HAL
open science

Haies ou talus : intérêt pour la limitation des transferts de contaminants agricoles pour une gestion intégrée des paysages

Thibault Perrin

To cite this version:

Thibault Perrin. Haies ou talus : intérêt pour la limitation des transferts de contaminants agricoles pour une gestion intégrée des paysages. Sciences de l'environnement. 2018. hal-02607631

HAL Id: hal-02607631

https://hal.inrae.fr/hal-02607631v1

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Année 2017/2018

Rapport de stage de Master 1

Présenté par

Thomas Perrin

Haies ou talus : intérêt pour la limitation des transferts de contaminants agricoles pour une gestion intégrée des paysages

Irstea Lyon-Villeurbanne

Encadrante : Nadia Carluer

Co-encadrante : Véronique Gouy

Université Jean Monnet de Saint-Etienne

Tuteur de stage : Christine Jacqueminet

Remerciements

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont accompagné lors de ce stage.

En premier lieu, Nadia CARLUER et Véronique GOUY, mes deux maîtres de stage, pour leurs conseils rigoureux, leur disponibilité, leur encadrement et leur confiance.

Merci aux membres de l'équipe « polldiff » de m'avoir rapidement intégré et présenté leurs travaux. Ce fut très enrichissant.

Une pensée pour l'ensemble des stagiaires, doctorants et post doctorants du premier étage, avec lesquels j'ai partagé de bons moments à Irstea comme à l'extérieur dans des parties de laser-games ou de volley déjantées.

Plus personnellement, je tiens à remercier Emilie et ma famille pour leur soutien tout au long de mes études et au cours de ce stage.

Enfin, merci à l'Université Jean Monnet de Saint Etienne qui m'a donné l'opportunité de réaliser un stage de 6 mois dès le Master I.

Table des matières

INTRODUCTION **6**

1 PRESENTATION DE L'INSTITUT **8**

1.1 Historique et présentation de l'institut **8**

1.2 Le centre Lyon-Villeurbanne **9**

1.3 L'équipe pollutions agricoles diffuses **10**

1.4 Contexte de mes recherches **10**

2 ÉTAT DE L'ART **11**

2.1 Introduction **11**

2.2 Définition, historique et caractérisation de l'objet d'étude **11**
2.2.1 Définition et historique 11
2.2.2 Nature et structure pédologique de la haie ou haie sur talus 13

2.3 Impacts de la haie sur le versant **14**
2.3.1 Modification de la toposéquence 14
2.3.2 Modification de la dynamique hydrique 16
2.3.2.1 L'interception 16
2.3.2.2 Impacts de la haie sur la dynamique hydrique des sols 16
2.3.2.3 Les différentes formes d'écoulement de l'eau 18
2.3.2.4 Impacts de la haie sur les écoulements de l'eau 20
2.3.3 Impacts sur les flux et le stockage de nitrates 21
2.3.3.1 Le cycle de l'azote 21
2.3.3.2 Utilisation en agriculture et pollutions engendrées 22
2.3.3.3 Les impacts de la haie 22
2.3.4 Influence sur la matière organique 24

2.4 Impacts de la haie sur les transferts de produits phytosanitaires **25**
2.4.1 Introduction 25
2.4.2 Généralités sur les produits phytosanitaires 25
2.4.3 Processus de rétention et de dégradation des produits phytosanitaires 27
2.4.4 Processus de transfert des produits phytosanitaires 27
2.4.4.1 Dérive de pulvérisation et volatilisation 28
2.4.4.2 Lavage foliaire et ruissellement 29
2.4.4.3 Infiltration profonde ou percolation 29
2.4.4.4 Ecoulements latéraux ou de subsurface 30
2.4.4.5 Le drainage agricole 30
2.4.5 Influence de la haie sur les transferts de produits phytosanitaires 31
2.4.5.1 Dérive de pulvérisation 31
2.4.5.2 Transferts par le ruissellement en solution ou sous forme absorbée 33
2.4.5.3 Les autres processus de transfert des produits phytosanitaires 34

2.5 Conclusion de l'état de l'art 35

3 ELABORATION D'UNE TYPOLOGIE FONCTIONNELLE DES HAIES OU HAIES SUR TALUS 36

3.1 Introduction, contexte et objectifs 36
3.1.1 Introduction 36
3.1.2 Contexte, les différentes typologies des haies existantes 36
3.1.2.1 Les typologies issues de l'agroforesterie 36
3.1.2.2 Les typologies en regard de la biodiversité 37
3.1.3 Objectifs de la typologie fonctionnelle envisagée 37

3.2 Elaboration de la typologie 38
3.2.1 Démarche 38
3.2.1.1 Les fonctions sélectionnées 38
3.2.1.2 Les paramètres caractérisant chaque fonction 38
3.2.2 Sélection des paramètres pour la typologie 41
3.2.3 La typologie fonctionnelle des haies ou haies sur talus 44
3.2.3.1 Présence d'un talus 44
3.2.3.2 Absence d'un talus 45
3.2.4 Notice explicative 46

3.3 Travaux cartographiques 48
3.3.1 Travail à l'échelle nationale 48
3.3.1.1 Densité de haies 48
3.3.1.2 Données et traitements 49
3.3.1.3 Résultat 51
3.3.2 Sélection des secteurs 52
3.3.3 Travail à l'échelle des secteurs 55
3.3.3.1 Digitalisation du linéaire de haies 55
3.3.3.2 Application des paramètres de la typologie 56
3.3.3.3 Résultat et discussion 59

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 62

BIBLIOGRAPHIE 64

ANNEXES 68

Annexe 1 : Principales réglementations autour des produits phytosanitaires 69

Annexe 2 : Détails sur les mécanismes d'adsorption, de désorption et de dégradation des produits phytosanitaires 70

Annexe 3 : « Référentiel national sur la typologie des haies » réalisé par l'Afac-Agroforesterie 73

RESUME ET ABSTRACT 76

Table des figures

Figure 1 : Les 9 centres Irstea en France 9
Figure 2 : L'organigramme du centre Irstea Lyon-Villeurbanne..... 9
Figure 3 : Comparaison de la structure pédologique entre un transect avec et sans haie sur talus (D'après Caubel et al., 2003) 14
Figure 4 : Organisation des horizons du sol le long d'un versant présentant une haie dans le massif Armoricain (D'après Viaud et al., 2009) 15
Figure 5 : Cartes des isovaleurs de l'humidité volumique mesurées par la sonde capacitive à différentes dates sur un transect allant du haut de versant au bas de versant et comptant trois haies, en haut de versant (HDV), en milieu de versant (MDV) et en bas de versant (BDV) (D'après Benhamou, 2012). 18
Figure 6 : Schéma récapitulatif des différentes formes d'écoulement le long d'un versant 20
Figure 7 : Le cycle de l'Azote (Dréo Johann, 2006)..... 22
Figure 8 : Concentration en nitrates pour les mois d'octobre 2006 (gauche) et d'avril 2007 (droite) le long d'un transect présentant une haie (D'après Grimaldi et al., 2012)..... 23
Figure 9 : Evolution des quantités de produits phytosanitaires vendues en fonction de leurs catégories depuis 1996..... 26
Figure 10: Représentation schématique des différents processus de transfert des produits phytosanitaires (D'après Dairon, 2015). 28
Figure 11 : Pourcentage de réduction de la dérive de pulvérisation pour des transects sans haie, avec haie simple et avec haie double, en fonction de la direction (parallèle ou perpendiculaire à la haie) et de la distance de pulvérisation (D'après Lazzaro, et al., 2008)..... 32
Figure 12 : Schémas spatiaux de l'impact d'une haie simple ou d'une haie double par rapport à un transect sans haie sur la dérive de pulvérisation en fonction de la position (parallèle ou perpendiculaire à la haie) de pulvérisation (D'après Lazzaro et al., 2008) 33
Figure 13 : Diminution des pertes d'Atrazines (en % par rapport à un transect sans haie) par le ruissellement (gauche) ou les matières en suspension (droite) en fonction du type de haie et de la pente (D'après Wang et al., 2018). 34
Figure 14 : Typologie fonctionnelle des haies sur talus 44
Figure 15 : Typologie fonctionnelle des haies avec absence de talus..... 45
Figure 16 : La densité de haies en France par commune 48
Figure 17 : Résultat du calcul de pente réalisé à partir de la BD Alti (250 m) sur l'ensemble du pays. 49
Figure 18 : Résultat de la sélection des zones où la pente est supérieure à 15%..... 50
Figure 19 : L'occupation du sol pour les zones où la densité de haies est supérieure à 15%..... 50
Figure 20 : Le type d'occupation du sol en fonction des classes de pente pour les zones où la densité de haies est supérieure à 4%..... 51
Figure 21 : Localisation, occupation du sol et vue aérienne du secteur sélectionné dans les Hautes-Alpes 53
Figure 22 : Localisation, occupation du sol et vue aérienne du secteur situé dans les Côtes-d'Armor 54
Figure 23 : Le linéaire de haies sur les deux secteurs. A gauche le secteur localisé dans le Champsaur et à droite le secteur localisé dans les Côtes-d'Armor. 55
Figure 24 : La position dans le versant, l'occupation du sol et la direction des pentes pour le secteur des Côtes-d'Armor..... 57

Figure 25 : La position dans le versant, l'occupation du sol et la direction des pentes pour le secteur localisé dans le Champsaur. 58
Figure 26 : Résultats de l'application de la typologie. A gauche le secteur localisé dans le Champsaur et à droite le secteur localisé dans les Côtes-d'Armor. 59

Liste des tableaux

Tableau 1 : Teