gardés une saison en plus en parcelle.

2.1.4. Le sapin de Noël "Véritable"

Dans une optique de contrôle de la qualité et afin de mieux positionner le sapin de Noël wallon sur le marché de l'exportation, l'UAP a créé un label certifiant la qualité de leur production. Les normes dictant la marque *Véritable* (UAP, 2018b) sont en accord avec celles élaborées, en 1996, par la Fédération des Producteurs de Sapins de Noël d'Europe Occidentale. Les normes concernent les mesures, les différentes qualités ainsi que les conditions de récolte des sapins de Noël. Il existe trois niveaux de qualité : le premier choix, le choix standard et le deuxième choix. Les critères de différentiation entre les différentes qualités sont la couleur, la forme, la densité, le tronc, la flèche, la symétrie et les imperfections.

Pour un sapin premier choix, la couleur doit être homogène, la largeur ne doit pas dépasser la longueur et être plus de 2 fois inférieure à celle-ci. Les couronnes de branches et entre-noeuds doivent être correctement répartis, avec un certain nombre de verticilles en fonction de la hauteur totale. L'arbre doit avoir un seul tronc au centre, une flèche de longueur raisonnable, être symétrique et avoir des branches réparties tout autour du tronc. Le contrôle des imperfections concerne l'état général du lot, avec au maximum 5% des arbres possédant une branche cassée, du lichen, de la mousse ou l'écorce endommagée, des aiguilles peu développées ou des dégâts mineurs causés par des animaux. Un arbre de choix standard peut avoir deux défauts mais doit respecter toutes les autres caractéristiques précédentes. Un arbre de second choix est un arbre vendable d'une qualité moindre mais qui satisfait aux critères de l'acheteur. Ils doivent tout de même respecter des critères sanitaires et de fraîcheur mais les critères d'aspect visuel sont assouplis. Tout arbre ayant au moins deux défauts de la liste ci-avant basculera dans cette catégorie. Il est évident que le prix varie en fonction de la qualité et donc que le producteur va tout mettre en place pour avoir un maximum d'arbres de premier choix. Ceci va influencer fortement les pratiques culturales effectuées durant la croissance des arbres et le niveau d'attention porté à ces différentes pratiques.

2.1.5. Le sapin de Noël "Véritable et Écoresponsable"

Afin de proposer une gamme de sapin plus respectueuse de l'environnement, les producteurs de l'UAP ont décidé de créer une charte écoresponsable. Cette charte s'inscrit dans la continuité de la marque "Véritable" et doit être signée par les producteurs s'engageant à mettre en place certaines actions dans l'optique de protéger l'environnement pour l'ensemble de leurs parcelles de culture de sapins de Noël. Les démarches à entreprendre afin de respecter cette charte sont les suivantes :

1. Pas d'utilisation de pesticides durant les deux dernières années d'exploitation de la culture.
2. Pas de prélèvement de mottes de terres pour la commercialisation pour stopper l'exportation de la terre.
3. Mise en place d'un registre agréé par l'UAP afin de tenir un historique complet des intrants phytosanitaires pendant toute la durée de culture.
4. Mettre en place des analyses d'échantillons de sols en année de plantation et durant l'année 5 afin d'appliquer une fertilisation et un amendement raisonné en relation directe avec les besoins des arbres.
5. Vérifier la vitesse des vents grâce à un anémomètre avant les pulvérisations de phytosanitaires et ne pas pulvériser si la vitesse est supérieure à 20 km/h pour limiter les dérives de pulvérisation.
6. Supprimer les plantations en zone d'habitat ou augmenter la zone tampon à 20m supplémentaire derrière la zone d'habitat au moment de la plantation suivante.
7. Planter sur base des normes de la culture biologique pour replanter directement derrière la zone d'habitat sans zone tampon.
8. Point optionnel : utiliser des chevaux de traits pour le nettoyage mécanique des parcelles pour réaliser le fauchage mécanique remplaçant les herbicides durant les deux dernières années de culture.

2.1.6. Itinéraire de culture

Les arbres sont d'abord cultivés en pépinière entre trois et cinq ans. Ils sont ensuite achetés par les producteurs puis plantés à équidistance au printemps, à une densité proche de 10 000 arbres/ha. Ils peuvent être plantés soit dans une parcelle utilisée comme prairie permanente, soit dans une ancienne parcelle de sapins de Noël. Dans le premier cas, la prairie permanente est généralement détruite par l'application d'un herbicide et puis broyée et les arbres sont installés à l'aide d'une planteuse. Dans le second, une culture de céréales ou de maïs est parfois mise en place en collaboration avec un agriculteur local entre les deux rotations. Il peut arriver que les terres soient chaulées si les conditions de pH sont vraiment trop acides. La culture de sapins de Noël est une culture semi-intensive. L'itinéraire cultural entraîne donc une série de soins à prodiguer à la culture tout au long

de son développement. Les principales opérations sont le désherbage et la fertilisation [1]. D'une manière générale, les terres sont fertilisées avec un engrais NPK au printemps. Dans certains cas, un oxyde de magnésium et/ou un engrais soufré est ajouté au même moment. Lorsque la parcelle est dans sa phase d'exploitation, c'est-à-dire suffisamment vieille pour qu'une proportion d'arbres soit récoltée, un engrais azoté de type ammonitrate est parfois appliqué en été. Le but de cette application est d'éviter toute chlorose au niveau des aiguilles et donc d'avoir des sapins bien verts avec des aiguilles bien portantes lors de la vente.

Les parcelles sont également désherbées chimiquement pour éviter la compétition pour les ressources avec les adventices, pour permettre un bon développement des branches inférieures et éviter qu'elles ne soient salies par des adventices au port haut. Comme mentionné plus haut, la culture de sapin de Noël est une culture ornementale pour laquelle l'aspect visuel prime lors de la vente, il est donc important que celui-ci soit soigné tout au long de la culture. Cela permet aussi une certaine protection contre des potentiels pathogènes transmis par les adventices. Dans l'optique d'avoir un maximum d'arbres de premier choix, une croissance trop rapide de la pousse terminale n'est pas désirée par les producteurs de sapins de Noël. Il existe donc différentes techniques de taille afin de réguler la croissance de celle-ci et d'assurer une bonne répartition des verticilles. D'autre part, des ralentisseurs de croissance chimiques sont parfois utilisés de manière localisée, afin de contrôler cette croissance. Enfin, l'émondage basal (coupe de la première couronne du sol) permet de limiter le développement de la base de l'arbre et donc la prolifération de maladies par le sol et de faciliter l'exploitation des sapins.

Les sapins sont susceptibles d'être endommagés par la faune locale. Insectes, gibiers, oiseaux et mulots sont des menaces pour la culture. Pour lutter contre ces désagréments, une série de solutions sont mises en place. Tout d'abord, des perchoirs sont installés à la tête des arbres dominants pour protéger la pousse terminale durant la saison du débourrement, en mai et juin. En effet, elle est très fragile à cette période et le moindre oiseau risquerait de l'endommager en se posant dessus, peu importe sa taille. Ensuite, il arrive que des clôtures soient placées autour des parcelles afin de les protéger du gibier, qui se nourrit des bourgeons en début de saison. Ces clôtures font partie des leviers permettant d'implémenter une gestion différenciée par des moutons de la race Shropshire. Selon les conditions météorologiques, il arrive que des insectes ou des champignons attaquent la culture. Des insecticides et des fongicides sont donc appliqués de manière non-systématique afin de protéger les sapins.

Début août, lorsque la majorité des arbres ont fini leur croissance annuelle, l'étiquetage

1. Les pratiques des producteurs et leurs effets sont encore peu connus, les étudier est un des objectifs de ce mémoire. Ce paragraphe fera état des principales opérations réalisées. Il faut garder à l'esprit que celles-ci dépendent fortement du producteur, de l'âge des sapins et des conditions environnementales. Ceci sera analysé plus en détails dans la suite de ce travail.

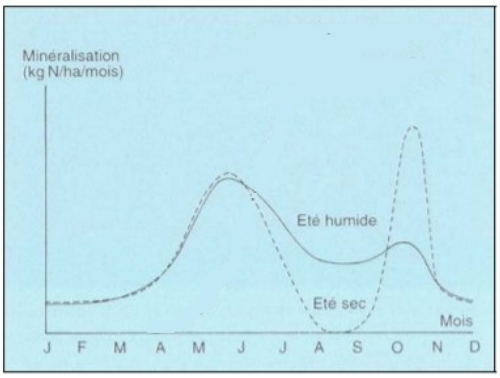


Figure 1 – Variations mensuelles théoriques de la minéralisation de l'azote du sol. (Ballu et al., 2006)

de ceux qui seront exploités durant l'année commence. Chaque sapin est sélectionné et trié selon des critères de taille et de qualité pour satisfaire les besoins des clients. La récolte commence aux alentours de début novembre. Les sapins sont tronçonnés à ras de terre. Un plan de coupe est établi afin de garantir la fraîcheur des arbres livrés en fonction des impératifs de livraison. Ensuite, on conditionne tous les arbres en filet afin de gagner de la place et d'éviter que des branches ne cassent.

2.1.6.1 Gestion différenciée

Le paragraphe précédent fait un état des lieux de la culture conventionnelle telle qu'elle a lieu dans la majorité des parcelles cultivées en Wallonie. Cependant, il existe des solutions alternatives à l'utilisation des produits chimiques décrits précédemment. D'une part, à Anhée, il existe un producteur sous label BIO. Les différentes techniques mises en place pour respecter ces normes et remplacer les produits phytosanitaires sont : la plantation sur un couvert de trèfles blancs limité avec un désherbage mécanique, le pinçage manuel pour limiter la croissance et l'implantation de bandes fleuries pour le développement des auxiliaires. D'autre part, un projet de gestion différenciée est en place depuis 2019 en Ardenne . Le projet rassemble 3 Groupes d'Action Locale (GAL) voisins, le GAL Ardenne Méridionale, le GAL Haute-Sûre Forêt d'Anlier et le GAL Nov'Ardenne(Leclerq et Ramirez, 2019). Le but est de travailler en collaboration avec les producteurs de sapins de Noël de l'UAP afin de tester certaines pratiques de gestion différenciée. Les techniques étudiées sont semblables à celles utilisées en culture biologique. Les objectifs principaux sont la mise en place de couverts végétaux désherbés mécaniquement ou la plantation de parcelles en prairie et le pâturage par des moutons Shropshire afin de diminuer l'utilisation d'herbicides. L'implémentation de couverts végétaux comme le plantain lancéolé

permet une gestion alternative du couvert. On choisit un couvert au port moyen à bas pour ne pas qu'il ne gène trop la culture de sapins. Ensuite, il est fauché deux fois par an avec un outillage spécifique afin de diminuer sa croissance et de l'empêcher d'exercer une compétition trop importante pour les nutriments, l'eau et la lumière. Le pâturage par les moutons est implémenté dans des parcelles qui étaient déjà clôturées pour protéger les sapins du gibier, ce qui en facilite l'installation. La race de mouton Shropshire est connue pour ne pas s'attaquer aux arbres (Kohl et Rutzen, 2008). Ces techniques ne sont pas nouvelles, le pâturage par des moutons est utilisé dans d'autres pays producteurs et nous avons vu précédemment que les couverts sont déjà utilisés en Belgique. Néanmoins, le projet est innovant puisqu'il a pour objectif de mesurer l'impact de ces techniques sur la croissance et la qualité des sapins et d'en évaluer le coût de production et ainsi son impact économique. Dans ce cadre, il cherche à entraîner un maximum de producteurs wallons et à démocratiser ces méthodes.

Le projet prévoit également la réalisation de prélèvements de sol pour étudier les caractéristiques physico-chimiques et les reliquats azotés en fin de saison. C'est dans ce cadre qu'une collaboration a lieu entre ce mémoire et le projet de gestion différenciée. Un dernier objectif est de favoriser la lutte intégrée contre les ravageurs à travers la mise en place de haies et de perchoirs favorisant la présence de prédateurs des ravageurs (oiseaux et syrphes) et via des suivis de la biodiversité sur les parcelles de sapins de Noël.

2.2. La matière organique du sol

Certaines caractéristiques du sol jouent un rôle plus au moins important dans la minéralisation et la lixiviation de l'azote ainsi que des produits phytosanitaires.

La quantité de matière organique d'un sol affecte directement sa capacité à remplir différentes fonctions, qu'elles soient agricoles, sylvicoles ou environnementales (van Wesmael et Brahy, 2017). En effet, celle-ci influence sa capacité à retenir l'eau, relâcher des gaz à effet de serre, résister à la dégradation et à cultiver dans un cadre durable (Rees et al., 2000). Elle influence aussi la fourniture, l'immobilisation et la transformation des nutriments du sols, et donc de l'azote, ainsi que la capacité du sol à modifier et dégrader les pesticides (van Wesmael et Brahy, 2017).

Le contenu en matière organique du sol est variable en fonction du climat, de l'occupation et du type de sol. En Wallonie, les teneurs en matière organique des sols agricoles suivent globalement un gradient croissant du nord-ouest au sud-est. D'une part, l'activité biologique est ralentie par le climat plus froid et plus humide de l'Ardenne, ce qui entraîne une décomposition et une minéralisation plus faible et donc une accumulation de la matière organique. D'autre part, les sols sous prairie, occupant 84% de la S.A.U. ardennaise présentent des teneurs plus élevée que les sols sous cultures (SPW et al., 2017).

La matière organique du sol est en lien étroit avec la fourniture de la plante en éléments minéraux. Elle intervient donc dans la dynamique du cycle de l'azote. Une étude de l'Université de Liège (Christophe Vandenberghe et Gilles Colinet, 2017) a démontré

qu'il existait une relation entre le taux de carbone total du sol et les résultats APL. Pour trois classes de cultures A2, A6 et A7 (voir tableau 2,page 19) , la teneur en carbone organique totale est directement corrélée au résultat APL. D'un autre côté,Geypens et al., 2005 ont démontré que seuls 38% des sols avec un contenu en carbone organique élevé avaient des résultats APL en dessous de 90 kg/ha contre 78% des sols à faible taux de carbone organique. La matière organique permet également de diminuer la mobilité et d'améliorer la dégradation des produits phytopharmaceutiques utilisés pour la protection des cultures. Une étude (Dousset et al., 2004) sur la mobilité du glyphosate et l'hexazinone en culture de sapin de Noël dans le Morvan montre que les sols ayant des contenus en matière organique plus faibles augmentent la mobilité des pesticides.

2.3. Le cycle de l'azote

L'azote est un macro-élément essentiel pour les plantes. On le retrouve dans les acides nucléiques, les protéines, les cofacteurs, l'ATP, et certains pigments. C'est un des éléments les plus abondants sur terre. Cependant, la majorité de cet azote se trouve sous forme de diazote gazeux. Cette forme est non-réactive. Elle doit être fixée par des micro-organismes spécialisés ou convertie par des réactions chimiques pour entrer dans le cycle de la vie (Schipper et Sparling, 2010). Ces processus sont essentiels afin de permettre à tout végétal de capter l'azote, ce prochain chapitre permettra de les détailler. Avec la révolution verte et l'utilisation des engrais chimiques, l'humain a eu la plus grande influence sur le cycle de l'azote en introduisant des quantités sans précédent d'azote réactif dans les écosystèmes (Subbarao et al., 2012). Le sol est le troisième plus grand réservoir d'azote de notre planète (Addiscott, 2004). Afin de comprendre les tenants et les aboutissants de la fertilisation azotée, une approche globale du cycle de l'azote et de ses impacts est nécessaire.

2.3.1. La minéralisation

La minéralisation est la transformation de l'azote organique en azote minéral. Elle est due au travail de recyclage des matières organiques par les micro-organismes du sol. En effet, lorsqu'une plante ou un micro-organisme se décompose, le carbone, l'azote ainsi que le soufre qu'ils contiennent sont encapsulés dans des protéines et d'autres macromolécules. Cela les rend inaccessibles à l'utilisation de la génération de plantes suivantes. La population du sol permet de recycler ces ressources afin de les rendre accessibles. Pour l'azote, elle comporte 2 étapes : l'ammonification et la nitrification.

La minéralisation d'azote est une source de nitrate importante mais très variable d'une situation à l'autre. Elle varie selon les caractéristiques du sol en question : pH et matière organique. De plus, elle varie en fonction des conditions climatiques, la température et l'humidité. Les pics de production d'azote par minéralisation apparaissent généralement au milieu du printemps et en automne. On peut l'observer sur la figure 1, page 8. Cette

figure ne correspond pas directement au climat ardennais, dans ce contexte, la minéralisation hivernale est quasiment nulle car la température est plus faible. Cependant, l'allure générale du graphique est transposable à la région d'étude. On observe clairement l'impact du climat sur les pics de minéralisation. Un été sec va entraîner un pic de minéralisation important en automne au moment où l'arbre commence à entrer en phase dormante et à ralentir l'absorption d'azote. C'est particulièrement pertinent dans le contexte des sécheresses estivales auxquelles nous avons fait face au cours des deux années d'étude.

2.3.2. Ammonification

L'ammonification est la décomposition des composés organiques contenant de l'azote, principalement des protéines et des acides nucléiques, en ammonium. Elle peut être réalisée par différentes bactéries et champignons et est influencée par l'humidité et la température.

$$\mathrm{Norg} \longrightarrow {NH_4}^+ + {OH}^-$$

2.3.3. Nitrification

La nitrification est la réaction d'oxydation du ${NH_4}^+$ en ${NO_3}^-$.C'est une voie de transformation essentielle dans le cycle de l'azote dans une majorité des écosystèmes terrestres. Elle régule le niveau des différents types d'azote sous forme minérale et joue donc un rôle capital pour la nutrition des plantes, le ruissellement du nitrate et l'émission du gaz à effet de serre N_2O. La nitrification est réalisée par deux groupes de bactéries chemo-lithotrophes, les bactéries oxydantes de l'ammoniaque (Ammonia-Oxidizing Bacteria (AOB)), principalement de type *Nitrosomas* et *Nitrobacter*. D'un autre côté, les archées oxydantes de l'ammoniaque (Ammonia-Oxidizing Archaea (AOA)) sont présentes dans une majorité des sols mais leur contribution relative à la nitrification n'est pas encore certaine. Récemment, cette vision de la nitrification a évolué puisque des chercheurs ont pu détecter des bactéries capables de réaliser l'ensemble du processus de nitrification appelées "comammox" pour complete ammonia oxidiser. (Daims et al., 2015) La première étape de la nitrification est l'oxydation de l'ammonium en nitrite.

$$2\,{NH_4}^+ + 3\,O_2 \longrightarrow 2\,{NO_2}^- + 4\,{H}^+ + \mathrm{energy}$$

Cette oxydation est principalement accomplie par les bactéries *Nitrosomas spp.* et *Nitrospira spp.* La deuxième étape est l'oxydation du nitrite en nitrate dont la famille des *Nitrobacter* est généralement responsable, on les appelle également les bactéries oxydantes du nitrite ou nitrite-oxydizing bacteria (NOB) :

$$2\,{NO_2}^- + O_2 \longrightarrow 2\,NO_3 + \mathrm{energy}$$

Le nitrite ne s'accumule pas dans le sol en conditions aérobies tandis que le nitrate a tendance à s'accumuler pour être ensuite utilisé par la plante, lessivé ou transformé en N_2O. La nitrification est affectée par différents facteurs (voir tableau 1 : le substrat nutritif, le

Tableau 1 – Facteurs impactant la nitrification

Facteur	Condition optimale	Cause
Substrat nutritif	Présence NH_4^+	Réactif de la réaction d'oxydation
pH	$6.6 < pH < 8.8$	Bactéries nitrifiantes sensibles à l'acidité
Aération	Présence O_2	Bactéries aérobies strictes
Humidité	$1 < pF < 2$	Excès d'H_2O = absence d'O_2
Température	$30 < T < 35$	Nitrification de 5°C à 40°C

pH du sol, l'aération, l'humidité ainsi que la température. Les conditions idéales pour la nitrification étant les conditions de vie idéales pour les bactéries responsables de celle-ci. La disponibilité en NH_4^+ est un facteur essentiel pour permettre l'assimilation par les organismes nitrifiants. La quantité d'ammonium disponible dépend de la minéralisation et de l'équilibre entre l'assimilation microbienne et racinaire. Il existe parfois une compétition pour cette ressource qui entraîne la plante à excréter des substances qui peuvent inhiber la nitrification (Laffite et al., 2020). Le pH est un facteur critique influençant la nitrification. En effet, selon l'acidité, les différentes communautés de micro-organismes, archées ou bactéries, vont être plus au moins adaptées au milieu et la nitrification sera majoritairement assurée par l'une ou par l'autre. En pratique, la vitesse de nitrification diminue rapidement pour des pH inférieurs à 6 car les bactéries nitrifiantes ne sont pas adaptées à l'acidité. Elle devient négligeable en-dessous de pH 4,5.

2.3.3.1 Régulation de la nitrification

La régulation de la nitrification est une piste qui est explorée depuis quelques années pour mieux contrôler l'apport d'engrais azotés. L'inhibition d'une nitrification trop importante pourrait avoir plusieurs avantages (Subbarao et al., 2012). Tout d'abord, le NH_4^+ est un cation, il est donc retenu de manière électrostatique par les particules d'argiles et de matière organique, ce qui limite son lessivage. De plus, l'assimilation de NO_3^- demande quatre fois plus d'énergie à la plante que l'assimilation de NH_4^+ (20 ATP par mole de NO_3^- contre 5 ATP par mole de NH_4^+). D'un autre côté, le NH_4^+ peut-être perdu par volatilisation, ce qui peut contrebalancer les effets positifs d'une inhibition de la nitrification.

2.3.4. L'inhibition biologique de la nitrification

Dans la majorité des écosystèmes, la disponibilité de l'azote et le rapport entre l'azote sous forme NH_4^+et NO_3^-sont les facteurs limitants de la croissance de la plante. Certaines plantes, dont fait partie le sapin de Nordmann, assimilent préférentiellement l'azote sous forme de NH_4^+. Il existe une compétition entre la plante et les micro-organismes nitrifiants envers cette ressource. (Kuzyakov et Xu, 2013) Il est donc logique que certaines plantes soient pourvues de mécanismes capables d'inhiber la nitrification, soit en modifiant les conditions environnementales qui affectent les organismes nitrifiants, soit en inhibant

directement les organismes nitrifiants. En effet, la littérature démontre que les plantes peuvent avoir des effets sur la disponibilité en substrat NH_4^+ et NO_3^-, la disponibilité en carbone organique, le pH, l'humidité du sol et les conditions aérobies du sol (Laffite et al., 2020).

Dans une étude publiée dans la revue *Environmental Microbiology*(Laffite et al., 2020),il a été démontré que le sapin de Nordmann, parmi d'autres espèces forestières, est capable d'inhiber directement les organismes nitrifiants, grâce à des composants spécifiques libérés par les racines. En effet, ils ont pu démontrer que la croissance d'une souche de NOB *Nitrobacter hamburgensis* a été inhibée par des exsudats racinaires produits par le sapin de Nordmann. Cette inhibition entraîne, sur des peuplements âgés de 28 ans une nitrification nette étant de 10 jusqu'à 1000 fois inférieure par rapport à des arbres ne possédant pas de capacité d'inhibition biologique. L'inhibition a lieu sur des NOB, par conséquent sur la deuxième étape de la nitrification, l'oxydation du nitrite. Il pourrait être attendu que le nitrite s'accumule lors du processus. Cependant, étant toxique pour la majorité des êtres vivants, il existe d'autres mécanismes en place que la nitrification pour se débarrasser des nitrites ce qui explique que celui-ci ne s'accumule pas dans le sol. Enfin, l'étude démontre aussi que le temps de mise en place d'un tel mécanisme, dépend de la colonisation du sol par les racines, ce qui pourrait induire des différences entre l'âge des peuplements de Nordmann et l'inhibition résultante et donc les reliquats azotés.

2.3.5. Immobilisation

Le phénomène opposé à la minéralisation est l'immobilisation. C'est la consommation des formes minérales d'azote par les organismes du sol pour les convertir en azote organique à travers la formation de biomasse. Les deux phénomènes peuvent se dérouler en même temps chez les mêmes organismes ou des organismes différents. La minéralisation nette est le résultat de la différence entre les deux processus, elle peut donc être négative si l'immobilisation prédomine. Le rapport C :N est un bon indicateur pour savoir si la minéralisation ou l'immobilisation prédomine dans un sol (Addiscott, 2004).

2.4. Pertes du cycle de l'azote

2.4.1. Volatilisation de l'ammoniac

La volatilisation est la perte de la forme soluble NH_4^+, adsorbé sur le complexe argilo-humique dans l'atmosphère sous forme d'ammoniac gazeux, NH_3. C'est un processus physico-chimique naturel mais amplifié à cause de l'épandage d'engrais organiques et minéraux sur les cultures. La majorité de la volatilisation à lieu de deux à sept jours après l'application d'engrais minéraux azotés. La réaction d'équilibre entre les ions ammonium et le gas ammoniac est la suivante :

$$NH_4^+ + OH^- \rightleftharpoons H_2O + NH_3\uparrow$$

On observe que la volatilisation sera plus importante lorsque le pH est élevé, puisque les ions OH^- déplacent la réaction vers la droite (Weil et Brady, 2017).

La volatilisation de l'ammoniac est une perte d'azote qui peut-être importante lors de l'application d'engrais riches en ammonium. Cette perte a des conséquences économiques et environnementales. En effet, c'est une perte directe d'azote et donc soit le producteur doit augmenter sa fertilisation, soit la croissance des arbres risque d'être diminuée. D'un point de vue environnemental, l'émission d'ammoniac dans l'atmosphère peut avoir des conséquences importantes sur l'acidification des écosystèmes et l'eutrophisation. L'intensité de celle-ci dépend de facteurs environnementaux. Par conséquent, les leviers d'actions pour diminuer la volatilisation ammoniacale dépendent d'une série de bonnes pratiques agricoles. La littérature a identifié ces facteurs et leviers, en voici une liste non-exhaustive en lien avec les objectifs de ce mémoire.

2.4.2. Denitrification

La dénitrification est la réduction du nitrate par les micro-organismes anaérobies ou aérobies facultatifs. Elle est favorisée par l'engorgement du sol en eau ce qui crée les conditions anaérobies. Le nitrate devient l'accepteur d'électrons principal et il est transformé en diazote par la réaction :

$$2\,NO_3{}^- + 12\,H^+ + 10\,e^- \rightleftharpoons N_2\uparrow + H_2O$$

Lorsque cette réaction est complète, la dénitrification ne pose pas d'autres problèmes que la perte d'azote. Le nitrate est perdu du pool d'azote assimilable par la plante et est transformé en diazote, gaz inerte présent à 78% dans l'atmosphère terrestre. Cependant, la dénitrification peut être incomplète sous certaines conditions. C'est un problème environnemental majeur puisqu'elle produit des oxydes d'azote (NO et N_2O). Premièrement, ce sont des gaz à effet de serre jusqu'à 300 fois plus impactants que le CO_2. Deuxièmement, ils contribuent à la formation de l'acide nitrique, responsable des pluies acides. Troisièmement, ils peuvent réagir pour créer l'ozone responsable des nuages de smog en zones urbaine. Enfin, le N_2O peut participer aux réactions de dégradation de l'ozone de la stratosphère et contribuer au trou de la couche d'ozone. La production de ces gaz lors de la dénitrification est favorisée lorsque la concentration en nitrate et en nitrite dans le sol est élevée (Weil et Brady, 2017). Elle dépend également des conditions de température et de pH du sol. Lorsque le pH<5 et la température est basse, conditions que l'on risque de retrouver en culture de sapin de Noël, il y a presque autant de N_2O produit que de N_2. La production de NO est généralement plus faible.

2.4.3. Lixiviation

La lixiviation est l'entraînement du nitrate par l'eau drainée vers les nappes phréatiques souterraines. Contrairement aux ions ammonium, les ions nitrates, chargés négativement ne sont pas adsorbés sur les colloïdes de charge négative du complexe humique.

Ceci rend le nitrate très mobile dans le sol et facilement entraîné par l'eau drainée dans les sols. Les conséquences de la lixiviation sont multiples : il s'agit d'une perte d'azote pour l'écosystème en question, elle stimule l'acidification des sols par l'entraînement et la colixiviation de cations. Enfin, le mouvement du nitrate vers les eaux souterraines cause des problèmes de pollution de ces eaux ainsi que des cours d'eaux et finalement des mers dans lesquelles ces eaux se jettent (Weil et Brady, 2017).

Pour avoir une perte d'azote par lixiviation, il faut évidemment la présence de nitrate dans le sol et une situation d'excès d'eau suffisante pour créer le développement d'un flux d'eau dans le sol, appelée drainage. De manière générale, le nitrate du sol est d'origine multiple(Ballu et al., 2006). Il provient :

— de la minéralisation de l'azote organique
— de la restitution par les animaux au pâturage
— des engrais minéraux ou de ferme.

Dans le cadre de la culture de sapin de Noël conventionnelle, les sources de nitrate sont les engrais minéraux et la minéralisation. Les apports d'engrais sont en général synchronisés avec la croissance et donc avec le taux maximal d'absorption par la culture. Ce n'est pas le cas de la minéralisation de l'azote organique puisque le pic de l'automne apparaît après la fin de l'absorption maximale par les sapins. Les quantités moyennes d'eau drainées varient aussi en fonction du moment de l'année. Dans nos régions, le drainage a principalement lieu entre novembre et février. Durant cette période, la majorité du nitrate contenu dans le sol ne sera pas absorbé par les arbres en dormance mais sera directement lessivée dans les eaux souterraines. C'est la raison pour laquelle les bonnes pratiques agricoles tendent à minimiser la teneur en nitrate dans le sol à cette période par une gestion raisonnée de la fertilisation ou par l'implantation du culture de couverture à l'automne par exemple.

2.4.3.1 Eutrophisation

L'eutrophisation est une conséquence directe de la lixiviation du nitrate. Selon la Directive Nitrate européenne(Conseil Européen, 1991), c'est : "l'enrichissement de l'eau en composés azotés, provoquant un développement accéléré des algues et des végétaux d'espèces supérieures qui perturbe l'équilibre des organismes présents dans l'eau et entraîne une dégradation de la qualité de l'eau en question." L'eutrophisation ne doit pas être vue comme un phénomène local et ponctuel mais doit s'envisager à des échelles spatio-temporelles plus larges. Les apports excessifs de nutriments peuvent faire des dégâts à plusieurs milliers de kilomètres et mettre plusieurs décennies à atteindre les milieux aquatiques récepteurs (Ménesguen et al., 2018). Afin de protéger les écosystèmes aquatiques, la Belgique a du mettre en place des zones vulnérables, polluées par le nitrate ou susceptibles de l'être dont ne fait pas partie la zone d'étude. Cela explique que les données sur l'azote potentiellement lessivable soient moins nombreuses dans la région mais ne justifie pas de ne pas tenir compte des pertes d'azote par lixiviation.

2.5. Cadre légal

La culture de sapin de Noël est assez singulière puisqu'elle est autorisée en zone agricole et en zone forestière. Dans la pratique, elle est très peu mise en place en zone forestière puisque les producteurs ne peuvent pas utiliser de produits phytosanitaires et d'engrais dans ce cas. En zone agricole, elle est soumise au même règlement que toute autre culture. Il y a cependant moins de contrôle qu'en culture classique car elle ne bénéficie pas des aides de la PAC. Elle n'est donc pas soumise à la conditionnnalité. Cela entraîne par exemple qu'il n'y a pas de relevé de la superficie totale cultivée et moins de contrôle au niveau du carnet de champ.

2.5.1. Directive Nitrate

En 1991, l'Union Européenne a mis en place sa première action pour lutter contre la pollution provoqué par les engrais azotés utilisés en agriculture et prévenir toute nouvelle pollution. En effet, la pollution induite par le nitrate d'origine agricole a des impacts sur la santé de la population, la qualité des eaux de surface et souterraines ainsi que sur l'eutrophisation des mers. Cette directive impose aux États membres de mettre en place un cadre légal pour une gestion durable de la fertilisation azotée. Elle impute aux États membres à définir des zones vulnérables, zones agricoles susceptibles d'alimenter en pollution nitrique des eaux déjà polluées ou susceptibles de l'être(Conseil européen, 1975). Il s'agit

1. des eaux douces superficielles,notamment celles destinées au captage d'eau potable d'une concentration supérieure à 25mg/L en nitrate ou susceptible de dépasser celle-ci (Conseil européen, 1975)
2. des eaux souterraines d'une concentration supérieure à 50mg/l ou susceptibles de dépasser celle-ci
3. des lacs naturels et autres masses d'eau douce, les estuaires, les eaux côtières et marines ayant subi ou risquant de subir une eutrophisation.

2.5.2. PGDA

En Wallonie, le Programme de Gestion Durable de l'Azote ou PGDA, a permis, dès novembre 2002 de contrôler l'ensemble de l'utilisation de l'azote en agriculture. Parmi les modalités contrôlées par le PGDA, on retrouve notamment, un cadre concernant les conditions de stockage ainsi que les périodes, conditions et normes d'épandage ou encore l'obligation d'implanter des cultures intermédiaires piège à nitrate. Dans le cadre de ce mémoire, deux points de ce programme nous intéressent particulièrement. Pour le contrôle de l'azote minéral épandu sur les terres, le PGDA oblige les agriculteurs à conserver les factures d'achat des engrais azotés minéraux durant deux ans minimum. De plus, l'agriculteur ne peut apporter, en moyenne sur l'exploitation. plus de 250 kg d'azote par hectare de culture.

2.5.2.1 Destruction des prairies permanentes

Lorsqu'une prairie permanente est détruite, des quantités importantes d'azote, pouvant aller de 300 à 700 kg sont libérées (Lambert et al., 2015). Cet azote, libéré par minéralisation, risque d'être directement lessivé vers les nappes phréatiques si la destruction a lieu en automne. Le législation prévoit donc des règles permettant de limiter ces désagréments. D'une part, une prairie permanente peut uniquement être détruite du 1er février au 31 mai. D'autre part, il est interdit d'épandre de l'azote minéral pendant la première année suivant la destruction de la prairie. Il est également interdit d'épandre de l'azote organique ainsi que de planter des légumes ou légumineuses durant les deux années suivant la destruction de la prairie permanente.

2.6. Azote Potentiellement Lessivable (APL)

Afin de protéger les zones vulnérables wallonnes de la pollution nitrique, le PGDA prévoit un contrôle de l'APL chez 5% des agriculteurs situés dans ces zones. Le principe est de mesurer la quantité de nitrate présente dans le sol en début de saison de lixiviation. Le prélèvement est effectué sur les 90 premiers cm à 15 endroits différents en culture et sur les 30 premiers cm à 30 endroits différents en prairie entre le 15 octobre et le 30 novembre. Une étude (Deneufbourg et al., 2013) à l'aide de lysimètres en moyenne Belgique a permis de déterminer une relation claire entre le résultat APL (kg $N-NO_3^-$/ha) et la concentration moyenne en nitrate (en mg $N-NO_3^-$/l) de l'eau récoltée à la base du lysimètre au cours de la période de drainage qui suit la mesure de l'APL. Cette correspondance n'est pas parfaite mais l'ordre de grandeur est généralement respecté dans les situations classiques. Étant donné la limite légale de 50mg/l pour les eaux souterraines discutée dans la section 2.5.1, on peut considérer qu'un résultat APL en-dessous de 50kg/ha n'est pas problématique pour la pollution des eaux de profondeur. En Ardenne, il est possible que ce soit un peu différent puisque les précipitations sont plus importantes et donc le nitrate du sol est dilué et la concentration dans l'eau diminue. Cependant, cela n'a pas été vérifié et nous considérerons 50kg/ha comme la valeur limite pour la suite de cette étude.

Afin de comparer ces résultats, des seuils de référence pour 8 classes de cultures sont établis sur des parcelles appartenant à des fermes de référence, dont le nombre à augmenté au fur et à mesure des années pour atteindre 51 exploitations en 2020 . Ce réseau de ferme est appelé Survey Surface Agricoles (SSA). C'est une collaboration entre le Groupe de Recherche ENvironnement et Ressources Azotées (GRENeRA) [2], l'Earth and Life Institute(ELI) [3], les membres scientifiques de la structure PROTECT'eau et les agriculteurs du réseau de fermes. Le rôle des équipes scientifiques est de conseiller les agriculteurs pour les fumures minérales et organiques, d'analyser les engrais de ferme afin d'ajuster les conseils de fertilisation ainsi que de valider a posteriori les conseils de fertilisation émis,

2. Gembloux Agro-Bio Tech - Université de Liège
3. Université Catholique de Louvain-la-Neuve

notamment au travers d'un contrôle des reliquats azotés. Les agriculteurs s'engagent eux à respecter les conseils de fertilisation établis par les équipes scientifiques sur les parcelles intégrées dans le réseau SSA, à tenir à jour des fiches parcelles nécessaires au suivi azoté de ces parcelles ainsi qu'à participer à des opérations de promotion du programme. (C. Vandenberghe et Marcoen, 2008) Chaque automne sont établies les références APL sur base de cette collaboration. 20 parcelles au minimum par classe sont suivies (30 pour les prairies). L'échantillonnage est réalisé durant 2 périodes, la 2ème quinzaine d'octobre ainsi que la première de décembre. On extrapole et interpole les résultats obtenus pour couvrir une période allant du 15 octobre au 20 décembre, intervalle pendant lequel a lieu les contrôles APL en zone vulnérable par le SPW.

2.6.1. Facteurs influençant les résultats APL

Le contenu du sol en azote nitrique en début de période de lixiviation,- et par conséquent le résultat APL- peut être affecté par différents facteurs comme l'occupation du sol, le climat, le taux de liaison au sol de l'exploitation ainsi que les paramètres physiques et chimiques du sol.

Grâce à l'expérience et aux données acquises durant les nombreuses années d'études des reliquats azotés en zone vulnérable, le groupe de recherche environnement et ressources azotées (GRENeRA) de Gembloux agro bio tech a pu étudier de manière statistique les facteurs influençant les résultats du contrôle APL. Les résultats présentés ci-dessous sont issus du dossier GRENeRA "Analyse et interprétation des résultats du contrôle APL".

Une analyse de la variance réalisée sur 7000 résultats APL obtenus entre 2007 et 2012 permet de déterminer que la classe de culture ainsi que l'année du prélèvement ont un impact hautement significatif sur le résultat APL. Cependant, elles expliquent seulement 26% de la variabilité du résultat APL obtenu.

Ces mêmes résultats ont permis d'analyser l'impact du type de sol (texture, drainage et développement de profil). Aucune différence statistique significative n'a été observée. Il existe, dans certaines classes de cultures et certains types de sol, des différences de conformité de résultat APL mais aucune tendance homogène n'a été observée. Cela n'indique pas qu'il n'existe pas d'impact du type de sol mais simplement que la variabilité due aux autres facteurs masque cet effet dans les résultats statistiques. Les paramètres chimiques du sol impactent aussi les résultats APL. Le contenu en carbone organique est directement relié avec le résultat APL chez certaines classes de culture mais n'explique généralement pas une grande partie de la variance du résultat APL. D'autre part, il a été démontré qu'il existe une différence significative de contenu en carbone organique entre les parcelles non-conformes et les autres. Pour ce qui est du pH, aucune relation n'a été observée avec les résultats APL ni avec la conformité. Enfin, il a été démontré que la pluviométrie influence la répartition de l'azote nitrique entre les différents horizons. En effet, en année humide, les profils de profondeur vont être plus chargés en fin de période d'échantillonage, contrairement au années sèches ou ils sont mieux répartis. On peut in-

Tableau 2 – Classes de culture pour l'établissement des références APL

Classe	Itinéraires culturaux
A1	Betterave (sucrière et fourragère)
A2	Céréales non suivies d'une culture implantée en automne
A3	Céréales suivies d'une culture implantée en automne ; chicorée
A4	Maïs
A5	Pomme de terre
A6	Colza
A7	Légumes cultivés pour leurs feuilles, tiges ou fruits
A8	Prairies

diquer en conclusion de ce paragraphe qu'il n'existe pas de biais systématique risquant de pénaliser l'agriculteur lors du contrôle APL et que la majorité de la variabilité est due aux pratiques culturales. Le contexte climatique et le taux en matière organique élevé de l'Ardenne belge risquent donc d'impacter les résultats APL obtenus, en plus de la classe de culture inédite étudiée.

2.7. Gestion de l'azote en culture de sapins de Noël

2.7.1. Croissance des sapins de Nordmann

Afin de comprendre les flux entre les différents réservoirs des différentes formes d'azote, il faut comprendre comment fonctionne la croissance des sapins de Noël, ainsi que leur manière de prélever, stocker et utiliser l'azote. La croissance des arbres a lieu par divisions cellulaires au niveau des méristèmes situés à l'extrémité de la tige. Une étude sur la croissance en hauteur de différentes essences de résineux en station forestière (Aussenac, 1975) démontre que la croissance a lieu durant les mois de mai à août et qu'elle suit une courbe en "S". Le sapin de Nordmann est celui ayant la croissance la plus lente dans cette étude, plafonnant à 200mm par an. Cela correspond avec les connaissances sur le sujet ainsi que les observations empiriques réalisées par les producteurs ardennais. Il existe une relation entre la température et la croissance des résineux, celle-ci étant proportionnelle à la somme des températures. C'est assez logique, puisqu'elle dépend de l'activité photosynthétique, elle-même dépendante de facteurs environnementaux comme le rayonnement solaire, la quantité d'eau et la température. La croissance annuelle de la partie aérienne est déterminée par les bourgeons qui se sont développés lors de la saison précédente (Martens et al., 2019). Les conditions environnementales de l'année précédente impactent aussi la croissance de l'année suivante. C'est un point important, surtout dans le cas d'épisodes de sécheresse intense.

Selon les observations des producteurs, l'essentiel de la croissance de la partie aérienne a lieu de mai à mi-juillet. Le graphe de la figure 2 n'a pas été dessiné à partir d'observations pour l'espèce *A.Nordmanniana* mais il permet de se faire une idée du schéma de croissance de ce type d'arbre. On observe que la croissance racinaire prend une place importante

lorsque la croissance aérienne n'a pas lieu. En mai, lorsque le débourrement a eu lieu, l'apparition des nouvelles aiguilles marque le début de la période d'absorption maximale en nutriments. La croissance racinaire n'est pas encore tout à fait nulle et la vitesse de croissance aérienne augmente drastiquement. A la fin de l'été, les conifères arrêtent la production d'aiguilles et créent des bourgeons pour l'année suivante. La production de bois et le stockage de nutriments continuent durant l'automne mais peu de nutriments sont absorbés dans les parties aériennes durant cette période. Les racines connaissent un deuxième pic de croissance durant les pluies automnales. Lorsque la température de l'air et du sol commence à diminuer, les sapins de Noël entrent dans la phase de dormance et atteignent la dormance maximale pendant l'hiver(Oregon State University, 2009).



Figure 2 – Influence de la saison sur la vitesse de croissance de la partie aérienne et de la partie racinaire de la plupart des espèces de sapin de Noël aux Etats-Unis

2.7.2. Absorption et dynamique de l'azote

L'absorption de l'azote par les plantes est programmée selon la saison et leurs besoins en azote. Les facteurs environnementaux tels que l'intensité de la lumière, la disponibilité de l'azote et la température ont un rôle à jouer dans cette absorption (Li et al., 2016). Le dynamique d'absorption de l'azote par les sapins de Noël diffère des cultures traditionnelles avec lesquelles nous allons comparer les résultats d'azote potentiellement lessivable lors des prochaines sections. Il s'agit d'une plante pérenne à feuilles persistantes. Les besoins en nutriments ne sont pas uniquement satisfaits grâce au prélèvement par les racines. Il sont aussi remplis par la mobilisation de réserves stockées ainsi que par la translocation de nutriments venant d'organes sénescents.

Les conifères, contrairement à la majorité des plantes cultivées, ont tendance à préférer l'ammonium au nitrate comme source principale d'azote. En effet, comme mentionné précédemment, les températures basses diminuent les vitesses de nitrification et de minéralisation. Ceci a pour résultat que l'ammonium est la principale source d'azote lorsque les températures sont froides. Ceci pourrait expliquer pourquoi les conifères se sont

adaptés à des sols froids, donc pauvres en nitrate, contrairement aux arbres des régions chaudes(Cañas et al., 2016). Ceci est confirmé par une étude sur le sapin de Nordmann cultivés en conditions contrôlées en serre qui a démontré que la croissance des parties aériennes était nettement diminuée lorsque les arbres étaient uniquement fertilisés avec de l'azote nitrique comparativement à la fertilisation avec des ions ammonium. La teneur en azote des aiguilles est bien plus faible lorsqu'on applique le nitrate que l'ammonium ce qui semble démontrer qu'*Abies Nordmanniana* absorbe très mal le nitrate (Khalil et al., 1989). Une autre étude (Rothstein et Cregg, 2005) sur *Abies Fraseri* a également obtenu des conclusions similaires. Néanmoins, une étude plus récente sur la nutrition des conifères démontre qu'il existe un biais pour les conifères cultivés en solution hydroponique, ces études ne prennent pas en compte la compétition avec les micro-organismes ainsi que l'impact des mycorhizes. Dans cette étude, la différence d'absorption entre le nitrate et l'ammonium n'existe généralement pas chez les conifères matures étudiés(Zhou et al., 2021). Cependant, des tests en conditions réelles n'ont pas été réalisés sur le sapin de Nordmann et l'inhibition de la nitrification réalisée par les racines de l'arbre amène à penser qu'il y a peut-être des différences d'affinité entre les formes minérales d'azote pour cette espèce.

2.7.3. Fertilisation azotée

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'application de fertilisants en culture de sapin de Noël permet non seulement de maintenir une croissance suffisante mais aussi d'éviter la chlorose des aiguilles et ainsi garder une belle couleur verte au moment de la vente Heckman et Vodak, 2012. La fertilisation tardive, appliquée après la croissance dans certains cas chez certains producteurs, servirait aussi à avoir une meilleure mise à bourgeon (Didier Ernould, communication personnelle) et remplir les stocks d'azote de la plante pour la saison suivante. En effet, la croissance de l'arbre se déroule sur un laps de temps si court que les producteurs locaux soupçonnent qu'une grande partie soit permise grâce à des réserves internes. Cependant, il s'agit de pratiques basées sur des observations empiriques, il n'existe pas de données sur la fertilisation des sapins de Nordmann en Ardenne belge.

Dans d'autres régions du monde où les sapins de Noël sont cultivés, principalement en Amérique du Nord et dans les pays scandinaves, il existe plus de littérature à ce sujet. Une étude américaine datant de 1991 avertissait déjà sur la perte d'engrais azotés par lessivage, avec 49% de pertes totales sur une année de culture, dont 40% par lessivage(Landgren et Bondi, 1994). Cette étude démontre aussi que malgré la fertilisation excessive, les arbres pouvaient ne pas prélever la totalité de l'azote nécessaire. Une autre étude (J. O'Donnell et al., 2015) a été réalisée en 2013 dans le Michigan sur *Abies Fraseri* pour déterminer si le timing de l'application d'azote ou le choix du fertilisant azoté avaient un impact sur la croissance et la concentration en azote foliaire. Les résultats ne démontrent pas de différence de croissance entre les différents traitements azotés, y compris le témoin non



Figure 3 – Demande en nutriments en fonction de l'âge et de la taille des arbres. (Oregon State University, 2009)

fertilisé. La seule différence se situait au niveau du taux d'azote foliaire, plus élevé pour les arbres ayant reçu une fertilisation mais sans différence significative entre les différents traitements appliqués. L'un d'entre eux était un engrais conçu pour limiter la perte en nitrate en inhibant la nitrification et l'uréase.

Un document de l'Oregon (Oregon State University, 2009) fait état d'une série de pratiques à respecter dont voici un bref aperçu. Le premier point dont il faut tenir compte est l'âge de la plantation. En effet, la croissance annuelle d'un résineux double chaque année et il est donc logique que l'absorption d'azote suive la tendance exponentielle. Ils préconisent de ne pas fertiliser le sol durant les trois premières années de la culture. Selon eux, la concentration en nutriments des arbres qui sortent de la pépinière est le double de celle nécessaire pour une croissance adéquate lors des premières années. Si on ajoute à cela l'apport par la fourniture du sol et l'azote atmosphérique fixé, les besoins de l'arbre en éléments nutritifs sont entièrement satisfaits pour les premières années.

Un deuxième point important sur lesquels insistent plusieurs sources (Baumgarten et al., 2008 ; Oregon State University, 2009) est l'analyse des teneurs en nutriments des aiguilles. Cela indique quels nutriments sont accumulés de manière suffisante, déficitaire ou en excès par l'arbre. Pour l'azote par exemple, il existe des valeurs recommandées au-dessus desquelles l'arbre ne devrait pas subir de décoloration. Les prélèvements se font durant l'hiver sur les aiguilles de la dernière année de croissance. En sapin de Nordmann, les teneurs en azote des aiguilles de la dernière génération doivent être comprises entre 1.5 et 2% du poids sec total. Enfin, Oregon State University (2009) insiste sur le fait que la gestion de la fertilisation azotée est site spécifique. La même dose d'azote appliquée sur deux parcelles différentes ne sera pas utilisée de la même manière par les arbres. D'où l'intérêt d'étudier la concentration des aiguilles afin d'étudier l'azote dont la plante a réellement besoin.

2.8. Produits phytosanitaires

Un produit phytosanitaire est, selon la définition du programme wallon de réduction des pesticides, "un produit d'origine naturelle ou élaboré chimiquement qui est utilisé pour lutter contre les maladies et les ravageurs des végétaux ou encore pour éliminer les végétaux ou les organismes indésirables." L'utilisation de produits phytosanitaires semble à priori moins problématique en horticulture ornementale qu'en agriculture puisque les produits ne sont pas censés entrer dans la chaîne alimentaire. Les dangers sont donc a priori moindre pour la santé humaine bien des nouvelles pratiques de recyclage des sapins par des chèvres pourraient mettre en cause cette affirmation (Playoult, 2021). Pourtant, l'utilisation de pesticides en culture de sapin de Noël est de plus en plus décriée par l'opinion publique et la législation environnementale semble de plus en plus contraignante pour les producteurs. La forte augmentation de la surface cultivée ainsi que l'aspect purement rentier de cette culture participent à cette vision populaire. Pourtant, comme nous avons pu le voir précédemment à travers le projet de gestion différenciée et la norme "Véritable et écoresponsable", il semble que les producteurs sont de plus en plus engagés dans le combat pour la préservation de l'environnement et de la biodiversité.

2.8.1. Processus de dispersion des produits phytosanitaires

Après leur application, les matières actives vont subir différents processus les entraînant dans différents milieux de l'environnement : l'eau, le sol, l'air et les organismes vivants. Le sol sera automatiquement impliqué, peu importe le mode d'application des produits phytosanitaires. L'évolution de ces produits dans le système sol est déterminée en partie par les différentes caractéristiques physico-chimiques de ceux-ci. Il met en jeu trois différents types de processus : la rétention, la dégradation ainsi que le transfert vers d'autres sphères de l'environnement (atmosphère, eaux souterraines et eaux de surfaces).

Le terme rétention englobe l'ensemble des processus qui font passer les molécules sur la phase solide du sol à partir de la phase gazeuse ou de la phase liquide. Elle indique la capacité du sol à retenir les molécules de substances actives et à limiter son déplacement dans ou vers l'extérieur de la matrice du sol. Ces molécules sont retenues par liaison aux particules du sol par adsorption mais aussi par l'absorption dans la matrice ou par les êtres vivants du sol, plantes ou micro-organismes. Elle est influencée par le type de molécule et ses caractéristiques, par l'humidité du sol mais aussi par sa texture, son pH et son taux de matière organique.

La dégradation est le résultat de différents procédés biotiques et abiotiques. Elle est considérée comme complète lorsqu'il ne reste que des composés minéraux (CO_2, H_2O, HCI, SO_2,etc). Les matières actives peuvent être dégradées par biodégradation, photolyse ou hydrolyse. La biodégradation est la transformation d'une substance par des micro-organismes. Elle dépend de certains facteurs, comme les conditions d'aérobie du sol, la présence d'éléments nutritifs et l'importance des populations de micro-organismes. La matière organique joue

donc un rôle important dans cette biodégradation. La photolyse est la dégradation d'un composé par exposition au rayonnement solaire. Enfin l'hydrolyse est la dissociation d'un composé au contact de l'eau. Une partie de la molécule est remplacée par un groupement OH^- de l'eau du sol. Des composés intermédiaires (métabolites) susceptibles d'avoir un impact environnemental peuvent être produits durant les différentes étapes de dégradation, ils sont souvent plus persistants dans l'environnement que la molécule mère.

Enfin, les transferts vers d'autres systèmes concernent le passage vers l'atmosphère, vers les eaux de profondeur et de surface. Les processus en cause sont la volatilisation, la lixiviation et le lessivage ainsi que le ruissellement. Ils sont étroitement liés à la dynamique de l'eau dans le sol. Les caractéristiques du produit, le mode d'application (pulvérisation, incorporation) ainsi que les caractéristiques du site (type de sol, propriétés hydrodynamiques, relief, météo et pratiques culturales) sont les autres facteurs influençant ces transferts. La volatilisation est le passage de la substance active de la phase aqueuse dans la phase gazeuse de l'atmosphère. Les facteurs qui favorisent celle-ci sont une pression de vapeur élevée, une faible solubilité, une température de l'air et du sol élevée ainsi qu'un faible taux d'humidité, une absence de couverture végétale, la hauteur de pulvérisation et la taille de gouttelettes. Le ruissellement vers les eaux de surface est fortement favorisé en cas de fortes pluies, principalement sur sol saturés, ou en cas de culture sur forte pente. La solubilité du pesticide joue un rôle important également puisqu'un composé plus soluble sera hydrophile et donc plus mobile avec l'eau de ruissellement, au contraire d'un composé moins soluble. Pour la lixiviation, on rajoute l'influence de l'adsorption du composé par les molécules du sol et donc de la texture, de la teneur en matière organique, de l'état structural du sol ainsi que des propriétés hydriques de celui-ci.

2.8.2. Propriétés des produits phytosanitaires

Il est de notoriété publique que les produis phytosanitaires posent des problèmes d'un point de vue de la protection des écosystèmes. Bien que la majorité d'entre eux ont des impacts néfastes sur l'environnement il est important de mentionner et de comprendre les différences entre ceux-ci afin de pouvoir les comparer en fonction des doses appliquées.

2.8.2.1

Informations générales Les pesticides sont couramment appelés par leur nom commercial. Chaque formulation vendue renferme une ou plusieurs substances actives dans des concentrations différentes. On comparera donc les différents produits par le nom de la substance active utilisée. Ils appartiennent a différentes familles chimiques ayant généralement des propriétés similaires. Enfin, on peut classer les différents phytosanitaires en fonction de leur activité biologique, c'est-à-dire selon la cible qu'ils visent à détruire. On retrouve les herbicides (adventices), fongicides (champignons),insecticides (insectes), acaricides (acariens) et molluscicides (mollusques). En culture de sapin de Noël et lors de

la suite de ce document, nous discuterons uniquement des 3 premières catégories.

2.8.2.2 Caractéristiques physico-chimiques

Afin de comparer la rémanence des phytosanitaires dans la solution du sol, différentes caractéristiques sont prises en compte. On peut les comparer selon le coefficient de partage carbone organique-eau (Koc), la solubilité, la persistance dans le sol et l'hydrolyse. Le coefficient de partage entre le carbone organique du sol et l'eau permet de rendre compte du fait qu'une substance est plus ou moins retenue par les particules du sol. C'est le rapport entre la quantité absorbée par unité de poids de carbone organique du sol et la concentration de ce même composé en solution aqueuse à l'équilibre. Plus il est élevée, moins la substance risque de se trouver dissoute dans l'eau et plus elle est liée à la matière organique du sol. La solubilité nous indique la quantité maximale d'une matière active qui peut-être dissoute dans un solvant à une température donnée, en l'occurrence l'eau du sol. Un composé plus soluble aura donc plus tendance à être lessivé vers les nappes phréatiques. La majorité des pesticides est diluée dans l'eau et donc est forcément soluble. La persistance dans le sol ou temps de demie vie (DT50) est déterminée par le temps nécessaire pour dégrader ou dissiper 50 % de la masse totale d'une matière active dans le sol ou dans l'eau du sol. En effet, les matières actives présentes dans le sols subissent de nombreuses transformations par réaction chimique ou microbiologique. La dégradation étant complète lorsqu'il ne reste que des composés minéraux (CO_2, H_2O, HCI, SO_2,etc). Des composés intermédiaires (métabolites) susceptibles d'avoir un impact environnemental peuvent être produits durant les différentes étapes de dégradation. Les matières actives peuvent être dégradées par biodégradation, photolyse ou hydrolyse. La biodégradation est la transformation d'une substance par des micro-organismes. Elle dépend de certains facteurs, comme les conditions d'aérobie du sol, la présence d'éléments nutritifs, l'importance des populations de micro-organismes. La matière organique joue donc un rôle important dans cette biodégradation. La photolyse est la dégradation d'un composé par exposition au rayonnement solaire. Enfin l'hydrolyse est la dissociation d'un composé au contact de l'eau. Une partie de la molécule est remplacée par un groupement OH^- de l'eau du sol. Elle dépend en grande partie de l'acidité du sol. Elle est évaluée en laboratoire où l'on détermine le temps nécessaire pour dégrader 50% de la matière active dans l'eau à un pH donné.

2.8.2.3 Paramètres de toxicologie et d'écotoxicologie

On distingue différentes doses en fonction de l'impact sur différents groupes écologiques.

1. La CL50 des poissons détermine la concentration létale pour 50% d'un lot de poisson soumis au test.

2. La CI50 est la concentration à laquelle 50% des daphnies soumises au test sont immobilisées.
3. La CE50 algues correspond à la concentration à laquelle 50% des algues soumises au test sont inhibées.

Plus ces doses seront faibles, plus la substance active sera considérée dangereuse pour le groupe en question et donc toxique pour l'environnement.

Du point de vue de la toxicité humaine, on tient compte de la dose journalière admissible (DJA). C'est la quantité maximale réglementaire de matière active qui peut être ingérée quotidiennement par un humain sans mettre sa santé en péril. Elle est calculée sur base de la Dose Sans Effet (DSE), qui est la dose maximale qu'un organisme donné peut ingérer sans entraîner d'effet constaté. Elle est calculée sur les espèces animales les plus sensibles. La DJA est le centième de la DSE pour limiter les risques envers l'homme en tenant compte de la variabilité intra et interspécifique, les tests n'étant évidemment pas réalisés directement sur des humains.

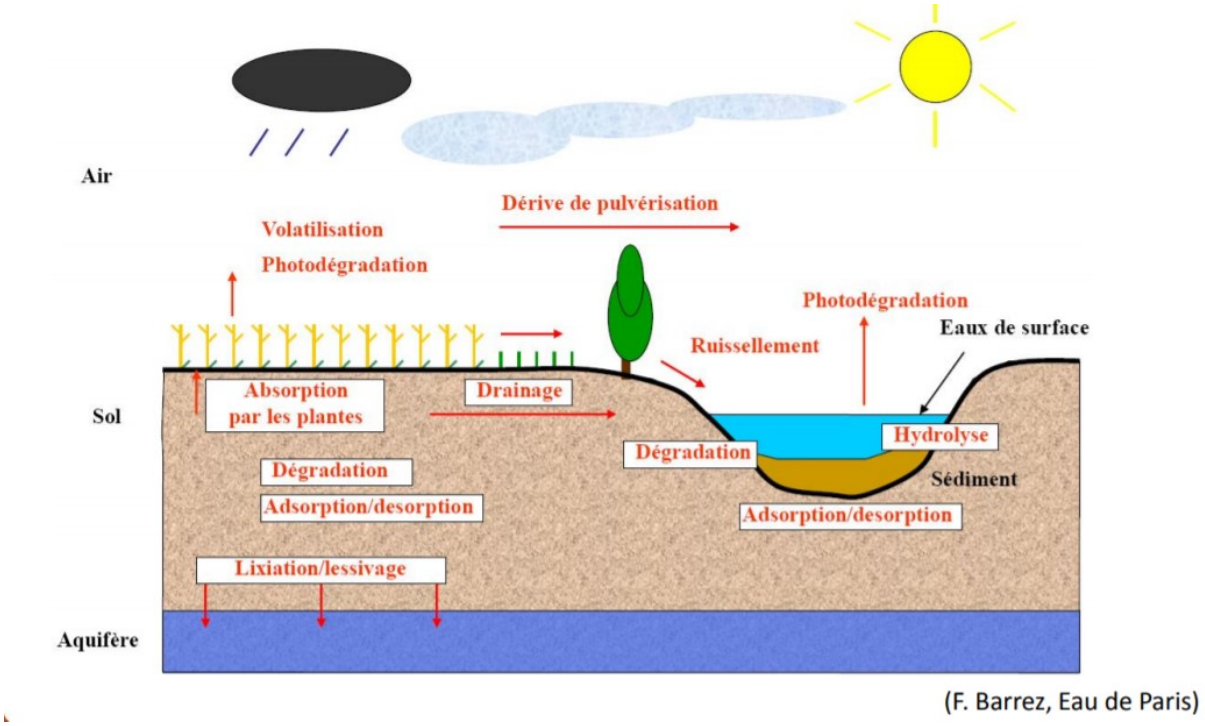


Figure 4 – Mobilité des pesticides dans l'environnement.

2.8.3. Mise au point sur le glyphosate

Le glyphosate ou *N-(phosphonomethyl) glycine* est un herbicide à large spectre introduit dans les années 1970 par Monsanto. C'est un herbicide de post-levée non sélectif. Il est connu pour détruire plus de 150 espèces d'adventices et est utilisé comme désherbant

total seul ou en combinaison avec d'autres herbicides. En Belgique, son utilisation n'a cessé d'augmenter depuis 1995 et 619.295 kg en matière active ont été vendue en 2017, ce qui en fait le deuxième herbicide le plus vendu avec 37,29% de la quantité totale de matière active de type herbicide vendue en Belgique. Il est souvent utilisé en sapins de Noël pour supprimer toute compétition d'adventices avec la culture.

L'usage et la vente à usage non-professionnel des herbicides synthétiques totaux, parmi lesquels se trouvent les produits à base de glyphosate, ont été interdits en Belgique par l'arrêté royal du 16 septembre 2018.(SPF SANTE PUBLIQUE et SECURITE DE LA CHAINE ALIMENTAIRE ET ENVIRONNEMENT, 2018) Cependant, l'approbation de l'usage et de la vente pour les professionnels a été prolongée en 2017 par la Commission Européenne jusqu'en 2022. La commission de l'environnement et de la santé publique s'est opposé au renouvellement de l'autorisation de l'herbicide pour une durée de dix ans et une planification pour la suppression progressive de cette substance devrait avoir lieu d'ici 2022 (Commission Européenne, 2017).

2.8.3.1 Impacts de l'utilisation du glyphosate

L'utilisation du glyphosate en agriculture est très controversée, c'est pourquoi les décisions de la Commission semblent si contradictoires. En effet, les avis divergent sur la dangerosité de la substance et un conflit interne entre le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) de l'ONU et les agences de sécurité alimentaire et chimiques de l'UE ne permettent pas aux députés de tirer des conclusions concernant la sécurité de cette substance(Chatain, 2017) D'un coté, certains affirment que la fonction de la substance est d'empêcher la plante de produire des acides aminés essentiels que les animaux ne sont pas capables de produire. Par conséquent, la toxicité pour les animaux ne peut être révélée qu'à très haute dose. Il semble aussi que le glyphosate n'a pas, ou très peu d'effets sur les communautés microbiennes du sol. D'un autre côté, un rapport du CIRC dévoilé en 2015 affirme que le glyphosate est un cancérogène probable. Les détracteurs affirment aussi que les mauvaises pratiques d'applications entraînent des résidus observés dans les environnements terrestres et aquatiques. Beaucoup d'études démontrent des quantités non-négligeables dans les sols, les produits de cultures, les animaux, les humains, l'eau douce ainsi que les animaux y habitant. Les effets environnementaux les plus décriés sont la persistance dans l'environnement, les effets sur la santé de la culture ainsi que les interactions avec la nutrition de la culture.

3 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier l'impact écologique de la culture de sapins de Noël à travers deux indicateurs : les résultats d'une analyse de l'Azote Potentiellement Lessivable et une enquête sur les pratiques de fertilisation et l'application de produits phytosanitaires en culture conventionnelle.

Les sous-objectifs découlant de cet objectif principal seront de :

— situer l'impact écologique la culture de sapins de Noël par rapport aux autres cultures principales en Wallonie à travers une comparaison des résultats obtenus pour ces deux indicateurs,

— étudier les différences de pratiques entre les producteurs et les comprendre,

— étudier les facteurs indépendants des pratiques faisant varier les résultats obtenus.

L'intérêt de cette étude est d'apporter des éléments de réponse et d'effectuer un état des lieux de la culture à travers l'étude de vingt parcelles cultivées par six producteurs différents réparties sur neuf communes d'Ardenne belge.

La mise en place de ces objectifs est rendue possible par une collaboration avec le projet de gestion différenciée menée par les Groupes d'Actions Locales dont les objectifs sont présentés dans la section 2.1.6.1. Les projets se complètent avec le but d'apporter une dimension théorique et académique à un projet de terrain et de profiter des contacts de confiance établis pour obtenir des données de la part des producteurs membres du projet.

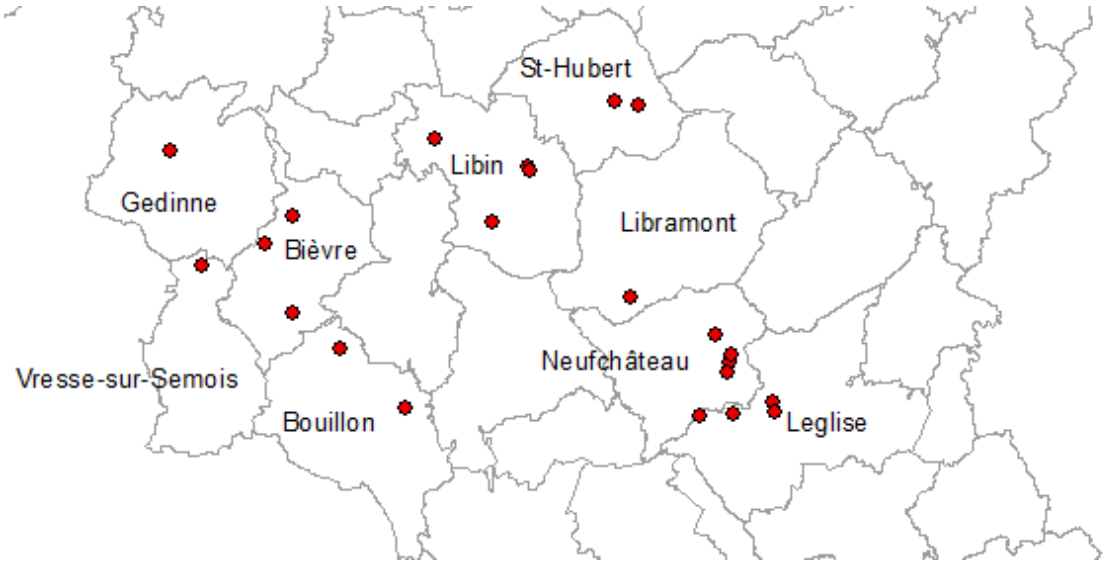


Figure 5 – Répartition des parcelles suivies sur le territoire ardennais

4 Matériel et Méthode

4.1. Contexte

Pour répondre aux objectifs du mémoire, nous avons travaillé en collaboration avec le GAL Ardenne Méridionale, le GAL Novardenne ainsi que le GAL Haute-Sûre Forêt d'Anlier. Nous avons pu voir dans la section 2.1.6.1 les différents projets menés dans ce cadre. Dans le contexte de ce mémoire, nous avons utilisé les données récoltées pour 22 parcelles en suivi sol. Les analyses comparatives seront réalisées sur trois types de données :

- Les analyses physico-chimiques réalisées en 2019 au laboratoire de Michamps sur des échantillons de sol (Annexe A).
- Les analyses APL réalisés sur les trois horizons (0-30,30-60 et 60-90cm) en 2019 et 2020.
- Des données d'enquête concernant les produits phytosanitaires appliqués sur les parcelles.
- Des données d'enquête concernant les engrais appliqués sur les parcelles.

4.2. Présentation des sites d'étude

Le territoire couvert par le projet est dispersé sur neuf communes rassemblées sur les trois différents GAL en collaboration. L'altitude est comprise entre 364m et 505m. Les



Figure 6 – Photo aérienne d'une jeune plantation de sapin de Noël

parcelles se trouvent sur trois différents types de sol ou une combinaison de ceux-ci : un sol limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable, un sol limono-caillouteux à charge schisto-phylladeuse et à drainage naturel quasi exclusivement favorable ou sur un sol limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse et à drainage naturel favorable. La charge caillouteuse trop importante de deux parcelles du côté de Saint-Hubert ne nous a pas permis d'effectuer un échantillonage jusqu'à 90cm.
Les parcelles étudiées sont cultivées de manière conventionnelle à l'exception de deux d'entre elles pâturées par des moutons. Nous ne prendrons pas ces résultats en compte pour la suite de l'étude. Les prélèvements ont donc été réalisés sur des parcelles relativement dénudées de toute autre végétation que les sapins de Noël. Les parcelles ont été réparties équitablement en fonction des classes d'âges et des précédents culturaux. Elles appartiennent à six producteurs différents, impliqués à différents niveaux dans le projet de gestion différenciée. Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés en 2019 (Annexe A) dont certains seront présentés dans la section résultats.

4.3. Climat

4.3.1. Variation du climat sur la zone d'étude

Le territoire d'étude étant relativement étendu, le climat varie d'une parcelle à l'autre. On distingue principalement les parcelles situées en basse et moyenne Ardenne des parcelles situées en Ardenne centro-orientale. Comme nous pouvons le voir sur la figure 7, les différences absolues en terme de précipitations et de température moyennes sont assez faibles et sont dues principalement à la différence d'altitude. Toutefois, nous avons récolté des données météo de deux stations grâce au site Agromet du CRA-W (figure 8 et 9),

	Longueur de la saison de végétation (jours)	Précipitations annuelles (mm)	Température moyenne annuelle (°C)	Indice de Lang (xéricité) (mm.°C⁻¹)	Température maximale absolue (°C)	Température minimale absolue (°C)
Basse et moyenne Ardenne	163 *4*	1170 *118*	8,7 *0,3*	136,8 *17*	35,8 *0,4*	-18,9 *0,5*
Ardenne centro-orientale	156 *2*	1136 *70*	8,1 *0,2*	141,8 *9,2*	35,3 *0,3*	-19,8 *0,5*

Figure 7 – Moyenne et écart-type à la moyenne (en italique) des principaux indicateurs climatiques pour les deux zones bioclimatiques couverte par le projet(Van der Perre et al., 2015)

proches des différentes parcelles étudiées. On observe un écart de précipitations relativement important durant l'automne pour les deux années de prélèvement. Au moment des prélèvements de 2019, les précipitations cumulées sont comprises entre 268,9 et 282,2mm à la station de Libramont alors qu'elles sont entre 383,1 et 400,6mm à la station de Willerzie. En 2020, le même ordre de grandeur est observé avec entre 144,4mm et 155mm à Libramont pour 252,6 à 267,6mm à Willerzie. S'il est difficile d'en étudier l'impact dans le cadre de ce mémoire, il est important de garder à l'esprit que la variabilité du climat est un facteur non-négligeable de variation entre les parcelles prélevées, particulièrement sur un territoire aussi grand.

4.3.2. Rétrospective climatique 2019 et 2020

Du point de vue des précipitations, l'année 2019 et dans une moindre mesure l'année 2020 ont été plus sèches que la normale avec un déficit hydrique d'avril à août. Les conditions de sécheresse ont été aggravées par des niveaux élevés d'évapotranspiration potentielle. Au niveau des températures, des vagues de chaleur [4] d'intensité importante ont rendu les étés 2019 et 2020 hors normes (C. Vandenberghe et al., 2020).

Comme nous pouvons l'observer sur les figures 8 et 9, les précipitations ont été très différentes entre les deux années d'étude lors de la période de drainage. En effet, les précipitations cumulées sont toujours plus élevées en 2019. Les étiquettes mises en avant sur la figure sont les cumuls des précipitations au moment où les échantillonnages ont été réalisés en 2019 et 2020. Nous pouvons observer que le cumul est presque 2 fois plus important lors des prélèvements de 2019 que lors des prélèvements de 2020 (/ 150mm en 2020 contre / 280mm en 2019). Cela pourrait influencer les résultats dans le sens où une plus grande partie de l'azote a déjà pu être drainée en 2019.

4. Définies officiellement en Belgique comme une période d'au moins 5 jours successifs avec une température maximale supérieure à 25°C, avec au moins 3 d'entre eux supérieur à 30°C

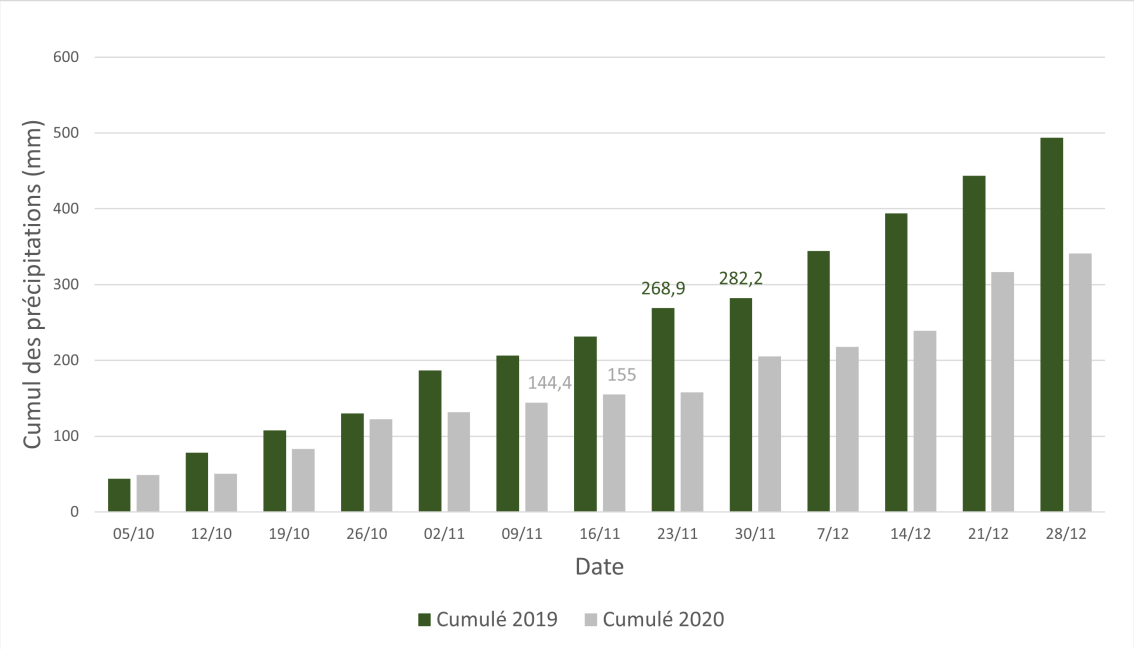


Figure 8 – Cumul des précipitations durant la période de drainage à Libramont-Chevigny durant l'automne 2019 et 2020. Source : CRA-W/Agromet.be

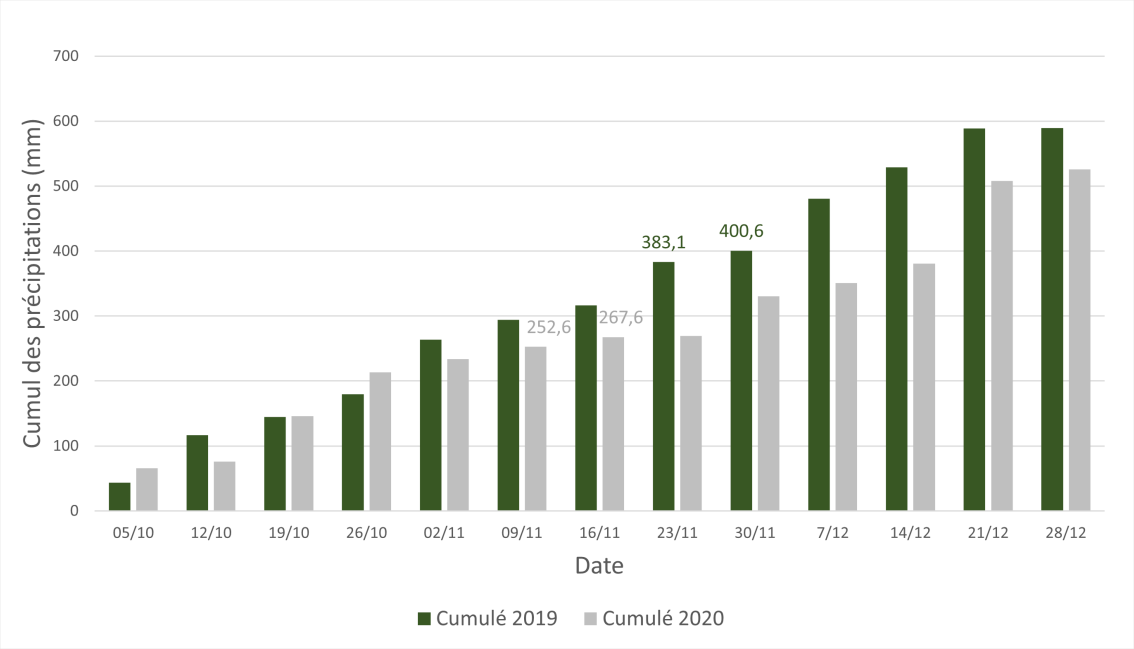


Figure 9 – Cumul des précipitations durant la période de drainage à Willerzie durant l'automne 2019 et 2020. Source : CRA-W/Agromet.be

4.4. Analyses de l'Azote Potentiellement Lessivable (APL)

Les échantillons de sol ont été dosés au laboratoire des eaux et sol du centre de Michamps, selon la norme ISO14256-2 :2005(ISO, 2005) :

4.4.1. Méthode d'échantillonage et conservation

La méthodologie utilisée est la-même que celle employée pour les contrôles APL dans d'autres cultures en Belgique. Afin de créer des courbes APL de référence pour les différentes classes de culture, la méthode qui suit est généralement appliquée deux fois, en début et en fin de saison de lixiviation. Ceci permet de tenir compte de la pluviométrie et du nitrate déjà lixivié lors des contrôles. Dans ce cas, nous n'avons établi qu'un seul prélèvement par an.

Dans chaque parcelle, nous avons prélevé manuellement au minimum quinze échantillons à trois différents horizons (0-30,30-60 et 60-90cm). L'objectif est d'échantillonner dans la majorité de la surface de la parcelle en faisant une croix à travers celle-ci pour limiter la variabilité spatiale intraparcellaire. Nous avons utilisé une sonde (voir figure10 dont le diamètre est choisi pour que la masse totale de terre prélevée soit au moins égale à 300 grammes par horizon. Les différents horizons sont conservés à part dans des sacs plastiques et placés dans une glacière lorsque la parcelle est terminée. Cette étape permet d'éviter une minéralisation de l'azote organique due à une augmentation trop importante de la température par rapport à la température du sol. Les parcelles ont été échantillonnées les 21 et novembre 2019 et les 5,11 et 13 novembre 2020. Après prélèvement, les sols ont été analysés immédiatement ou conservés en chambre froide à une température comprise entre 1°C et 4°C pendant 5 jours maximum pour les raisons évoquées précédemment.

4.4.2. Extraction des sols

Les sols sont d'abord tamisés sur un tamis de maille de 8mm et homogénéisés. Ils sont ensuite extraits au chlorure de potassium (KCl 1M). On extrait minimum 30 grammes d'échantillon avec un rapport d'extraction de 1/5 (poids de terre/ volume d'extractif). On homogénéise à nouveau le flacon contenant mélange sol + KCl en mélangeant la solution grâce à un agitateur rotatif pendant 30min à 40tour/min minimum. On laisse ensuite la solution au repos pendant 30 minutes pour décanter. Le tout est ensuite filtré pour ne conserver que le surnageant sur lequel le dosage de l'ion nitrate est réalisé. Les solutions sont ensuite dosées ou congelées.



Figure 10 – Sonde pour le prélèvement des sols

4.4.3. Mesure de la teneur en eau et de la charge caillouteuse

Afin de déterminer la teneur en eau, on suit le protocole de la norme ISO11465 :1993. Une partie de l'échantillon de sol frais (environ 100 grammes) est pesée et mise de côté. Elle est ensuite placée dans étuve et séchée à 105°C jusqu'à masse constante (environ 24h). On laisse le sol refroidir puis on pèse à nouveau le sol sec afin de déterminer la teneur en eau en pourcentage massique w_W. Pour déterminer la charge caillouteuse du sol, on utilise le logiciel Requacarto, la parcelle est localisée grâce aux coordonnées GPS puis dessinée sur base de plusieurs fonds de cartes. Le logiciel renvoie un rapport avec plusieurs informations : la texture et type de sol ainsi que la charge caillouteuse estimée.

4.4.4. Dosage des nitrates : colorimétrie à flux segmentés

La détermination automatisée de la concentration en nitrate et en nitrite est basée sur la méthode de la réduction au cadmium. L'échantillon est tamponné à pH 8.2 et passe à travers une colonne de cadmium afin de réduire le nitrate en nitrite. Celui-ci, présent initialement en solution additionné du nitrate réduit, est ensuite transformé par réaction chimique en colorant azoïque mesuré à une longueur d'onde de 540nm. En conditions aérobies, la teneur en nitrite des sols est négligeable et il n'est donc pas nécessaire de les doser. La méthode indique donc directement la teneur en nitrate.

L'automate crée une série de solutions de concentration croissante en N-NO_3^- sur base d'une solution-mère (375mg/l) préalablement préparée. Les solutions sont ensuite pompées vers le tube où le nitrate sera réduit par du cadmium. Le réactif de coloration

est ensuite ajouté. Le tout passe ensuite dans le détecteur et la cellule de mesure pour obtenir l'absorbance à 540nm. La lecture de cette série de solutions permettra de créer une droite d'étalonnage reliant l'absorbance à la concentration en nitrates. Ensuite, chaque échantillonnage passera à son tour dans l'automate et la concentration en nitrate sera directement renvoyée sur base de la droite d'étalonnage précédemment construite. Des blancs seront épisodiquement insérés afin de vérifier et de corriger la dérive de l'appareillage. En effet, il peut arriver que la concentration augmente ou diminue au fur et a mesure des passages dans la machine. Les blancs permettent de vérifier si la valeur lue ne dérive pas trop de la valeur réelle et de la corriger dans la mesure du possible. La droite d'étalonnage permet de mesurer une concentration allant jusque 6mg/l. Si une des solutions de sol est plus concentrée, il faudra entrer les valeurs de dilution afin que l'automate puisse diluer à nouveau les solutions et qu'on puisse recommencer l'opération.
Afin de déterminer la fraction massique en azote nitreux $w(NO_3 - N)$ dans les sols secs, on utilise la formule suivante :

$$w(NO_3 - N) = (a - b) * [(V_E/m_S) * (1 + (w_W/100) + (w_W/100)]$$

où :

- a est la concentration massique (mg/l) en NO_3–N dans l'extrait de sol
- b est la concentration massique (mg/l) en NO_3–N dans l'extrait à blanc
- V_E est le volume de solution d'extraction
- m_S est la masse de sol brut, utilisée pour l'extraction
- w_W est le pourcentage d'eau du sol brut mesuré en parallèle

On obtient alors une fraction massique en mg de NO_3–N par kg de sol. On intègre ensuite le rapport cailloux/terre ainsi que la densité apparente à l'état sec. Pour cette densité apparente, on utilise les valeurs standards suivantes : $1{,}35t/m^3$ pour la couche supérieure (0-30cm) et $1{,}5t/m^3$ pour les 2 autres couches (30-60cm et 60-90cm) en terre arable.

4.4.5. Comparaison avec les données APL dans d'autres cultures

Afin de confronter les résultats des analyses APL réalisées en culture de sapin de Noël, nous nous baserons sur différentes sources. Tout d'abord, les résultats des APL de référence calculée dans le cadre des contrôles effectués pour le PGDA. Le réseau de ferme, appelé SSA, ne comporte pas d'exploitation en culture de sapin de Noël. Cependant, il permettra de comparer les résultats obtenus avec des fermes ayant une gestion responsable de l'azote dans d'autres cultures principales en Wallonie. Les résultats obtenus pour ce réseau de ferme sont déjà interpolés sur toute la période de prélèvement, puisqu'ils servent de référence pour les autres fermes contrôlées dans le cadre du PGDA en Wallonie. Afin de comparer ces résultats avec les dates correspondant aux prélèvements réalisés en culture de sapin de Noël, nous avons procédé par méthode graphique. La figure 11, page 36, nous

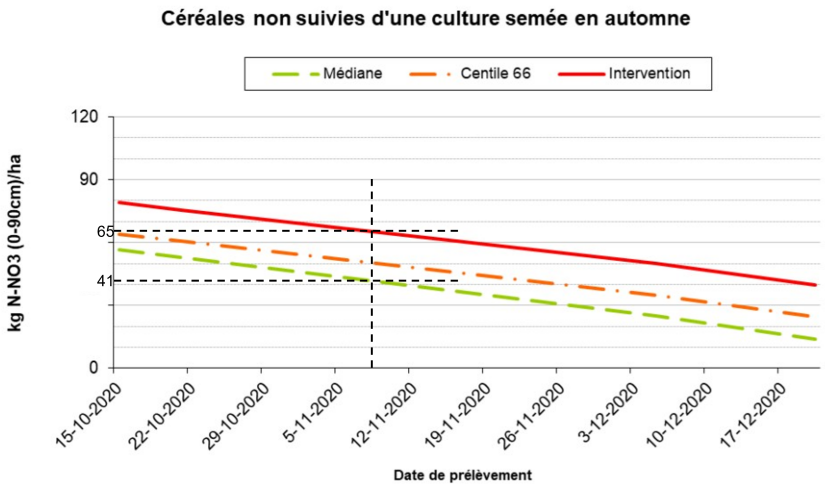


Figure 11 – Graphe de référence obtenu par extrapolation des résultats APL du réseau de ferme SSA pour la classe A2. Le graphe a été modifié pour montrer la méthode graphique utilisée pour interpoler les données.

montre un exemple de résolution graphique. Puisque nous savons que les sols ont été échantillonnés la semaine du 5 au 13 novembre en 2020, nous choisissons le point situé au milieu sur l'axe des abscisses, on remonte perpendiculairement vers les droites et on obtient la médiane et le seuil d'intervention, soit 41 et 65kg $N-NO_3^-$/ha pour l'exemple. On réitère l'opération pour les 8 différentes classes de culture et on rentre les différentes données dans un même graphique. Les données du réseau SSA ne sont pas pondérés en fonction de la superficie des parcelles échantillonnées. Nous ne pondérerons donc pas celles des APL des différentes parcelles échantillonnées afin de suivre la même méthode.

D'autre part, peu de fermes du SSA sont situées sur le territoire de l'étude, nous établirons donc aussi une comparaison grâce à 'une autre base de données établie au Centre de Michamps, concernant les résultats APL des trois cultures principales en Ardenne (céréales, mais d'ensilage et prairie).

4.5. Enquête sur les produits phytosanitaires et les engrais appliqués

4.5.1. Enquête

Les données concernant l'application des engrais et des produits phytosanitaires sont relativement sensibles à récolter auprès des producteurs de sapin de Noël. Dans l'optique d'obtenir un maximum de données, nous avons profité de la collaboration mise en place entre les GAL et les producteurs afin de récolter des données sur les parcelles du projet de gestion différenciée. Cela implique certains biais qui seront discutés plus tard. Cependant, les producteurs impliqués dans cette étude représentent une part non négligeable de la

superficie totale cultivée en sapin de Noël.
Il a été demandé aux producteurs de remplir un document Excel mentionnant, la date, la dose et le nom commercial du produit utilisé. Il leur a été demandé de remplir ce document pour l'année 2019 et 2020. A cause de l'appréhension des producteurs concernant l'utilisation possible des données renseignées, nous n'avons obtenu des données que pour 2020.

4.5.2. Pondération

Afin de pouvoir comparer les données récoltées avec des résultats généraux obtenus pour d'autres types de culture, nous avons pondéré celles-ci en fonction de la superficie cultivée par les différents producteurs. Deux hypothèses sont alors émises :

1. Les traitements appliqués sur les différentes parcelles suivies sont représentatifs de l'entièreté de la surface cultivée par le producteur
2. Les concentrations choisies par le producteur pour être appliquées sont représentatives de l'entièreté de la surface cultivée par le producteur.

Ces hypothèses ont l'avantage de nous permettre de comparer les données collectées avec des données pour d'autres cultures en Wallonie et en Ardenne Belge. Cependant, les conclusions tirées de cette étude devront être utilisés avec précaution. Tout d'abord, les données ont été obtenues par une enquête auprès des producteurs. Bien qu'une relation de confiance existe entre les membres du projet de gestion différenciée et les producteurs, il n'y aucune manière de garantir l'exactitude de celles-ci. De plus, la surface suivie par le projet ne dépasse pas 1 % de la superficie totale cultivée en Wallonie. Cependant, les producteurs concernés par le projet cultivent 58 % de cette superficie totale. Cela signifie que si ces hypothèses sont avérées, les résultats obtenus nous permettent d'obtenir une approche assez représentative de la situation actuelle en culture de sapin de Noël.

4.5.2.1 Méthode de pondération

Tout d'abord, nous avons recherché les matières actives et la concentration de celles-ci dans les produits utilisés sur le site internet www.fytoweb.be. Nous avons calculé la quantité totale de matière active pulvérisée sur le champ grâce à ces concentrations, à la dose renseignée par le producteur ainsi que la superficie totale de la parcelle en question. Nous avons sommé les valeurs obtenues pour chaque producteur et divisé par la surface totale suivie par producteur. Cela nous permet de pondérer chaque parcelle et d'avoir un chiffre en gramme de matière active utilisée par hectare pour chaque producteur. Selon les producteurs, la superficie suivie est plus ou moins représentative de la superficie totale cultivée.
Les moyennes par producteur seront ensuite multipliées par la superficie totale estimée ce chacun et divisée par la superficie totale couverte par ceux-ci. Cela permet d'avoir

un chiffre moyen de matière active appliquée en g/ha afin de pouvoir comparer avec l'application de produits phytosanitaires dans d'autres cultures en Wallonie.

4.5.2.2 Comparaison avec les phytosanitaires utilisés dans d'autres cultures wallones

Afin de comparer les valeurs obtenues (kg m.a./ha/an) avec d'autres cultures wallonnes, nous nous sommes basé sur les résultats de l'enquête du Comité Phyto et de l'ASBL Corder (Comité régional PHYTO et CORDER asbl, 2020). Ces données sont obtenues sur base des quantités vendues dans les différents secteurs d'activités. Les deux derniers rapports en date prennent en compte les données de vente de 2014 à 2017. Afin de limiter l'impact de la variabilité du climat en fonction des années, nous avons utilisé la moyenne des résultats obtenus durant ces années.
Les données présentées sont pondérées en fonction de la superficie des différentes cultures. Nous opérerons donc à la même pondération dans les différentes parcelles de sapin de Noël afin de prendre en compte les différences d'application entre les producteurs. Le document reprend une valeur pour chaque différentes sortes de céréales cultivées. Afin de respecter les classes de culture établies pour les APL de références et pour faciliter la lecture du graphique, nous effectuerons une moyenne pondérée en fonction de la surface des trois céréales les plus cultivées en Wallonie (froment d'hiver, escourgeon, épeautre). Malgré les biais induis par les lieux et dates différents, ces données nous permettront tout de même d'établir un état de lieu de la filière par rapport à d'autres cultures importantes en Wallonie.
Nous avons également bénéficié d'une base de données du centre de Michamps concernant les applications de produits phytosanitaires sur les céréales cultivées en province du luxembourg de 2017 à 2020. Cette base de données est établie grâce aux données d'enquête sur les pratiques en culture de céréales. Elle est établie dans le cadre du projet de suivis en culture sur le territoire du Parc Naturel Haute-Sûre Forêt d'Anlier (PNHSFA) et nous permettra d'établir une comparaison un peu plus précise d'un point de vue géographique. Ces données sont obtenues sur base d'une participation volontaire des agriculteurs et d'un suivi régulier des exploitations. Le nombre de données de l'échantillon est de 188 pour une surface totale de 974 ha.

4.6. Etude de la toxicité des différents herbicides utilisés

Les données ont été récoltées sur le site canadien SAgE pesticides (CRAAQ, 2021) [5]. Il attribue un niveau de toxicité de faible à extrêmement élevé pour différentes catégories en fonction des critères présentés dans la section 2.8.2.2. Pour la facilité de lecture du tableau, un niveau de toxicité faible sera noté 0, léger (+), modéré (++), élevé(+++) et

5. Ce site est l'équivalent du site fytoweb pour le Québec.

extrêmement élevé (+++). Le résultat obtenu pour la toxicité humaine reprend des tests de toxicité aigüe ainsi que les effets à long termes.

4.7. Conseils de fertilisation

L'objectif premier des analyses de sols était de permettre au centre de Michamps de fournir une expertise scientifique et des conseils de fertilisation adapté à chaque parcelle. A l'aide d'une traduction d'un document sur la culture de sapin de Nordmann en Autriche(Baumgarten et al., 2008), le centre a réalisé une estimation des quantités d'azote nécessaires pour chaque parcelle. Ces conseils de fertilisation ont été fournis pour l'année 2020 uniquement puisque les premières analyses de sol ont été réalisées en 2019. Grâce aux données récoltées sur la fertilisation appliquée en 2020, nous pourrons étudier l'impact du surplus de fertilisation par rapport aux conseils de fertilisation fournis. Un exemple de feuille de conseil est présenté dans l'annexe B.

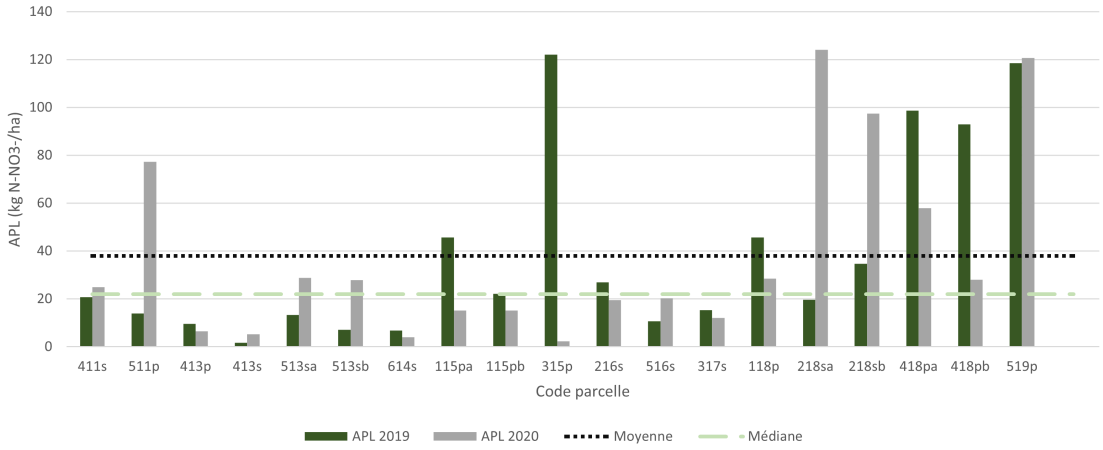


Figure 12 – Résultats APL des différentes parcelles échantillonnées en 2019 et 2020

5 Résultats

5.1. Respect de l'anonymat

Afin de respecter l'anonymat des producteurs et ne pas dévoiler leurs pratiques, nous les désignerons par un numéro. Le nom des différentes parcelles portera un code afin de les différencier. Ce code sera composé du numéro du producteur suivi des deux derniers chiffres de l'année de plantation ainsi que la première lettre du précédent cultural, "p" pour prairie et "s" pour sapin de Noël. Si deux parcelles portent le même numéro de producteur, la même année de plantation et le même précédent, une lettre sera ajoutée pour les différencier. De cette manière, le nom de code nous donnera toutes les informations importantes de la parcelle sans dévoiler l'identité du producteur.

5.2. Résultats Azote Potentiellement Lessivable

5.2.1. Résultats généraux

La figure 12 nous montre les résultats APL dans les parcelles échantillonnées en automne 2019 et 2020. La valeur moyenne pour les deux années est égale à 37kg $N-NO_3^-$/ha et la médiane est égale à 21kg $N-NO_3^-$/ha. Ces valeurs sont affichées sur le graphique pour plus de clarté. Les moyennes et médianes pour chaque année sont très similaires et sont indiquées dans le tableau 3. Pour rappel (voir section 2.6), nous considérons qu'une valeur d'APL inférieure ou égale à 50 kg/ha est un bon résultat dans le sens ou elle n'entraîne pas de pollution nitrique. Pour la majorité des parcelles, les résultats obtenus sont très différents d'une année à l'autre, avec plus de 50% de variation pour 12 parcelles sur

20. Pour les parcelles plus vieilles (511p, 513sa, 513sb), vers la gauche du graphique, le déboisement et donc la différence entre le nombre d'arbres dans la parcelle pour les deux années pourrait expliquer les augmentations des reliquats azotés. Même si la fertilisation est généralement adaptée en fonction de l'estimation du nombre d'arbres restants, l'azote est épandu uniformément sur toute la parcelle et donc la différence de couverture et de prélèvement d'azote par les racines est conséquente. C'est particulièrement vrai pour la parcelle 511p, qui en était à sa dernière année d'exploitation. En effet, puisque la totalité des arbres a été coupée pendant l'automne, il ne reste plus aucun arbre pour prélever l'azote minéralisé pendant la fin de la période de minéralisation. Pour les parcelles 313p et 315p, une forte diminution des résultats APL entre l'année 2019 et 2020 est observée. Une explication plausible pourrait être le changement radical de pratiques de fertilisation de l'agriculteur, sur base des conseils fournis par le Centre de Michamps. Cependant, le manque de données de fertilisation pour l'année 2019 ne nous permet pas de vérifier cette hypothèse. Les parcelles 418pa et 418pb ont des résultats élevés (99 et 93 kg/ha) en 2019. En 2020, les deux parcelles ont des résultats bien plus bas (58 et 28 kg/ha). Cela est cohérent avec les deux années de minéralisation excessive suivant le retournement de prairie observé par Lambert et al. (2015) en culture classique. A contrario, la minéralisation excessive pour la parcelle 519p est visible sur la figure. En effet, bien qu'elle n'aie pas du tout été fertilisée, les valeurs sont anormalement hautes pour les deux années de culture (118 et 121 kg/ha). Enfin, les résultats des parcelles 218sa et 218sb sont très difficiles à expliquer. En effet, en 2019, les résultats APL sont bons (20 et 35 kg/ha). En 2020, une fertilisation azotée relativement faible a été appliquée (14 kg N/ha). Pourtant,nous observons une augmentation drastique des résultats APL pour cetta année (124 et 97 kg/ha). Le précédent cultural est une parcelle de sapin de Noël, il n'y a donc pas de raisons qu'il y ai une minéralisation excessive. Il est possible que les informations fournies à propos de la fertilisation soit inexactes ou qu'il y ai eu des imprécisions au niveau des mesures APL.

Les résultats des parcelles pâturées par des moutons n'ont pas été pris en compte dans la moyenne. Cependant, il est intéressant de noter que les résultats APL sont très bons puisque malgré leur jeune âge les deux parcelles sont en-dessous de la médiane pour 2019 (20 et 0 kg/ha) et 2020 (11 et 4 kg/ha).

La majorité des valeurs élevées le sont vers la droite du graphe, c'est-à-dire pour des jeunes parcelles. C'est encore plus flagrant pour l'année 2020 où toutes les parcelles âgées de 3 ans ou plus, -à l'exception de la parcelle 511p-, sont en dessous de la moyenne générale. En 2019, 64% des parcelles de trois ans ou plus sont en-dessous de la médiane. En 2020, les résultats atteignent 71%. Cela montre bien que les APL élevés semblent plutôt être des épisodes exceptionnels pour ces parcelles. La prochaine question est donc de comprendre les causes de ces variations.

Tableau 3 – Variabilité du reliquat azoté (en kg $N-NO_3^-$/ha) en culture de sapin de Noël dans la couche 0-90cm durant l'année 2019 et 2020

	2019	2020
n	20	20
Minimum	2	2
Maximum	122	124
Médiane	21	20
Moyenne	37	35
Écart-type	38,7	38,1

5.2.2. Lien entre la classe d'âge et le résultat APL

Étant donné le peu de répétitions disponibles pour les différentes années de plantation des parcelles, il n'est pas possible de réaliser une analyse avec un niveau pour chaque année. Nous avons donc séparé les parcelles en deux groupes. La limite a été fixée à trois ans pour différentes raisons. D'abord la littérature conseille de ne pas fertiliser les plantations de sapin de Noël pendant les deux à trois premières années après la pépinière (Baumgarten et al., 2008 ; Oregon State University, 2009) ce qui montre que l'absorption d'azote est faible à ce moment et donc que le potentiel de lixiviation est plus important. De plus, les parcelles cultivées après une prairie retournée vont subir une minéralisation excessive pendant deux ans après l'installation de la culture. Enfin, nous nous sommes adaptés avec les données pour éviter que les groupes ne changent d'une année à l'autre. Le données sont non balancées et non normales. Nous avons donc utilisé les tests non-paramétriques de Wilcoxon et de la médiane (Rakotomalala, 2008) pour confirmer que la différence était significative. La figure 13 atteste de cette différence d de médiane entre les parcelles âgées de moins de trois ans et celles âgées de plus de trois ans. La ligne horizontale au milieu boites indique la médiane. Elle est de 77 kg/ha pour les arbres de mois de trois ans alors et seulement de 15 kg/ha pour pour les autres arbres. La médiane générale est de 21kh/ha comme mentionné précédemment. Une majorité de la variabilité importante de l'échantillon provient des jeunes parcelles. Il n'est pas pertinent de discuter des autres valeurs du graphe étant donné l'hypothèse de non normalité.

5.2.3. Lien entre le pH et le résultat APL

Bien qu'il ait été démontré qu'il n'y a pas de lien entre le pH d'une parcelle et son résultat APL en culture classique (C. Vandenberghe, 2016), les résultats obtenus en culture de sapin de Noël laissaient entrevoir une corrélation entre ces deux grandeurs (figure 14). Nous l'avons vérifié à l'aide d'une régression linéaire.

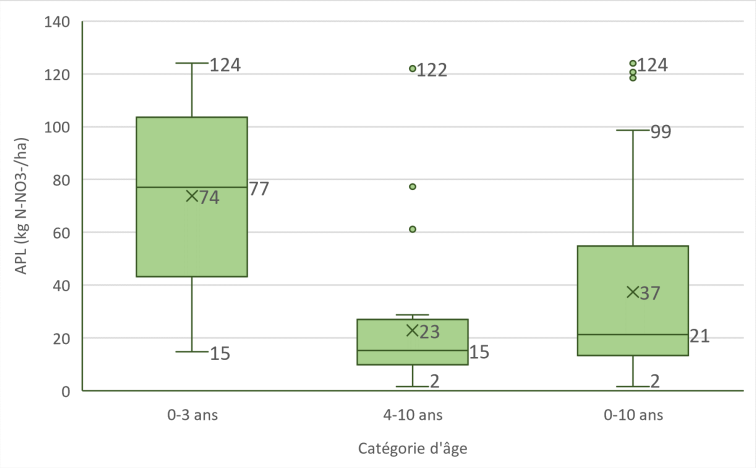


Figure 13 – Répartion des résultats APL en fonction de la classe d'âge. Données de 2019 et 2020

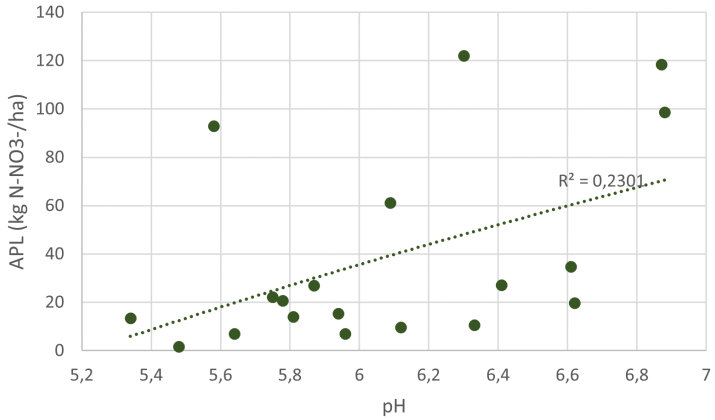


Figure 14 – Évolution des résultats APL de l'automne 2019 en fonction du pH

Il existe une corrélation positive entre ces deux valeurs. Comme les données ne suivent pas une distribution normale, nous l'avons vérifié grâce au test de Pearson et de Spearman(Rakotomalala, 2008). Les deux tests sont significatifs (p-valeur<0,05). Étant donné les conclusions tirées en culture classique, nous avons cherché si un autre facteur ne pouvait pas faire varier le pH et l'APL en même temps. Un test de Wilcoxon entre le pH et deux différentes classes d'âge (<= 5 ans et >5ans [6])permet de révéler une différence de moyenne significative entre les deux populations et donc une certaine corrélation entre le pH et l'âge des parcelles.

5.2.4. Étude des profils en fonction des différents horizons prélevés

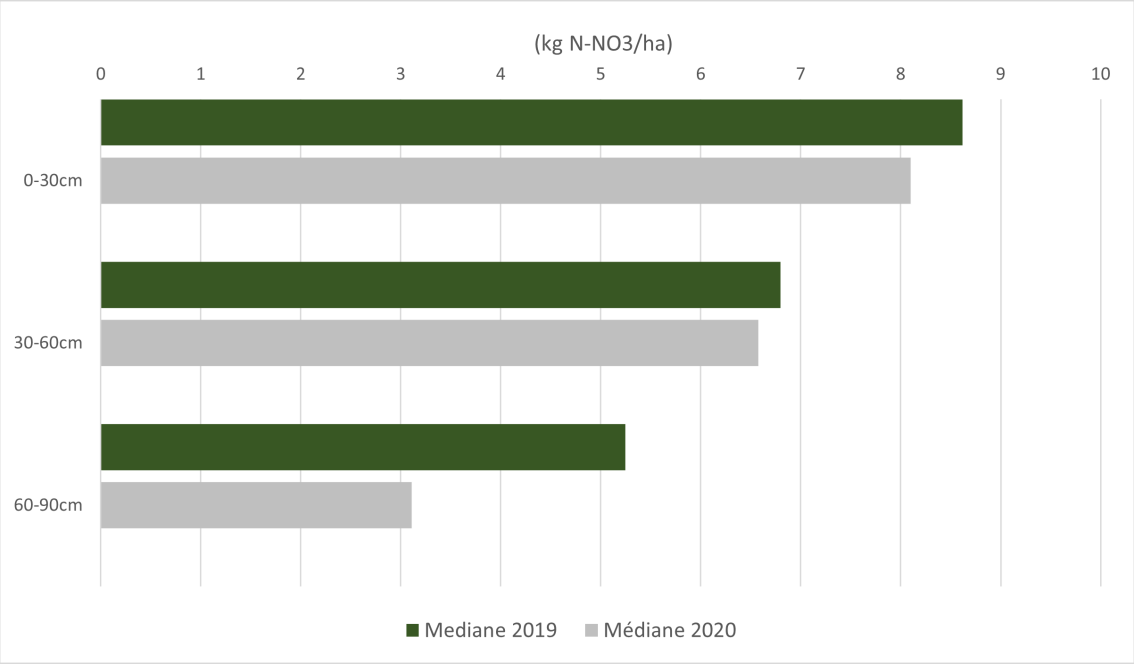


Figure 15 – Comparaison des valeurs médianes de l'APL (kg $N-NO_3^-$/ha pour les différents horizons prélevés (0-30,30-60,60-90cm) en 2019 et 2020

La figure 15 nous montre la répartition du nitrate pour les différents horizons prélevés pour l'année 2019 et 2020. Le même genre de profil est observé, avec des valeurs un peu plus faibles pour 2020 que pour 2019, malgré le fait que les parcelles ont été échantillonnées plus tôt et qu'elles aient subi moins de drainage. Ce phénomène est observable en regardant le dernier horizon qui est plus chargé en nitrate durant l'année 2019 que l'année 2020. Cela pourrait s'expliquer par une plus grande partie du nitrate qui a été lessivé dans l'horizon inférieur durant l'année 2019 à cause du drainage plus important. Toutefois, les

6. il n'y a pas de raisons valables d'utiliser les classes d'âge telles que déterminées plutôt dans ce mémoire. Nous avons donc séparer les classes d'âge à la médiane et en vue d'équilibrer le nombre de données pour chaque population (n=8 et n=11). Cela dit, le test est significatif également lorsque les classes d'âges utilisées plutôt dans cette étude sont choisies.

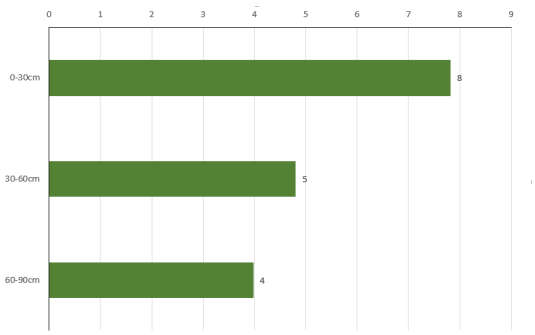


Figure 16 – Évolution des valeurs médianes de l'APL (kg $N-NO_3^-$/ha en fonction de l'horizon (0-30,30-60,60-90cm) pour les arbres âgées de deux ans et plus en 2019

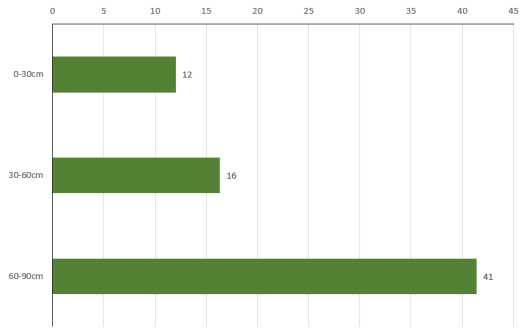


Figure 17 – Évolution des valeurs médianes de l'APL (kg $N-NO_3^-$/ha en fonction de l'horizon (0-30,30-60,60-90cm) pour les arbres âgées de moins de deux ans en 2019

Tableau 4 – Moyenne de fertilisation azotée pour les différents producteurs suivis par le projet

N°Producteur	Moyenne (kg/ha)	Âge moyen des parcelles
1	10	4
2	14	2,67
3	60,27	5
4	64,17	5,4
5	53,97	5,6
Moyenne générale	**44,83**	**4,53**

populations de l'horizon 60-90 cm en 2019 et 2020 ne sont pas significativement différentes au sens du test de Wilcoxon et du test de la médiane et il n'est donc pas possible de tirer de conclusion de ces résultats.

Nous observons sur la figure 16 et 17 l'évolution du profil en nitrate aux différentes profondeurs en fonction de la classe d'âge. Les valeurs indiquées sont les médianes obtenues pour chaque horizon. L'ordre de grandeur est totalement différent pour les deux classes d'âge puisqu'il ne dépasse pas les 10kg/ha pour les arbres âgés de deux ans ou plus et ce quelque soit l'horizon alors qu'il est compris entre 16 et 41kg/ha pour les autres. Nous pouvons aussi constater que le profil est décroissant en se dirigeant vers les horizons de profondeur pour les arbres plus vieux alors qu'il est croissant pour les arbres plus jeunes. Nous obtenons le même type de profil pour l'année 2020 ce qui confirme les observations réalisées en 2019.

5.2.5. Lien entre le surplus de fertilisation et le résultat APL

Le tableau 4 présente des informations sur l'application moyenne de fertilisants azotés en fonction des producteurs. Nous pouvons observer les différences conséquentes entre les pratiques de fertilisation azotée. Une partie de ces variations est expliquée par l'âge moyen des parcelles qui diverge entre les producteurs. L'application moyenne sur la surface suivie

est de 44,83 kg/ha. Par comparaison, les quantités moyennes d'engrais minéraux appliqués sur les sols agricoles wallons étaient de 96,4 kg/ha de SAU. Dans les classes de culture conventionnelles utilisées dans le SSA, il existe une corrélation forte entre les pratiques de fertilisation de l'agriculteur et le résultat APL (C. Vandenberghe, 2016). Afin de vérifier si la même corrélation existe en culture de sapin de Noël, nous avons vérifié les données de surplus de fertilisation avec les résultats APL. Le graphique obtenus n'indique aucun lien entre le surplus de fertilisation et l'augmentation résultats APL. En réalité, certains parcelles n'ayant pas été surfertilisée ont des résultats APL très haut. Les surplus importants sont souvent observés pour les parcelles les plus âgées.

5.2.6. Comparaison des résultats APL avec les APL de référence du réseau SSA

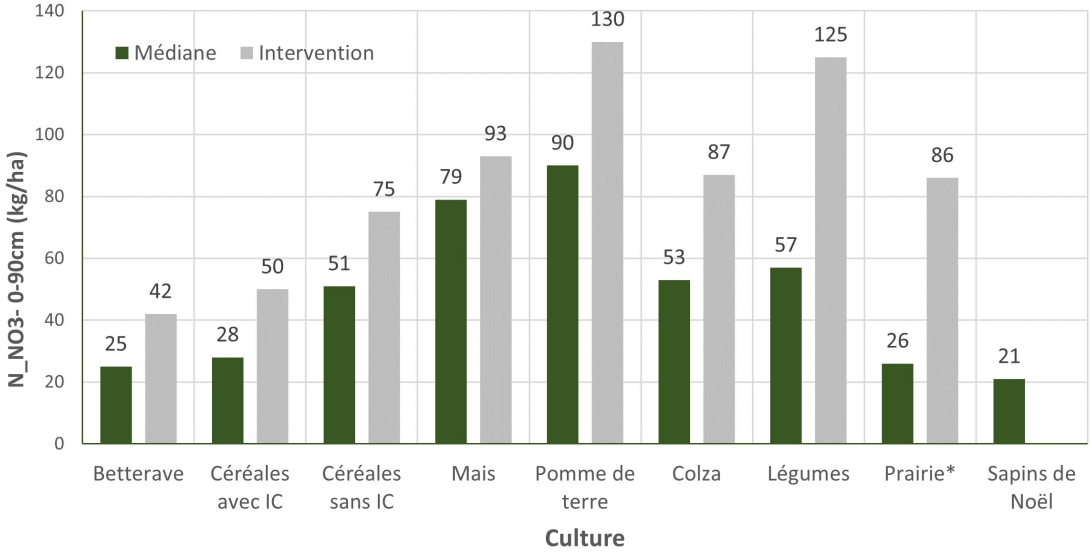


Figure 18 – Comparaison des médianes des résultats APL pour les différentes classes de cultures du réseau SSA et des sapins de Noël pour l'automne 2019

Ce graphique permet de comparer la situation des APL en culture de sapins de Noël avec les autres cultures principales en Wallonie [7]. Comme nous pouvons l'observer, la médiane obtenue est la plus basse de toutes les cultures confondues (21 kg/ha). Seule la betterave a des résultats du même ordre de grandeur que les plantations de sapins de Noël (25 kg/ha). Le seuil de tolérance ne peut pas être calculé pour les sapins de Noël par manque de données et d'années de suivi. Le graphique tient également compte de la séparation entre les classes d'âge. Il nous indique que la classe d'âge 0-3 ans est problématique dans le sens ou sa médiane (69kg/ha) dépasse la valeur critique de 50kg/ha. De plus, c'est la 4ème valeur la plus mauvaise quand elle est comparée aux autres cultures. Le constat est inverse pour les parcelles de la classe d'âge 4-10 ans.

7. Les résultats en prairie sont doublés afin de comparer avec les autres cultures sondées jusque 90cm.

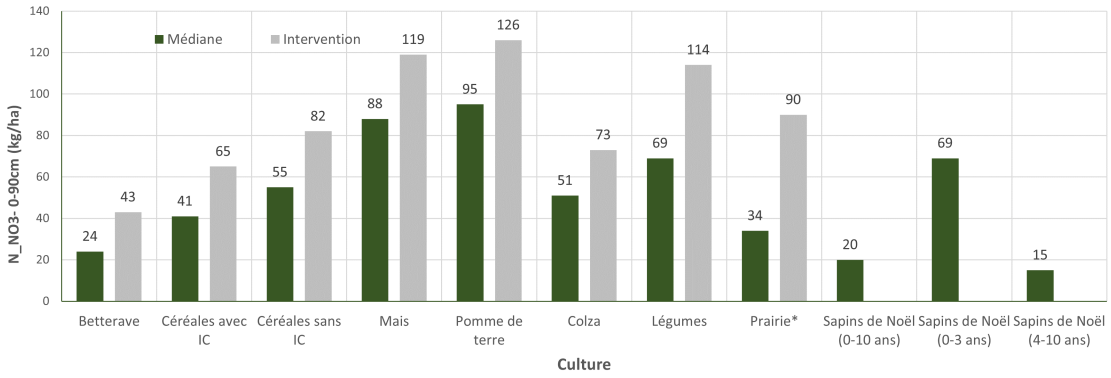


Figure 19 – Comparaison des médianes des résultats APL pour les différentes classes de cultures du réseau SSA et des sapins de Noël pour l'automne 2020

En 2020, les résultats obtenus sont similaires, avec une médiane inférieure à toutes les autres cultures pour la totalité de la population.

5.2.7. Comparaison des résultats APL avec d'autres cultures en Ardenne Belge

Le paragraphe précédent permet de montrer que la culture de sapin de Noël possède des valeurs moyennes de résultats APL relativement basses par rapport aux autres cultures principales en Wallonie. Nous avons donc également comparé les données obtenues avec une base de données du centre de Michamps sur les principales cultures en Ardenne belge

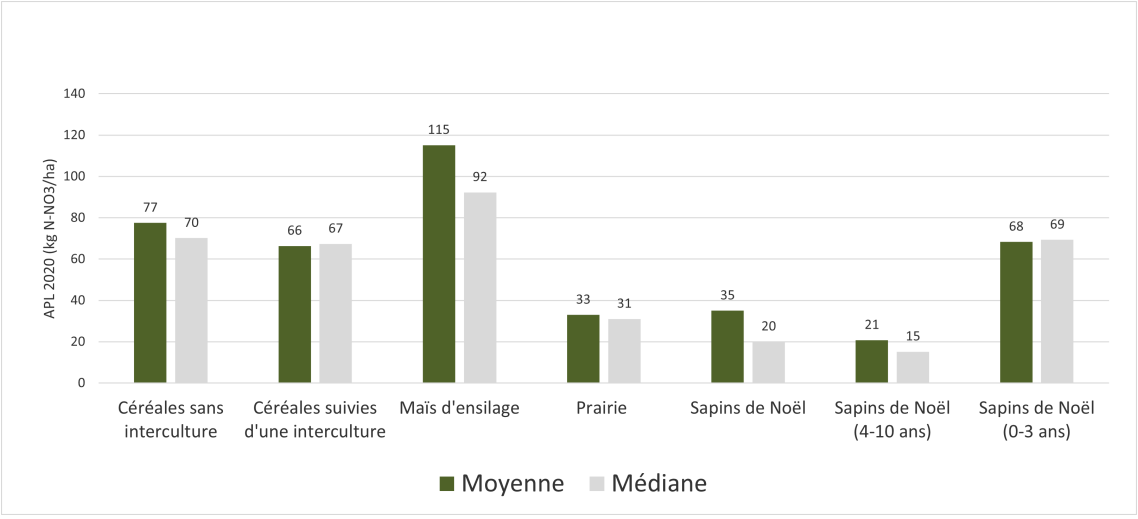


Figure 20 – Comparaison des résultats des analyses APL pour les principales cultures en Ardenne Belge pour l'année 2020

Tableau 5 – Application de produits phytosanitaires par les différents producteurs en kg de matière active par hectare

N°Producteur	Moyenne (kg/ha)	Nombres de parcelles
1	1,62	3
2	0,11	3
3	0,056	3
4	0,41	5
5	1,63	5
6	0	1

La figure **??**nous indique que les résultats APL des cultures de sapins de Noël ont des niveaux deux fois plus bas que les céréales et presque trois fois plus bas que le maïs d'ensilage.

5.3. Produits phytosanitaires

Avant de commencer ce chapitre, il est important de rappeler que les données récoltées l'ont été uniquement sur base d'enquête des producteurs. Il est possible que certains d'entre eux n'aient pas compléter le formulaire de manière sérieuse. Bien qu'il est intéressant d'avoir un état des lieux de la filière par rapport à d'autres cultures, il n'est pas possible de généraliser les résultats obtenus pour l'ensemble de la filière.

5.3.1. Synthèse des matières actives utilisées

Le tableau 5 atteste des grosses divergences en matière d'utilisation de produits phytosanitaires entre les différents producteurs suivis par le projet. Ces différences sont expliquées majoritairement par les différences de pratique en terme d'application d'herbicides. Les applications de fongicides et d'insecticides sont relativement marginales puisqu'elles ne représentent que 5 et 3% de la totalité des matières actives. Enfin, un horticulteur utilise de l'isodecyl alcool ehtyoxylate. C'est un agent mouillant qui sert à renforcer l'efficacité des herbicides et fongicides en optimisant la fixation et le mouillage de la bouillie de pulvérisation à la surface de la plante. Cela représente 4% de la totalité de matière active pulvérisée sur la superficie suivie.

5.3.1.1 Herbicides

Le glyphosate représente 86% en pourcentage massique des matières actives utilisées comme herbicide dans les parcelles suivies. Il est utilisé par quatre producteurs sur six sur 73% de la surface suivie. Lorsqu'il est utilisé comme seul herbicide, les applications de varient entre 0,72 et 1,62 kg/ha. Sinon il est appliqué à 0,54 kg/ha avec du flazasulfuron à 0,050 kg/ha. La moyenne d'application de glyphosate sur l'ensemble de la surface suivie

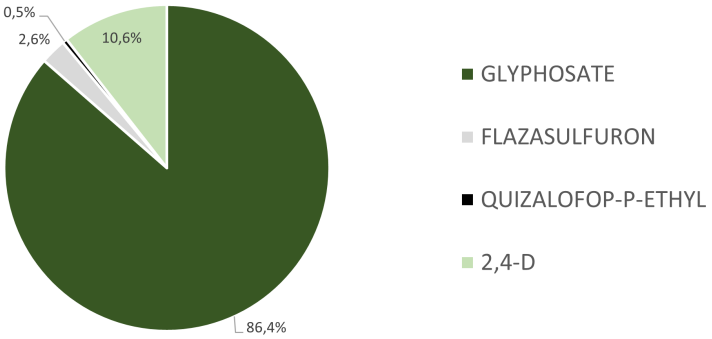


Figure 21 – Répartition des matières actives utilisées comme herbicides

est de 0,75 kg/ha. La limite légale est de 3,6 kg/ha/an. Les producteurs utilisent en général la même recette d'herbicides sur toutes leurs parcelles. Le producteur 3 n'applique pas de de glyphosate et n'utilise que du flazasulfuron à 0,050 kg/ha ou du quizalofop-p-ethyl à 0,150 kg/ha. Néanmoins, les données de celui-ci sont à analyser avec prudence puisqu'il indique ne pas avoir désherbé chimiquement une parcelle alors que les populations d'adventices étaient totalement absentes lors des prélèvements et photos aériennes. Les figures



Figure 22 – Photo aérienne d'une parcelle plantée en 2018 et désherbée avec 1,620 kg de glyphosate à l'hectare



Figure 23 – Photo aérienne d'une parcelle plantée en 2017 et désherbée à l'aide de 45g/ha de flazasulfuron

22 et 23 indiquent l'état de la végétation en décembre lors des prises de vues aériennes. Il ne semble pas y avoir de différences à ce niveau malgré les différences conséquentes entre les traitements herbicides utilisés sur les parcelles. Les tâches vert clair présentes sur la photo de droite sont des tâches de mousse, présente de manière aléatoire sur toutes les parcelles ayant subis des traitements avec des herbicides, peu importe leur concentration.

Tableau 6 – Application d'insecticides par les producteurs

Substance active	Application (kg/ha)	Pourcentage massique de l'application d'insecticides
Spirotetramate	0,04	56%
Cypermethrine	0,02	22%
Indoxacrabe	0,03	23%
Lambda-cyhalothrine	indéterminée	0%

5.3.1.2 Insecticides

En ce qui concerne les insecticides, les données sont très variables également. Quatre producteurs sur six affirment n'en avoir pas utilisés durant l'année 2020. Un des producteurs indique n'utiliser que quelques ml/ha de lambda-cyhalothrine sur les sapins commercialisables. Le dernier en a appliqué sur toutes ses parcelles. Les substances pulvérisées sont le spirotetramate (0,040 kg/ha), l'indoxacarbe (0,030 kg/ha), et la cypermethrine(0,020 kg/ha). Elles sont appliquées presque systématiquement sur les parcelles de ce producteur.

5.3.1.3 Fongicides

Un seul producteur a indiqué avoir utilisé un fongicide durant l'année 2020. La matière active appliquée est l'azoxystrobine et la dose est de 0,125kg/ha. Il n'est pas étonnant d'observer peu d'application de fongicides vu la sécheresse de l'année d'étude. C'est un fongicide appliqué de manière préventive. La dose appliquée est la moitié de la dose maximale autorisée à l'hectare par an.

5.3.2. Comparaison entre les quantités de matière active utilisées dans différentes filières wallonnes

Nous observons sur la figure 24 une comparaison des matières actives utilisées en sapin de Noël et dans d'autres grandes cultures en Wallonie. Ces résultats sont basées sur des données de vente récoltées en Wallonie(Comité régional PHYTO et CORDER asbl, 2020). Nous observons que la moyenne d'application de matières actives sur les parcelles suivies (0,98 kg/ha) est dans le même ordre de grandeur que le maïs d'ensilage (1,30 kg/ha) et plus de deux fois inférieure à celle des céréales les plus cultivées. La médiane d'application entre toutes les cultures reprises dans l'étude du comité phyto est de 1,81kg/ha. Cela signifie que même le producteur avec la plus grosse application de phytosanitaire de l'échantillon étudié (1,62 kg/ha) est en-dessous de cette médiane et donc que plus de 50 % des autres cultures en Wallonie sont plus consommatrices de produits phytosanitaires. Le graphique montre aussi le fossé énorme entre la culture de sapins de Noël et des cultures extrêmement gourmandes en matières actives : pomme de

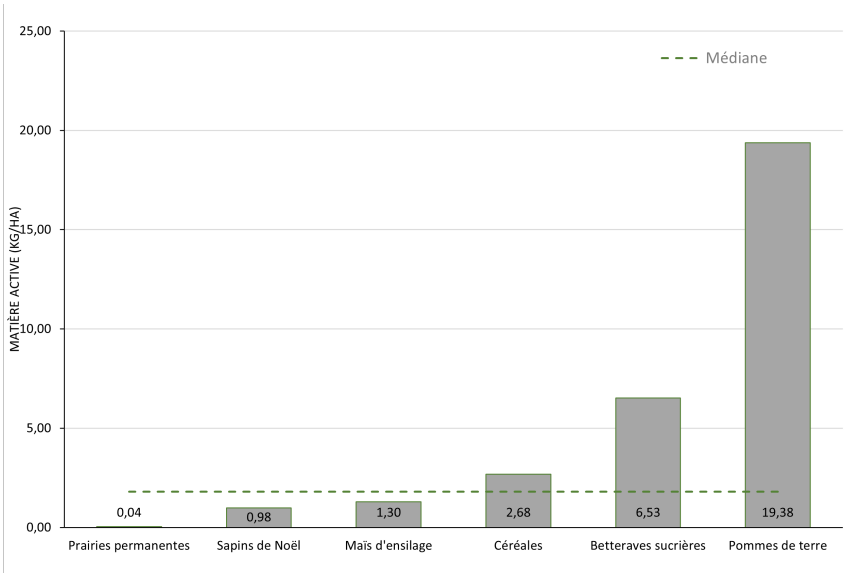


Figure 24 – Comparaison de la quantité de matière active (kg/ha) utilisée par type de culture en Wallonie (Comité régional PHYTO et CORDER asbl, 2020)

Tableau 7 – Comparaison de la toxicité des herbicides utilisés en culture de sapins de Noël

Matière active	Humains	Poissons	Oiseaux	Abeilles	Persistance	Lessivage
Flazasulfuron	++	0	0	0	++	+++
Glyphosate	+	+	+	+	0 à ++	0 à ++
2,4-D	+++	++	++	0	+	++
Quizalofop	+	++++	0	0	0	0

terre (19,38 kg/ha), betterave sucrière (6,53 kg/ha) et fraises (73,09 kg/ha). La moyenne d'application pour les données rassemblées par le centre de Michamps sur les céréales cultivées en Ardenne est de 1,46 kg/ha. Ces données sont une moyenne d'application sur les années 2017 à 2020 afin de diminuer l'effet de la variation inter-annuelle.Dans le même contexte géographique, l'application moyenne de phytosanitaires est moindre pour la culture de sapin de Noël que pour les céréales.

5.3.3. Étude de la toxicité des produits phytosanitaires utilisés

Nous pouvons observer sur la figure 7 la toxicité des herbicides utilisés en sapins de Noël. Elles ont été récoltées sur le site canadien sAgE Pesticides. Il est intéressant de noter que la toxicité pour les êtres vivants est systématiquement plus importante pour les autres herbicides utilisés en culture de sapins de Noël que pour le glyphosate selon la classification du site internet. Pour ce qui est de la persistance et du lessivage, les données sont plus controversées . Cependant, nous observons que chaque substance alternative a une toxicité élevé pour au moins un des points du tableau, ce qui n'est pas le cas du glyphosate. Dans un rapport de 2020, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2020) a classé les pesticides en fonction des dangers qu'ils présentent pour la santé humaine. Le glyphosate et le flazasulfuron se situent dans la catégorie des substances actives légèrement

dangereuses alors que le quizalofop-p-éthyl ainsi que le 2,4-D sont classées modérément dangereuses.

5.4. Synthèse de la comparaison avec les principales cultures wallones

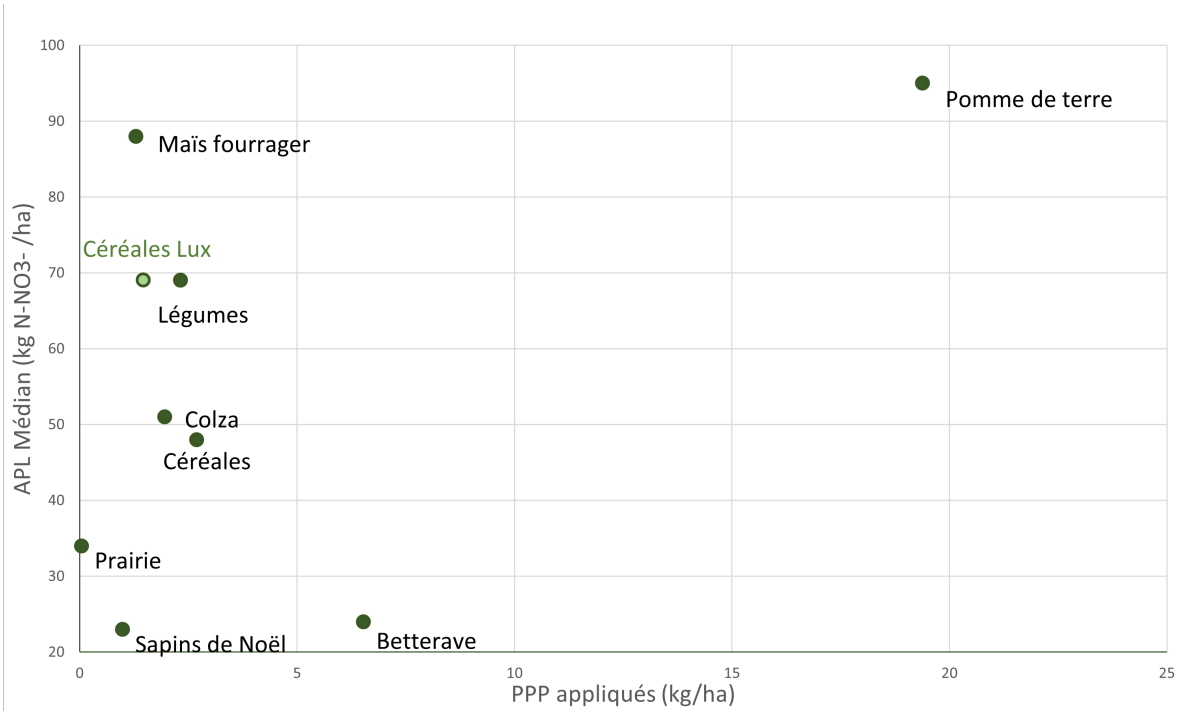


Figure 25 – Étude de l'impact environnemental des principales cultures wallones et des sapins de Noël grâce aux indicateurs des matières actives appliquées (kg/ha) et des résultats APL (kg/ha).

La figure 25 permet de synthétiser les résultats présentés dans les deux sections précédentes. L'axe horizontal évolue en fonction de la quantité de matière active appliquée (kg/ha) tandis que l'axe vertical évolue en fonction des APL (kg/ha) croissants. L'impact environnemental désastreux de la pomme de terre, que ce soit du point de vue de la lixiviation du nitrate ou pollution due aux PPP, est observable sur ce graphe. La betterave, seule culture avec des résultats APL semblables aux sapins de Noël, consomme plus de six fois plus de PPP que celle-ci. La prairie, elle, a un impact quasi nul au niveau des produits phytosanitaires mais a des résultats APL plus élevé. les autres cultures sont approximativement sur une même ligne verticale et varient surtout en fonction de la médiane des résultats APL.

Ces résultats sont encore plus flagrants si la superficie totale cultivée dans chaque culture est prise en compte. Sur la figure 26, nous avons multiplier les applications moyennes de PPP par les superficies renseignées dans le rapport du SPW sur l'utilisation

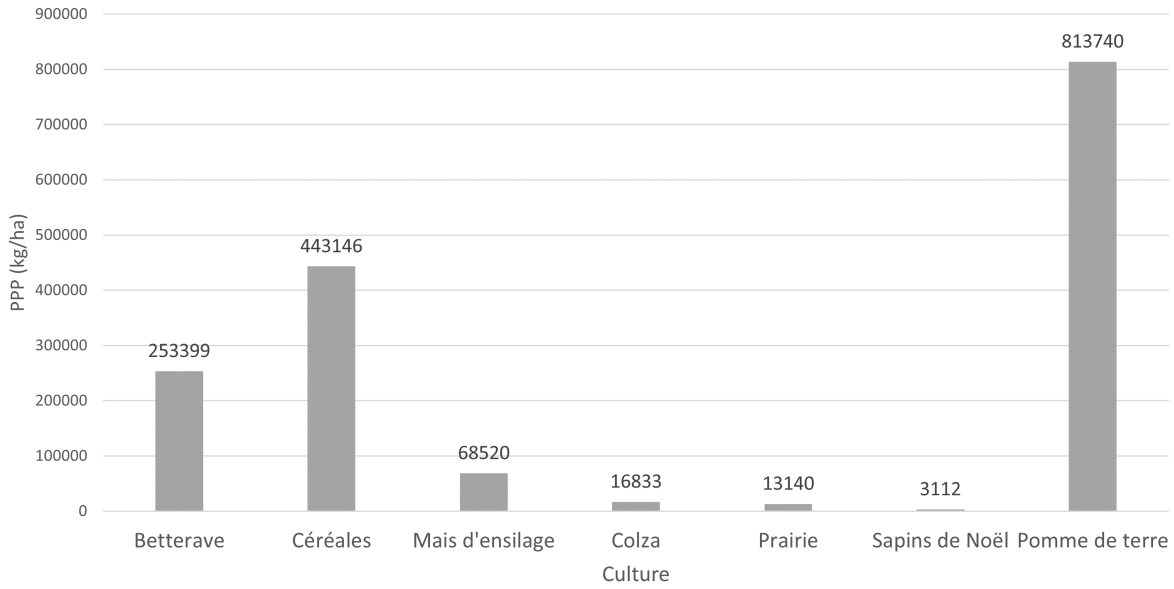


Figure 26 – Applications de produits phytosanitaires pondérées par la superficie totale cultivée

de la surface agricole (SPW, 2020). La figure démontre bien l'impact négligeable de la culture de sapins de Noël sur la quantité totale de PPP utilisés par rapport à d'autres cultures wallones. Elle représente seulement 3112 kg par rapport a des cultures comme les céréales qui atteignent presque 443 000 kg ou la pomme de terre avec 813 000 kg de matière active.

6 Discussion

6.1. APL

6.1.1. Date d'échantillonage et différence entre 2019 et 2020

Nous n'avons établi qu'une seule mesure des reliquats azotés par an. Cela est suffisant pour avoir un ordre de grandeur de l'APL et le comparer avec les courbes de référence obtenues dans d'autres classes de culture. Cependant, cela ne nous permet pas d'étudier la dynamique du nitrate dans le sol en période de lixiviation et cela pose problème pour comparer les deux années entre elles. En effet, la majorité des classes de culture ont un APL qui diminue de manière linéaire d'octobre à décembre à cause du drainage important du nitrate à cause précipitations. Il est probable que le même phénomène se déroule en sapin de Noël. Il est donc possible que si nous avions échantillonnés en 2020 à la même date qu'en 2019 une plus grande partie du nitrate aurait été déjà lixivié et les résultats APL de 2020 auraient été moins élevés également. En effet, si la différence de classe d'âge à un effet sur le résultat APL, il aurait été attendu que les résultats soit bien plus faibles en 2020 qu'en 2019. D'autre part, les producteurs n'ont reçu de conseils de fertilisation qu'en 2020 et un impact plus important de ceux-ci dans les résultats aurait pu être attendu. Quoiqu'il en soit, il est difficile de comparer les résultats entre les deux années à cause de la variation de précipitations inter-annuelle.

6.1.2. Variation de l'APL en fonction de la classe d'âge

Bien que le nombre de parcelles échantillonnées ne soit pas assez important pour tirer des conclusions, il semble que l'âge des parcelles semble avoir un impact significatif sur le résultat APL. Alors que les valeurs élevées semblent accidentelles lorsque les parcelles sont âgées, elles sont presque systématiques avec des jeunes parcelles. Cet enjeu a déjà été observé en peuplement forestier de Douglas de différentes classes d'âge. Selon Ranger, 2001, les pertes par drainage sont très élevées dans un jeune peuplement et diminuent très nettement avec l'âge. Cela pourrait être du à la nitrification excessive du au passé agricole de la parcelle, ce qui est semblable à la situation observée en culture de sapin de Noël. En effet, les jeunes arbres ont des systèmes racinaires bien moins développés et moins profonds que les arbres plus vieux. Dans un premier temps, les conifères développent principalement des racines peu profondes et fines pour progressivement laisser places à des racines plus larges et qui vont progressivement explorer les horizons plus profond du sol. De plus, lorsque les arbres sont jeunes, leur accroissement de biomasse est plus faible et ils exportent logiquement moins de nutriments et donc les reliquats azotés sont plus important. D'autre part, la minéralisation excessive engendrée par le retourne-

ment de la prairie peut expliquer les valeurs obtenues pour les jeunes parcelles plantées sur d'anciennes prairies permanentes retournées. Enfin, l'inhibition biologique de la nitrification est corrélée au développement des racines(Laffite et al., 2020).Une hypothèse plausible est que les jeunes arbres n'ont pas des racines suffisamment développées pour inhiber la nitrification due à la minéralisation naturelle contrairement aux arbres plus vieux. Cet impact n'a pas encore été étudié en plantation de sapin de Noël et les résultats de l'étude présentée concernent des peuplements âgés de 28 ans. Cependant, l'impact doit être semblable chez des arbres dont le système racinaire est développé.

6.1.3. Importance de la lixiviation dans les jeunes parcelles

Il semble donc que la gestion de l'azote dans les jeunes parcelles est un des leviers à améliorer afin de rendre la culture de sapins de Noël plus durable. C'est particulièrement vrai pour les parcelles sur des prairies fraîchement retournées ou il est plus facile de mettre des actions en place afin d'éviter une lixiviation trop importante. Tout d'abord, il existe la solution du semis dans un couvert déjà en place et qui est fauché mécaniquement. Cette technique est déjà appliquée en culture biologique et est étudiée dans le cadre du projet de gestion différenciée. Elles est aussi courant dans d'autres pays producteurs (Davis, 2005 ; Saha et al., 2020) Même si les résultats sont encourageants, en témoigne les résultats APL obtenus pour les deux parcelles suivies pâturées par des moutons, il n'est pas certain que cette solution soit inclusive et motive la majorité des producteurs. Il est peut-être possible de mettre en place d'autres solutions moins coûteuses et peut-être plus facile à mettre en place comme le semis d'une Culture Intermédiaire Piège A Nitrate (CIPAN) qui est gélive et qui ne doit pas être détruite mécaniquement durant les deux premiers automnes, afin de limiter la perte d'azote par lixiviation. Ce levier est déjà conseillé en culture classique par ((Lambert et al., 2015). Il a été démontré qu'une telle culture peut fixer de 30 à 40 unités d'azote par tonne de matière sèche produite. Cependant dans l'optique d'une telle efficacité, il faut que le couvert soit implémenté tôt dans la saison. Il peut aussi diminuer les réserves en eau disponible pour l'année de culture suivante. D'un autre côté, ce couvert sert d'engrais vert une fois détruit et donc l'investissement peut être en partie rentabilisé pour les besoins de la culture. La deuxième option est de mettre en place une culture avec une forte exigence en azote et avec un couvert végétal actif pendant une grande partie de l'année, comme les prairies temporaires, avant de mettre en place un culture de sapins de Noël. L'avantage de ces couverts, en place pendant 8 à 10 mois, est que les conditions favorables pour la minéralisation le sont aussi pour le développement du couvert ce qui permet de récupérer l'azote minéralisé. Ces prairies, exploitées en tant que prairie de fauche de manière intensive, permettent d'exporter jusqu'à 350kg/ha(Deprez et al., 2007). Enfin, il est également possible de planter directement dans la prairie sans la retourner. Celle-ci peut être conservée durant plusieurs années pour être finalement détruite à l'aide d'un herbicide. Cette solution est, selon D. Ernould (communication personnelle, 13 août 2021), déjà utilisée par certains producteurs.

Bien entendu, ces solutions semblent efficaces sur le papier mais entraînent une série de contraintes qu'il faut étudier dans le contexte afin d'en analyser la faisabilité en conditions réelles. En effet, la période automnale est une période déjà très chargée pour les producteurs de sapin de Noël et il est probable que le simple aspect organisationnel que l'implantation d'un CIPAN engendrerait serait susceptible de décourager les producteurs.

Les données récoltées ne permettent pas de vérifier cette hypothèse mais le cas de la parcelle 511p nous indique qu'il semble aussi y a voir un danger de lixiviation excessive sur les parcelles dans leurs dernières années de culture. En effet, le sol se retrouve à nu en pleine saison de minéralisation ce qui ne peut avoir des effets positifs sur la lixiviation du nitrate. Une adaptation du plan de coupe pourrait être envisagée pour faire en sorte que ces parcelles soit exploitées en dernier lieu dans le calendrier et ainsi profiter d'un maximum de couverture pendant la saison de minéralisation.

Nous avons également observé une corrélation entre la classe d'âge et le pH de la parcelle. Cette relation est assez logique. Il est généralement mentionné que les plantations de sapins de Noël acidifient le sol. Cette acidification est en lien avec l'absorption de cations par les arbres qui doivent excréter des H+ vers la solution du sol afin de conserver leur charge nulle (Andrianarisoa, 2009). De plus, le sol n'est amendé qu'une seule fois avant de commencer la rotation puisqu'il n'est plus possible de le faire une fois que les sapins sont plantés. Comme le sol est naturellement acide, il va avoir tendance à se ré-acidifier progressivement au fur et à mesure des années de culture successives. Une explication plausible est donc que l'âge de la parcelle influe sur le pH ainsi que sur le résultat APL.

6.1.4. Impact des conseils de fertilisation

L'étude du surplus de fertilisation ne nous indique pas de relation avec les résultats APL. Ce résultat est opposé aux observations réalisées en culture classique (C. Vandenberghe et G. Colinet, 2013). Tout d'abord la population et le nombre d'années de données sont trop faibles que pour observer un effet. Il est possible que le producteur 3 aie tenu compte des conseils de fertilisation raisonnée puisque les résultats APL ont fortement diminué d'une année à l'autre. Cependant, nous n'avons pas pu le vérifier par manque de données pour l'année 2019. Cela démontre bien l'intérêt de continuer d'étudier les pratiques sur un plus grand échantillon afin d'en étudier les impacts et ainsi affiner les conseils. De plus, la majorité des résultats élevés ont été obtenus pour des jeunes parcelles qui ne sont pas ou presque fertilisées avec de l'azote. A l'inverse les surplus de fertilisation sont observés pour des parcelles plus vieilles. C'est logique puisque les producteurs appliquent l'azote en fonction de l'âge des sapins, il est donc plus probable que l'erreur soit plus grande pour une plus grande quantité d'azote épandue. Les arbres de cet âge sont plus aptes à stocker un surplus d'azote important dans leurs aiguilles de par leur biomasse plus importante (Oregon State University, 2009), ce qui peut expliquer le fait que le résultat APL n'est pas forcément impacté. Il est donc difficile de tirer des conclusions sur l'impact de la fertilisation dans ce contexte. Une étude plus longue avec

un échantillon plus grand pour chaque catégorie d'âge permettrait peut-être d'observer des effets plus importants.

Enfin, le fait que nous observions pas un lien direct entre une fertilisation excessive et une lixiviation importante n'indique pas que cette fertilisation excessive ne pose pas d'autres problèmes. L'étude se concentre sur l'impact de la fertilisation azotée à travers l'indicateur APL car c'est un outil qui est couramment utilisé en culture classique. Pourtant, comme mentionné dans la section 2.4, la lixivation n'est pas le seul impact environnemental négatif d'une surfertilisation azotée, la volatilisation et la dénitrification ont aussi un impact environnemental non négligeable et ne sont pas mesurables par l'étude effectuée. L'impact économique pour les producteurs ainsi que l'impact environnemental de la surproduction d'engrais doivent aussi être pris en compte. En effet, il faut plus d'une tonne d'équivalent pétrole sous forme de gaz naturel pour produire une tonne d'engrais azotés (Comifer, 2013).

Finalement, il semble que le problème majeur avec la fertilisation en culture sapins de Noël en Ardenne belge est qu'elle semble très peu contrôlée. Larry J. Kuhns, 2004 relevait en 2004 qu'aucune pratique ne peut être qualifiée de standard dans l'industrie du sapin de Noël en Pennsylvanie. Il a relevé le manque de données de recherches solides sur lesquelles baser des recommandations de fertilisation. Il semble que ce soit le même phénomène pour la culture de sapin de Noël ardennaise. Pourtant, d'autres pays producteurs (Baumgarten et al., 2008 ; MSU, 2019 ; Oregon State University, 2009) semblent avoir évolué et mis en place des stratégies de fertilisation afin de comprendre et de réguler les pratiques.

6.1.5. Comparaison avec les résultats APL en cultures traditionnelles en Wallonie

La comparaison des APL avec les cultures traditionnelles offre un aperçu relativement rassurant sur l'impact écologique des sapin de Noël en Ardenne belge. En effet, cette culture, souvent décriée pour son utilisation massive d'engrais ne semble, dans les faits, pas montrer de surfertilisation excessive. Les résultats APL obtenus confirment les observations menées sur les quantités d'engrais épandues et confortent dans l'idée que la fertilisation azotée est raisonnée chez les producteurs participant au projet. C'est d'autant plus vrai que les résultats ont été confrontés à des données d'exploitation dont la gestion azotée est guidée et surveillée depuis de nombreuses années. La comparaison est intéressante du point de vue des risques environnementaux mais comporte une certaine faiblesse de par la différence des cultures comparée. En effet, il est acquis que les sapins de Noël stockent de l'azote dans leurs aiguilles et que cette accumulation peut changer rapidement en réponse à divers facteurs mais particulièrement en réponse à une augmentation de la disponibilité en nutriments (Slesak et Briggs, 2010) ce qui n'est pas le cas des cultures classiques dont le moteur principal d'absorption d'azote est la croissance.

D'autre part, si ces résultats sont encourageants, d'autant qu'ils englobent une grosse

partie du territoire cultivé en sapin de Noël de par la participation de gros producteurs ardennais, il faut garder à l'esprit que ces producteurs ont choisis de rejoindre un projet de gestion différenciée et qu'ils sont donc par nature sensible à la protection de l'environnement ou à l'image que cela renvoie de leur production. Leurs pratiques sont donc probablement déjà évoluées en ce sens. Il faut aussi garder à l'esprit qu'ils connaissent les parcelles suivies par le projet et ne veulent donner d'informations de fertilisation que pour ces parcelles en question. Il est donc impossible de connaître leurs pratiques sur d'autres parcelles en terme de fertilisation azotée et d'applications de produits phytosanitaires.

6.1.6. Limites des mesures APL

L'étude de l'Azote Potentiellement Lessivable constitue un outil utile et fiable en culture classique pour renseigner du risque de pollution par des nitrates. Cependant, cela reste une estimation de phénomènes complexes dont la dynamique n'est pas toujours bien comprise. Les nombreuses différentes étapes, principalement l'échantillonnage sur le terrain, sont soumises à l'erreur humaine et des variations importantes. De plus, l'entièreté du sol de la parcelle (4000 t/ha pour l'horizon supérieur) est approximé par un échantillon de quelques centaines de grammes seulement. Cet échantillon est "vivant" dans le sens où l'azote peut encore se transformer durant toutes les étapes après son prélèvement s'il n'est pas conservé de manière adéquate (C. Vandenberghe, 2016).

Enfin, la question de l'hétérogénéité de la parcelle, accrue par le caractère unique des plantations de sapins de Noël, peut être posée. Une étude (Hennart et al., 2010) sur la pertinence de l'indicateur APL en prairie démontre que l'écart-type grandit corrélativement à celui des valeurs moyennes enregistrées à cause de la forte hétérogénéité de la distribution des pissats. Il est possible que la situation particulière de la culture de sapins de Noël entraîne une certaine hétérogénéité. En effet, nous n'avons pas mis de mode opératoire spécial pour sonder dans les parcelles de sapin de Noël. Les parcelles âgées de plus de cinq à six ans ont généralement commencées à être exploitées et sont "trouées" par endroit. Il est possible qu'un biais humain de facilité soit apparu puisque les conditions d'échantillonage seront plus facile lorsqu'il y a de l'espace qu'entre deux sapins proches (facilité pour déposer le seau, place pour sonder, branches gênantes,...). Le prélèvement est un acte physique et ce biais ne semble pas négligeable puisque l'absence d'arbres amène certainement un gradient de concentration en nitrate (pas d'absorption d'azote à cet endroit, différence de drainage,..). Il serait intéressant de mettre en place un protocole stricte pour les prochains prélèvements, de manière à diminuer ce biais.

6.2. PPPs

6.2.1. Comparaison entre les producteurs

Les résultats obtenus permettent d'étudier les divergences d'application de produits phytosanitaires par les différents producteurs. C'est encore plus intéressant lorsque ces

résultats sont comparés à l'état des parcelles au moment des prélèvements et des photos aériennes. Presque toutes les parcelles étaient dépourvues d'adventices ce qui montre bien que le plus faible traitement en herbicide est largement suffisant pour assurer le même travail que le traitement le plus concentré. De plus, les traitements sont majoritairement systématiques sur toutes les parcelles d'un producteur. Lorsque celui-ci a trouvée une concentration en matière active ou une combinaison qui fonctionne, il l'utilise sur chaque parcelle peu importe l'âge ou la location. Il semble donc qu'il y a une surconsommation d'herbicides par certains producteurs et qu'une comparaison des pratiques, même anonyme, pourrait être bénéfique afin de limiter ces pratiques excessives. Il existe des initiatives de ce genre pour d'autres cultures classiques comme les céréales organisées au Centre de Michamps. Les résultats de plusieurs agriculteurs présents à la réunion de manière anonyme sont présentés. Celui-ci reconnaît les données qui lui correspondent et peu ainsi se situer par rapport à d'autres agriculteurs.

6.2.2. Comparaison avec d'autres cultures

L'étude des données de vente en Wallonie dans différents types de culture nous permet de nous rendre compte que la situation d'utilisation des pesticides par les producteurs de sapin de Noël est loin d'être aussi intensive que certaines grandes cultures bien plus consommatrices. Elle est en-dessous de la médiane établie sur quatre années pour toutes les autres cultures wallones même pour les producteurs les plus consommateurs. Cela permet de rappeler que les produits phytosanitaires sont utilisés dans toutes les autres cultures conventionnelles et que le problème de dégradation de l'environnement découlant de cette utilisation est un problème systémique et pas directement en lien avec l'utilisation de produits phytosanitaires de quelques producteurs. Nous pouvons aussi mentionner le faible impact de la culture de sapins de Noël dans la part total des matières actives appliquées en Wallonie. Cela démontre bien que s'attaquer à la culture de sapins de Noël n'est peut-être pas le combat le plus pertinent pour protéger les écosystèmes wallons. Il faut toutefois interpréter ces résultats avec beaucoup de prudence car des facteurs de variabilité importants n'ont pas été étudiés. Tout d'abord, l'échantillon était relativement faible. Ceci, en plus du taux d'incertitude sur les informations récoltées, doit être tenu en compte. L'impact de la variabilité interannuelle n'a pas été du tout pris en compte par manque de données pour la première année d'étude. Cette variabilité interannuelle est susceptible d'influencer les résultats à la hausse puisque le climat de l'année d'étude était très peu propice à des attaques d'insectes et de rouilles. Dans certaines cultures comme la pomme de terre, l'application de produits phytosanitaires est très variable selon les années puisqu'elle dépend du climat (Comité régional PHYTO et CORDER asbl, 2020). C'est probablement aussi le cas en culture de sapins de Noël. Toutefois, il faut garder à l'esprit que les quantités maximales d'insecticides et de fongicides sont réglementées et relativement basses pour le secteur. Étant donné, l'impact des herbicides sur la part total de PPP utilisés, il est peu probable que cela fasse changer d'ordre de grandeur à

la moyenne. Il y a un grand intérêt à continuer l'enquête sur les produits phytosanitaires utilisés et d'élargir la base de données afin d'affiner les conclusions. Il faut aussi rappeler que les méthodes de récolte de données sont totalement différentes ce qui peut amener des divergences au niveau des résultats obtenus. Finalement, il faut admettre que la culture de sapins de Noël est majoritairement installée en remplacement de prairies et qu'à ce niveau la comparaison n'est pas à l'avantage de cette culture puisque l'application de produits phytosanitaires en prairie permanente est presque nulle. Il existe une vraie marge de progression à ce niveau. C'est d'autant plus vrai qu'il existe d'autres techniques de gestion des adventices et que certains pays producteurs sont bien plus avancé dans la gestion des couverts sous culture (Jill O'Donnell, 2021 ; Saha et al., 2020).

6.2.3. Comparaison entre les différents phytosanitaires

Compte tenu des considérations faites concernant la répartition et la différence de toxicité des différents herbicides utilisés, une interrogation sur l'impact qu'aurait une interdiction du glyphosate sur les écosystèmes ardennais est de circonstance. Le débat est d'actualité puisque le groupe d'évaluation pour le glyphosate (ACG) a publié un rapport dans lequel aucune propriété toxicologique justifiant l'interdiction du glyphosate n'est mise en cause (EFSA, 2021). Celui-ci doit encore être validé par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) et par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) mais il s'agit d'un premier pas vers la réautorisation en 2022(Foucart, 2021). Pourtant, des spécialistes en toxicologie remettent en cause les études mises en places pour fonder l'opinion des autorités sanitaires européennes (Nersesyan et Knasmueller, 2021). S'il semble que le débat sur la toxicité humaine soit sans fin, celui concernant l'environnement n'est pas moins controversé. Un rapport de 2015 (Saunders et Pezeshki, 2015) tire néanmoins la sonnette d'alarme sur le ruissellement et la translocation par les racines, ainsi que l'effet du glyphosate sur le fonctionnement de certaines plantes non-cibles.

S'il est difficile de se forger un avis tranché dans ces études contradictoires polluées par des manipulations scientifiques, de la désinformation et des soupçons de corruption, nous pouvons au moins conclure que le débat est moins virulent en culture de sapin de Noël puisqu'il ne touche pas directement à la santé humaine du consommateur. Nous pouvons cependant pointer du doigt les grosses différences entre les pratiques d'utilisation pour un résultat final semblable. Il semble que certains horticulteurs parviennent à se passer de glyphosate sur certaines parcelles et les doses utilisées pourraient certainement être diminuées chez certains producteurs. Cependant, l'impact d'une interdiction totale de cette substance aurait probablement un impact négatif s'il n'est pas accompagné d'une série de mesures visant à aider les horticulteurs dans la transition. Ils se tourneraient probablement vers d'autres substances plus toxiques et dont ils n'ont pas testé l'impact en champ.

Le débat sur le glyphosate est un débat qui occupe l'opinion publique mais qui masque des dérèglements systémiques plus important. Le problème est récurrent pour les sujets

qui touchent à l'écologie où l'on cherche à présenter une solution simple à des problèmes complexes sans chercher à en expliquer le contexte (Kovacs, 2012). Il faudrait plutôt mettre en évidence le problème de l'utilisation massive de pesticides, qu'ils soient naturels ou de synthèse. Cette utilisation est intrinsèque à l'agriculture conventionnelle et aux systèmes de production qui en découlent et la transition doit être accompagnée par des mesures concrètes prenant en compte la complexité de ces systèmes. Bien qu'il existe différentes méthodes pour contrôler de manière non-chimique les adventices en culture de sapins de Noël et que ces solutions commencent à être étudiées et parfois mise en place, il semble qu'une planification adéquate et l'intégration de ces différentes méthodes soient requises afin de mener un programme efficace de lutte intégrée (Saha et al., 2020). Il est également important de ne pas oublier l'impact du consommateur (Reynaerts et al., 2020) qui détient les armes nécessaires pour pousser la transition vers des systèmes plus durables. Les sapins "zéro phyto" seront probablement plus chers ou moins touffus que les sapins classiques peu importe les méthodes utilisées. C'est une transition qui doit être établie dans tous les secteurs de l'agriculture, mais qui est certainement plus facile à engranger dans le contexte particulier des sapins de Noël. En effet, c'est une dépense extraordinaire et le consommateur sera probablement plus enclin à faire un effort que sur des achats journaliers. Pour que cela soit possible, il faut cependant guider le consommateur vers l'achat de ces sapins plus durables, à travers la création d'un label de qualité différenciée par exemple (Reynaerts et al., 2020).

Comme nous avons pu déjà le mentionner pour la gestion de la fertilisation, il semble que le secteur soit mal guidé en ce qui concerne les pratiques de lutte intégrée. Il existe beaucoup de littérature à ce sujet depuis 20 ans dans les autres pays producteurs et la Wallonie a donc un retard a rattraper à ce niveau malgré sa place parmi les leaders du marché. (Jill O'Donnell, 2021 ; Peachey et al., 2017)

6.2.4. Considérations sur les pépinières

Les résultats et discussions présentés dans cette étude ne reprennent pas les années de culture en pépinières avant la plantation définitive. Il semble cependant que les quantités de produits phytosanitaires utilisées sont bien plus conséquentes dans ce secteur qu'en culture. De plus, considérations concernant l'impact de l'âge des sapins sur les résultats APL sont prises en compte, l'impact de la lixiviation du nitrate doit être bien plus important pour ces pépinières où les arbres puisent beaucoup moins de ressources et où les systèmes racinaires sont bien moins développés que pour les sapins en culture. Il serait intéressant d'en étudier l'impact également. Néanmoins, l'impact en terme de superficie en pépinière est extrêmement marginal et donc il est peu probable que cela influe beaucoup les résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

6.3. Limite de l'étude

6.3.1. Limites des mesures APL

L'étude de l'Azote Potentiellement Lessivable constitue un outil utile et fiable en culture classique pour renseigner du risque de pollution par des nitrates. Cependant, cela reste une estimation de phénomènes complexes dont la dynamique n'est pas toujours bien comprise. Les nombreuses différentes étapes, principalement l'échantillonnage sur le terrain, sont soumises à l'erreur humaine et des variations importantes. De plus, l'entièreté du sol de la parcelle (4000 t/ha pour l'horizon supérieur) est approximé par un échantillon de quelques centaines de grammes seulement. Cet échantillon est "vivant" dans le sens où l'azote peut encore se transformer durant toutes les étapes après son prélèvement s'il n'est pas conservé de manière adéquate (C. Vandenberghe, 2016).

Enfin, la question de l'hétérogénéité de la parcelle, accrue par le caractère unique des plantations de sapins de Noël, peut être posée. Une étude (Hennart et al., 2010) sur la pertinence de l'indicateur APL en prairie démontre que l'écart-type grandit corrélativement à celui des valeurs moyennes enregistrées à cause de la forte hétérogénéité de la distribution des pissats. Il est possible que la situation particulière de la culture de sapins de Noël entraîne une certaine hétérogénéité. En effet, nous n'avons pas mis de mode opératoire spécial pour sonder dans les parcelles de sapin de Noël. Les parcelles âgées de plus de cinq à six ans ont généralement commencées à être exploitées et sont "trouées" par endroit. Il est possible qu'un biais humain de facilité soit apparu puisque les conditions d'échantillonage seront plus facile lorsqu'il y a de l'espace qu'entre deux sapins proches (facilité pour déposer le seau, place pour sonder, branches gênantes,...). Le prélèvement est un acte physique et ce biais ne semble pas négligeable puisque l'absence d'arbres amène certainement un gradient de concentration en nitrate (pas d'absorption d'azote à cet endroit, différence de drainage,..). Il serait intéressant de mettre en place un protocole stricte pour les prochains prélèvements, de manière à diminuer ce biais.

Son utilisation dans le processus des conseils de fertilisation en sapins de Noël. En effet, les parcelles majoritairement fertilisée sont les parcelles âgées de quatre à dix ans. Ce sont aussi les parcelles qui montrent les résultats APL les plus bas, malgré une dose appliquée allant parfois jusqu'à 200% du conseil de fertilisation. Il semble que le conseil serait plus avisé sur base de l'étude des concentrations foliaires en nutriments, afin de déterminer les réels besoins de la plante en fonction du site de plantation. Ce levier est déjà mis en place aux États-Unis et en Autriche et est présenté dans la section 2.7.3.

6.3.2. Critique de la méthodologie utilisée pour l'enquête

La méthode de récolte de résultats concernant l'enquête sur l'application d'engrais et de pesticides n'était pas optimale. En effet, l'envoi d'un tel formulaire n'entraîne aucun contrôle sur les réponses fournies. Il semble que les producteurs l'ait rempli avec différents niveaux de sérieux et d'attention. Il aurait été possible de contrôler les résidus de pesticides

grâce à des bougies poreuses sur certaines parcelles et ainsi de vérifier si les résultats coïncidaient avec les produits phytosanitaires renseignés. Cependant, la dynamique du projet des GAL est basée sur une relation de confiance et une collaboration avec les producteurs et cette étape aurait risqué de mettre en péril cette relation. Dans tous les cas, cela n'aurait servi qu'à mettre en exergue des substances utilisées et non renseignées par les producteurs et ne nous aurait pas donner d'informations pour les comparaisons menées dans cette étude. Ce travail de contrôle, bien qu'intéressant, n'entrait donc pas dans les objectifs visés.

7 Conclusion

En ce qui concerne les résultats APL nous pouvons tirer les conclusions suivantes. Tout d'abord, on peut affirmer au vu des résultats que l'impact de la culture de sapins de Noël sur la lixiviation du nitrate est très faible. La majorité des résultats APL sont très bons. Les médianes sont inférieures à toutes les cultures classiques en Wallonie ou en Ardenne. Cependant, il est intéressant de continuer le travail poursuivi par cette étude en échantillonnant plus de jeunes parcelles ou de parcelles dans leur dernière année d'exploitation. De cette manière, il sera possible de confirmer ou pas les observations réalisées dans cette étude sur la variation de l'APL en fonction de la classe d'âge des parcelles avec des résultats statistiques plus robustes et donc de réfléchir aux leviers à mettre en place afin de limiter cette lixiviation dans ces catégories.

D'un point de vue des enquêtes menées sur l'épandage d'azote et sur les pulvérisations de produits phytosanitaires, l'étude a permis de révéler une divergence importante des pratiques entre les producteurs. Il semble pertinent de continuer le travail entrepris par le projet de gestion différenciée afin d'affiner les conseils de fertilisation et peut-être d'élargir ces conseils aux applications de produits phytosanitaires et a la lutte intégrée. Le projet mené par le GAL concernant la gestion des couverts peut servir de fer de lance mais il est important que la majorité du secteur se sente impliqué dans la transition. En effet, bien que les résultats d'applications de phytosanitaires soit inférieurs par rapport à la majorité des autres cultures, il semble qu'il y ai une marge de progression assez importante au niveau de l'application d'herbicides, responsable de la majorité de la matière active utilisée. En effet, l'étude a aussi permis, à travers la recherche bibliographique, de mettre en évidence la littérature d'autres pays producteurs sur la gestion différenciée. Certaines régions productrices ont réussi à opérer une transition du secteur vers une gestion mécanique des couverts sous les parcelles et une lutte intégrée contre les ravageurs. La gestion de la fertilisation est également accompagnée, par des documents publics et accessibles à tous les producteurs.

Compte tenu des résultats obtenus pour les deux indicateurs étudiés dans ce mémoire, nous pouvons conclure que la culture de sapins de Noël a un plus faible impact sur l'environnement que la majorité des cultures classiques. Les arguments avancés par les détracteurs de la culture de sapins de Noël sont soit erronés ou contredis par les résultats obtenus dans cette étude. Nous pensons que le climat hostile induit par la mauvaise réputation de la culture entraîne les producteurs à ne pas partager des données considérées comme "sensibles" à cause de l'impact que cela pourrait avoir sur leur image déjà ternie. A contrario, il serait certainement bénéfique pour le secteur de rendre ses informations

plus accessibles au public, principalement au niveau du recensement foncier afin de ne pas nourrir les croyances populaires. Un accompagnement institutionnel et scientifique permettrait au commun des mortels inquiet d'obtenir des informations fiables concernant les tenants et aboutissants de la culture. Cela permettrait également au consommateur de devenir acteur et de participer à la transition en guidant ses achats vers des productions plus responsables.

Références

ACRVF, SPW ARNE, ELIE-UCL, GXABT-ULG & FORÊT.NATURE. (p. d.). Fichier écologique des essences : sapin de Nordmann. Récupérée 11 mai 2021, à partir de https://fichierecologique.be/!/

Addiscott, T. M. (2004). The biology of nitrate. In T. M. Addiscott (Éd.), *Nitrate, agriculture and the environment* (p. 29-47). CABI. https://doi.org/10.1079/9780851999135.0029

Andrianarisoa, H. S. (2009). Minéralisation de l'azote et nitrification dans les écosystèmes forestiers : Effet du type de sol et de l'essence forestière, 280.

Aussenac, G. (1975). Étude de la croissance en hauteur chez quelques résineux, effet de la température.

Ballu, S., Leterme, P. & Ferchaud, F. (2006). Pratiques agricoles, fuites de nitrates et qualité de l'eau dans les bassins versants : Synthèse des références applicables au contexte breton. https://www.ceva-algues.com/wp-content/uploads/2018/11/BD_Algues-vertes_1_Rapport_inra.pdf

Baumgarten, A., Fürst, A., Raith, F. & Schuster, K. (2008). EMPFEHLUNGEN FÜR DIE SACHGERECHTE DÜNGUNG VON CHRISTBAUMKULTUREN. https://bfw.ac.at/300/pdf/christbaumkultur.pdf

Bosseler, J., Delepierre, F. & De Muelenaere, M. (2017). Les sapins de Noël, une affaire qui marche en Wallonie mais à quel prix ? - Le Soir Plus. Récupérée 15 août 2021, à partir de https://plus.lesoir.be/127404/article/2017-12-02/les-sapins-de-noel-une-affaire-qui-marche-en-wallonie-mais-quel-prix

Cañas, R. A., De la Torre, F., Pascual, M. B., Avila, C. & Cánovas, F. M. (2016). Nitrogen Economy and Nitrogen Environmental Interactions in Conifers [Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Agronomy*, *6*(2), 26. https://doi.org/10.3390/agronomy6020026

Chatain, B. (2017). Supprimer progressivement le glyphosate ; interdiction complète d'ici à fin 2022 | Actualité | Parlement européen. Récupérée 24 avril 2021, à partir de https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20171020IPR86572/supprimer-progressivement-le-glyphosate-interdiction-complete-d-ici-a-fin-2022

Comifer. (2013). AVIS du COMIFER-RMT F&E sur une question posée par les ministères : Question N°2- Prise en compte de la volatilisation des engrais minéraux.

Comité régional PHYTO & CORDER asbl. (2020). *Estimation quantitative des utilisations de produits phytopharmaceutiques par les différents secteurs d'activité* (rapp. tech. CSC O3.02.02-18H369). Applied microbiology – Phytopathology (ELIM-ELI-UCL). http://etat.environnement.wallonie.be/

Commission Européenne. (2017). RÈGLEMENT D'EXÉCUTION (UE) 2017/ 2324 DE LA COMMISSION - du 12 décembre 2017 - renouvelant l'approbation de la substance active «glyphosate» conformément au règlement (CE) no 1107/ 2009 du Parlement européen et du Conseil concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques et modifiant l'annexe du règlement d'exécution (UE) no 540/ 2011 de la Commission.

Conseil Européen. (1991). Directive 91/676/CEE du Conseil Européen concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles.

Conseil européen. (1975). Directive du Conseil Européen concernant la qualité requise des eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire dans les états membres.

Couillard, S., Bage, G. & Trudel, J.-S. (2009). *Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of artificial vs natural christmas tree* (rapp. tech. 1043-RF3-09). Ellipsos. Montréal, Québec.

CPDT. (2014). *Les ensembles paysagers de l'Ardenne centrale et de la Thiérache* (rapp. tech. N° 5). Conférence Permanente du Développement Territorial. https://cpdt.wallonie.be/toutes-nos-publications

CRAAQ. (2021). Effets toxiques des matières actives - SAgE pesticides. Récupérée 13 mai 2021, à partir de https://www.sagepesticides.qc.ca/Recherche/RechercheMatiere/DisplayMatiere?MatiereActiveId=516

Daims, H., Lebedeva, E. V., Pjevac, P., Han, P., Herbold, C., Albertsen, M., Jehmlich, N., Palatinszky, M., Vierheilig, J., Bulaev, A., Kirkegaard, R. H., von Bergen, M., Rattei, T., Bendinger, B., Nielsen, P. H. & Wagner, M. (2015). Complete nitrification by Nitrospira bacteria [Number : 7583 Publisher : Nature Publishing Group]. *Nature*, *528*(7583), 504-509. https://doi.org/10.1038/nature16461

Davis, B. (2005). Seeding beneficials groundcovers. *Limbs and needles*. https://christmastrees.ces.ncsu.edu/ground-cover-management/

Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Heens, B. & Marcoen, J. M. (2013). Suivi de la lixiviation du nitrate en plein champ par la technique lysimétrique : retour de huit années d'expérience. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 10.

Deprez, B., Parmentier, R., Lambert, R. & Peeters, A. (2007). *Les prairies temporaires : une culture durable pour les exploitations mixtes de la Moyenne-Belgique* (rapp. tech. N° 2). Centre wallon de Recherches agronomiques Département Production Végétale. https://www.researchgate.net/publication/275030627_Les_prairies_temporaires_une_culture_durable_pour_les_exploitations_mixtes_de_Moyenne_Belgique

Dousset, S., Chauvin, C., Durlet, P. & Thévenot, M. (2004). Transfer of hexazinone and glyphosate through undisturbed soil columns in soils under Christmas tree

cultivation. *Chemosphere*, *57*(4), 265-272. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.007

EFSA. (2021). Glyphosate : les régulateurs de l'UE entament l'examen des évaluations pour le renouvellement de l'autorisation | Autorité européenne de sécurité des aliments. Récupérée 9 août 2021, à partir de https://www.efsa.europa.eu/fr/news/glyphosate-eu-regulators-begin-review-renewal-assessments

Fartmann, T., Kämpfer, S., Brüggeshemke, J., Juchem, M., Klauer, F., Weking, S. & Löffler, F. (2018). Landscape-scale effects of Christmas-tree plantations in an intensively used low-mountain landscape – Applying breeding bird assemblages as indicators. *Ecological Indicators*, *94*. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.006

Foucart, S. (2021). Le glyphosate franchit un premier pas vers sa réautorisation en Europe en 2022. *Le Monde.fr*. Récupérée 9 août 2021, à partir de https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/06/16/le-glyphosate-franchit-un-premier-pas-vers-sa-reautorisation-en-europe-en-2022_6084383_3244.html

Gailly, R., Paquet, J.-Y., Titeux, N., Claessens, H. & Dufrêne, M. (2017). Effects of the conversion of intensive grasslands into Christmas tree plantations on bird assemblages [Publisher : Elsevier Science]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *247*. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.029

George, J.-P., Schueler, S., Karanitsch-Ackerl, S., Mayer, K., Klumpp, R. T. & Grabner, M. (2015). Inter- and intra-specific variation in drought sensitivity in Abies spec. and its relation to wood density and growth traits. *Agricultural and Forest Meteorology*, *214-215*, 430-443. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.268

Geypens, M., Mertens, J., Elst, P. V. & Bries, J. (2005). Evaluation of Fall Residual Nitrogen Influenced by Soil Chemical Characteristics and Crop History in Flanders (Belgium) [Publisher : Taylor & Francis _eprint : https ://doi.org/10.1081/CSS-200043096]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *36*(1-3), 363-372. https://doi.org/10.1081/CSS-200043096

Ghislain, P. (2016). Traditions d'hiver en Ardenne [Section : Boire et manger]. Récupérée 14 août 2021, à partir de https://regards-ardenne.luxembourg-belge.be/traditions-dhiver-en-ardenne/

Heckman, J. & Vodak, M. (2012). FS1187 : Soil Fertility Recommendations for Christmas Trees (Rutgers NJAES). Récupérée 13 août 2021, à partir de https://njaes.rutgers.edu/fs1187/

Hennart, S., Lambert, R., Oger, R. & Stilmant, D. (2010). Echantillonnage des prairies pâturées pour quantifier l'azote potentiellement lessivable : quel schéma pour quelle précision ? *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 8.

Inter-Environnement Wallonie, Les Naturalistes de la Haute-Lesse, ADDES en Haute Lesse, Ecoconso, Colibris Famenne, Oxfam, Les Amis de la

Terre Belgique & Terre-en-vue. (2016). VERS UN MEILLEUR ENCADREMENT DES CULTURES INTENSIVES DE SAPINS DE NOEL. https://naturalistesdelahautelesse.be/Publications

ISO. (2005). Norme ISO 14256-2 :2005 Qualité du sol — Dosage des nitrates, des nitrites et de l'ammonium dans des sols bruts par extraction avec une solution de chlorure de potassium — Partie 2 : Méthode automatisée avec analyse en flux segmenté.

Khalil, N., Leyval, C., Non renseigné & Guillet, B. (1989). Influence du type de nutrition azotée sur le déclenchement de la chlorose du sapin de Nordmann (Abies nordmanniana, Spach, 1842). https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00882483/

Kohl, R. & Rutzen, U. (2008). Two crops from one acre : A comprehensive guide to using Shropshire sheep for grazing tree plantations, 44. https://afsnn.fr/wp-content/uploads/2012/04/SSBA-Two-Crops-from-One-Acre.pdf

Kovacs, S. (2012). Engager et enrôler les jeunes dans la lutte contre le changement climatique : le documentaire jeunesse et l'attitude des collégiens d'aujourd'hui [Bibliographie_available : 0 Cairndomain : www.cairn.info Cite Par_available : 0 Publisher : NecPlus]. *Communication langages*, *N° 172*(2), 69-81. Récupérée 14 août 2021, à partir de https://www.cairn.info/revue-communication-et-langages1-2012-2-page-69.htm

Kuzyakov, Y. & Xu, X. (2013). Competition between roots and microorganisms for nitrogen : Mechanisms and ecological relevance. *The New phytologist*, *198*. https://doi.org/10.1111/nph.12235

Laffite, A., Florio, A., Andrianarisoa, K., Creuze, C., Chatelliers, Schloter-Hai, B., Ndaw, S., Periot, C., Schloter, M., Zeller, B. o. B., Poly, F. & Roux, X. (2020). Biological inhibition of soil nitrification by forest tree species affects Nitrobacter populations. *Environmental Microbiology*, *22*. https://doi.org/10.1111/1462-2920.14905

Lambert, R., De Toffoli, M., OOst, J.-F. & Decoster, C. (2015). Destruction de prairies : Evitez le lessivage. *Wallonie Elevage*.

Landgren, C. & Bondi, M. (1994). Nitrogen Fertilizer : Where Does it Go ? Récupérée 11 mai 2021, à partir de https://extension.oregonstate.edu/node/101386/printable/print

Larry J. Kuhns. (2004). Christmas Trees in Pennsylvania. https://ipmdata.ipmcenters.org/documents/cropprofiles/PAchristmastrees.pdf

Leclerq, C. & Ramirez, A. (2019). *Le sapin de Noël en gestion différenciée dans les GAL d'Ardenne* (rapp. tech. N° 0). GAL Nov'Ardenne – Ardenne Méridionale – Parc naturel Haute-Sûre Forêt d'Anlier.

Lejeune, P. (2018). *Production d'une cartographie des surfaces consacrées à la culture de sapins de Noël en Wallonie* (rapp. tech. CAHIER SPECIAL DES CHARGES N° O3.02.02-16E60). Unité de Recherche BIOSE - Axe Gestion des Ressources fores-

tières Gembloux Agro-Bio Tech Université de Liège. http://etat.environnement.wallonie.be/files/Studies/rapport_final_19jan2018_final_VF.pdf

Leurquin, J. (2009). Etude des conifères des forêts, parcs et jardins (Belgique, France, Corse). https://naturalistesdelahautelesse.be/Publications/

Li, X., Rennenberg, H. & Simon, J. (2016). Seasonal variation in N uptake strategies in the understorey of a beech-dominated N-limited forest ecosystem depends on N source and species. *Tree Physiology*, *36*(5), 589-600. https://doi.org/10.1093/treephys/tpv132

Marcy, J., Gougeau, J., Parseghian, M.-B. & Myshkin, K. (2018). Sapin de Noël, roi des Ardennes [Publisher : Master en journalisme - ULB]. Récupérée 4 août 2021, à partir de https://journalisme.ulb.ac.be/sapin-de-noel-roi-des-ardennes

Martens, H., Sørensen, S., Burow, M. & Veierskov, B. (2019). Characterization of Top Leader Elongation in Nordmann Fir (Abies nordmanniana). *Journal of Plant Growth Regulation*, *38*. https://doi.org/10.1007/s00344-019-09938-5

Matagne, P. (2003). Aux origines de l'écologie [Bibliographie_available : 1 Cairndomain : www.cairn.info Cite Par_available : 1 Publisher : De Boeck Supérieur]. *Innovations*, *no 18*(2), 27-42. Récupérée 14 août 2021, à partir de https://www.cairn.info/revue-innovations-2003-2-page-27.htm

Ménesguen, A., Desmit, X., Dulière, V., Lacroix, G., Thouvenin, B., Thieu, V. & Dussauze, M. (2018). How to avoid eutrophication in coastal seas ? A new approach to derive river-specific combined nitrate and phosphate maximum concentrations. *Science of The Total Environment*, *628-629*, 400-414. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.025

MSU. (2019). *Nitrogen Management in Christmas Tree Plantations* (rapp. tech.). Michigan State University : AgroBioReserach. https://www.canr.msu.edu/christmas_trees/horticulture/nutrition/nitrogen-management

Nersesyan, A. & Knasmueller, S. (2021). Evaluation of the scientific quality of studies concerning genotoxic properties of glyphosate, 187. https://s3.amazonaws.com/s3.sumofus.org/images/Evaluation_scientific_quality_studies_genotoxic_glyphosate.pdf

O'Donnell, J. [J.], Cregg, B. & Lizotte, E. (2015). Evaluating nitrogen source and application timing for optimal nitrogen uptake. *VOL. 1 NR 01 2015*. https://www.iufro.org/fileadmin/material/publications/proceedings-archive/20209-ctre-proceedings-15.pdf

O'Donnell, J. [Jill]. (2021). Michigan Christmas Tree Pest Management Guide 2018. *Michigan State University Extension*, 35. https://www.canr.msu.edu/ipm/agriculture/christmas_trees/

OMS. (2020). *Classification OMS recommandée des pesticides en fonction des dangers qu'ils présentent et lignes directrices pour la classification, édition 2019 [WHO*

recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification, 2019 edition]. (rapp. tech.). Genève.

Oregon State University. (2009). Christmas Tree Nutrient Management Guide for Western Oregon and Washington, 62. https://catalog.extension.oregonstate.edu/

PE Americas. (2010). *Comparative Life Cycle Assessment of an Artificial Christmas Tree and a Natural Christmas Tree* (rapp. tech.). PE Americas. Boston. https://www.christmastreeassociation.org/wp-content/uploads/2016/08/ACTA-Christmas-Tree-LCA-Final-Report-November-2010.pdf

Peachey, E., Landgren, C. & Miller, T. (2017). Weed and Vegetation Management Strategies in Christmas Trees. *Oregon State University Extension*, 20.

Playoult, S. (2021). Pour recycler vos sapins de Noël, offrez-les aux chèvres ! -. Récupérée 15 août 2021, à partir de https://terres-et-territoires.com/hors-champ/pour-recycler-vos-sapins-de-noel-offrez-les-aux-chevres

Rakotomalala, R. (2008). *Comparaison de populations : test non paramétriques* (rapp. tech.). Université Lumière Lyon 2.

Ranger, J. (2001). Les sols forestiers (Forest soils) [Publisher : Persée - Portail des revues scientifiques en SHS]. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, *78*(2), 119-134. https://doi.org/10.3406/bagf.2001.2210

Rees, R., Ball, B., Watson, C., Watson, C. & Campbell, C. (2000). *Sustainable Management of Soil Organic Matter*. CABI. Récupérée 23 avril 2021, à partir de http://ebookcentral.proquest.com/lib/uclouvainbe/detail.action?docID=293867

Reynaerts, K., Delmon, X., Meurice, C., Mertz, M. & Servais, C. (2020). Mon beau sapin, roi des Ardennes. *Ruralités*, *45-46*, 36-37.

Rothstein, D. E. & Cregg, B. M. (2005). Effects of nitrogen form on nutrient uptake and physiology of Fraser fir (Abies fraseri). *Forest Ecology and Management*, *219*(1), 69-80. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.043

Saha, D., Cregg, B. M. & Sidhu, M. K. (2020). A Review of Non-Chemical Weed Control Practices in Christmas Tree Production [Number : 5 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Forests*, *11*(5), 554. https://doi.org/10.3390/f11050554

Saunders, L. E. & Pezeshki, R. (2015). Glyphosate in Runoff Waters and in the Root-Zone : A Review [Number : 4 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute]. *Toxics*, *3*(4), 462-480. https://doi.org/10.3390/toxics3040462

Schipper, L. & Sparling, G. (2010). Nitrogen, soils and environment.

Silva, V., Mol, H. G. J., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J. & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils – A hidden reality unfolded. *Science of The Total Environment*, *653*, 1532-1545. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.441

Slesak, R. & Briggs, R. (2010). Foliar Mass and Nutrition of Abies concolor Christmas Trees following Application of Organic and Inorganic Fertilizer. *Northern Journal of Applied Forestry*, *27*, 28-33. https://doi.org/10.1093/njaf/27.1.28

SPF SANTE PUBLIQUE & SECURITE DE LA CHAINE ALIMENTAIRE ET ENVIRONNEMENT. (2018). Arrete Royal du 16/09/2018 modifiant l'arrete royal du 28 fevrier 1994 relatif a la conservation, a la mise sur le marche et a l'utilisation des pesticides a usage agricole. Récupérée 24 avril 2021, à partir de https://www.etaamb.be/fr/arrete-royal-du-16-septembre-2018_n2018040384.html

SPW. (2020). Utilisation de l'espace agricole. http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/

SPW, DG03, DEMNA & DEE. (2017). *Rapport sur l'état de l'environnement Wallon* (rapp. tech.). SPW Éditions. Jambes, Belgique. http://etat.environnement.wallonie.be

Subbarao, G. V., Sahrawat, K. L., Nakahara, K., Ishikawa, T., Kishii, M., Rao, I. M., Hash, C. T., George, T. S., Rao, P. S., Nardi, P., Bonnett, D., Berry, W., Suenaga, K. & Lata, J. C. (2012). Biological Nitrification Inhibition—A Novel Strategy to Regulate Nitrification in Agricultural Systems.

UAP. (2018a). La culture du sapin. https://uap.be/la-culture-du-sapin/

UAP. (2018b). Logo Véritable. Récupérée 4 mai 2021, à partir de https://uap.be/logo-veritable/

UAP. (2020). *Dossier de presse : La culture du sapin de Noël en Wallonie* (rapp. tech.). Union Ardennaise des Pépiniéristes. https://uap.be/

Van der Perre, R., Bythell, S., Bogaert, P., Claessens |, H., Ridremont, F., Tricot, C., Vincke, C. & Ponette, Q. (2015). La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières Actualisation et spatialisation des données climatiques et réalisation de la carte bioclimatique dans le cadre de la révision du Fichier écologique des essences et du Guide de boisement. *Forêt.Nature*, (135), 12. https://www.fichierecologique.be/resources/FO135-47-58.pdf

Vandenberghe, C. [C.]. (2016). Performance de l'indicateur Azote Potentiellement Lessivable pour l'évaluation de la gestion du nitrate en agriculture et du risque pour la qualité de l'eau. Synthèse de la thèse soutenue par Christophe Vandenberghe. In In De Toffoli M., Vandenberghe C., Imbrecht O., Bah B., Bachelart F., Colinet G., Lambert R., 2016. Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2016 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement Nitrawal. Université catholique de Louvain et Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, 20 p.

Vandenberghe, C. [C.] & Colinet, G. [G.]. (2013). *Analyse et interprétation des résultats du contrôle APL. Dossier GRENeRA In Vandenberghe C., De Toffoli M.,*

Bachelart F., Imbrecht O., Deneufbourg M., Lambert R., Colinet G., 2013. Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2013 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement Nitrawal. Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech et Université catholique de Louvain, 63p. + annexes (rapp. tech.). GRENeRA.

Vandenberghe, C. [C.], De Toffoli, M., Bachelart, M., Imbrecht, O., Lambert, R. & Colinet, G. (2020). *Survey Surfaces Agricoles : Etablissement des références APL 2020 In Vandenberghe C. , De Toffoli M. , Durenne B., Bachelart F. , Imbrecht O. , Lefébure K., Williscotte F. , Hawotte F. , Weickmans B. , Huyghebaert B. , Lambert R., Colinet G. , 2021. Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne et volet eau du programme wallon de réduction des pesticides – Rapport d'activités final 2020 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement PROTECT'eau. Université catholique de Louvain, Centre wallon de Recherches agronomiques et Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech.* (rapp. tech. Dossier GRENeRA 20-03).

Vandenberghe, C. [C.] & Marcoen, J. (2008). Protocole de mise en œuvre du Survey Surfaces Agricoles 2008. In Marcoen J.M. , Lambert R. , Vandenberghe C. , De Toffoli M., Benoit J. , Deneufbourg M. , 2009. Programme de Gestion Durable de l'Azote en agriculture wallonne - Rapport d'activités annuel intermédiaire 2008. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.

Vandenberghe, C. [Christophe] & Colinet, G. [Gilles]. (2017). La gestion de la matière organique du sol, un enjeu important pour limiter la lixiviation du nitrate vers les eaux souterraines. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 8.

van Wesmael, B. & Brahy, V. (2017). La matière organique dans les sols. http : / / etat . environnement . wallonie . be / files / live / sites / eew / files / Publications / Rapport20analytique202006-2007/Chap11/3_MatiereOrganiqueSols/SOLS_02. pdf

Ville de Saint-Hubert (correspondance sortante). (2015). Archives 14-18 en Wallonie | La tradition du sapin de Noël. Récupérée 14 août 2021, à partir de http://14-18-wallonie.arch.be/items/show/134

Weil, R. & Brady, N. (2017). *The Nature and Properties of Soils. 14th edition.* Pearson Education.

Zhou, X., Wang, A., Hobbie, E. A., Zhu, F., Qu, Y., Dai, L., Li, D., Liu, X., Zhu, W., Koba, K., Li, Y. & Fang, Y. (2021). Mature conifers assimilate nitrate as efficiently as ammonium from soils in four forest plantations [_eprint : https ://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/nph.17110]. *New Phytologist*, *229*(6), 3184-3194. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nph.17110

Annexe A
Tableau des résultats des analyses de sols

Code mémoire	Superficie	NO3 2019	NH4	PH H2O	PH KCL	Carbone	Humus	NT Total	RCarNsol
218moutonsb	1,29	0,49	10,17	6,55	5,78	2,72	5,44	0,27	9,89
413s	1,2	1,59	4,96	5,48	4,49	3,7	7,4	0,41	9,09
614s	0,95	6,82	9,18	5,64	4,64	3,37	6,74	0,31	10,75
513sb	5,12	6,98	19,45	5,96	4,79	3,48	6,96	0,29	11,93
413p	1,62	9,57	5,24	6,12	5,22	3,51	7,02	0,43	8,17
516s	7,28	10,55	7,8	6,33	5,47	3,12	6,24	0,26	12,11
513sa	3,64	13,31	17,05	5,34	4,4	2,31	4,62	0,24	9,72
511p	12,54	13,87	5,32	5,81	4,96	2,98	5,96	0,33	9,04
315pa	0,83	15,34	8,37	5,94	5	2,1	4,21	0,24	8,81
218sa	2,08	19,57	14,53	6,62	5,85	2,78	5,56	0,24	11,51
218moutonsa	3,45	20,23	17,34	5,42	4,38	3,96	7,92	0,37	10,63
411s	0,75	20,68	2,58	5,78	4,78	3,37	6,74	0,4	8,49
115pb	0,4	22,07	8,96	5,75	4,47	2,23	4,46	0,25	8,8
216s	5,93	26,9	23,78	5,87	4,68	4,5	9	0,29	15,47
115pa	3,9	27,19	3,44	6,41	5,59	3,08	6,16	0,34	9,19
218sb	2,91	34,63	8,83	6,61	5,79	3,24	6,48	0,33	9,77
118p	2,44	45,62	7,81						
313p	4,86	61,19	8,02	6,09	4,91	2,62	5,24	0,26	10
418pb	3,09	92,93	5,57	5,58	4,56	3,09	6,18	0,32	9,69
418pa	8,22	98,6	11,63	6,88	6,27	3,09	6,18	0,35	8,86
519p	3,88	118,43	7,89	6,87	6,2	4,21	8,42	0,37	11,3
315pb	2,91	122,01	38,36	6,3	5,33	2,73	5,46	0,28	9,64

K edta	P edta	Na edta	MG edta	Ca edta	Cu edta	Zn edta	Mn edta	Fe edta	PH H2O2
9,05	2,36	1,93	24,58	146,97	5,5	6,28	267,23	306,35	6,55
18,19	4,55	2,11	7,93	76,54	2,23	3,59	54,09	242,61	5,48
18,44	3,84	1,54	9,41	114	2,67	5,67	88,92	218,22	5,64
19,52	3,56	0,97	13,57	114,27	5,16	5,33	78,02	251,07	5,96
12,92	3,95	2,19	16,15	179,53	2,8	4,83	93,29	222,59	6,12
20,65	3,68	1,08	15,86	139,64	3,2	6,42	99,78	243,57	6,33
20,26	3,93	0,75	8,72	74,68	3,51	5,33	211,91	311,94	5,34
25,48	4,33	0,98	14,47	120,32	3,13	7,74	163,74	252,19	5,81
14,09	4,65	1,22	17,95	88,4	3,71	6,42	130,05	247,79	5,94
17,32	4,62	1,63	30,06	197,02	3,32	7,37	152,96	222,82	6,62
18,38	3,56	1,29	8,74	83,99	2,63	6,21	106,78	550,18	5,42
22,73	3,89	1,77	10,98	120,5	2,25	4,39	39,9	267,32	5,78
11,77	4,88	1,03	7,9	83,2	4,07	7,58	198,07	309,01	5,75
29,05	2,9	0,87	19,18	90,71	4,5	6,88	58,76	234,53	5,87
27,24	4,4	1,66	11,54	207,26	4,42	6,06	170,46	185,99	6,41
21,07	8,41	3,83	18,24	265,49	5,84	10,65	184,64	243,28	6,61
29,73	4,59	1,13	12,71	138,92	2,1	4,91	152,22	242,58	6,09
7,62	3,64	0,9	7,51	82,58	2,63	5,13	121,83	243,3	5,58
9,77	3,31	3,42	21,04	333,44	3,06	4,32	111,31	214,84	6,88
28,98	2,27	1,32	37,25	226,37	4,49	8,79	180,03	213,13	6,87
25,38	4,22	1,19	12,52	181,86	4,09	5,2	105,02	263,47	6,3

Annexe B

Exemple d'une feuille de conseil de fertilisation

Nom parcelle	Plantation	Classe d'âge	besoin total (4000 arbres/ha) kg N/ha	besoin - fournitures du sol (4000 arbres/ha) kg N/ha	Conseil de fertilisation kg N/ha
118p	2018	1 - 2 ans	455	333	33
115pa	2015	3 - 5 ans	455	373	37
115pb	2015	3 - 5 ans	455	355	35

si année de coupe + 30 Kg/ha possible en été si la coloration n'est pas satisfaisante

Impact écologique de la culture de sapins de Noël en Ardenne belge

Cyril Destombes

La culture de sapins de Noël s'étend sur une superficie de 3175ha en Wallonie, dont la majorité en Ardenne belge. Elle est presque toujours installée sur terrain agricole et utilise des intrants de synthèse pour fertiliser et protéger la culture. Afin d'établir un état des lieux des pratiques, nous avons étudié l'impact écologique de vingt parcelles, à travers deux indicateurs : l'azote potentiellement lessivable et la quantité de produits phytosanitaires pulvérisés par hectare et par an. Les données ont été obtenues grâce à des analyses de sols et une enquête réalisée auprès des producteurs impliqués dans le projet.

Les résultats obtenus indiquent qu'il n'existe pas de lixiviation excessive en sapins de Noël pour la majorité des parcelles. La médiane est inférieure à la majorité des principales cultures en Wallonie. La moyenne générale est en-dessous du seuil critique de 50kg/ha, à partir duquel la législation considère que l'eau souterraine sera polluée. Nous avons cependant relevé que la classe d'âge 0-3 ans semblait problématique concernant la lixiviation du nitrate et nécessite une attention particulière.

Les résultats de l'enquête sur les produits phytosanitaires nous ont permis de mettre en évidence des différences de pratiques importantes entre les producteurs. La moyenne d'application observée est plus basse que pour la majorité des cultures principales en Wallonie. Nous avons cependant attiré l'attention sur les leviers permettant de diminuer cette consommation, en grande partie constituée d'herbicides grâce à la littérature de pays producteurs de sapin de Noël, ayant réussi la transition vers une diminution des produits phytosanitaires utilisés, qu'elle soit contrainte ou non.

Université catholique de Louvain

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro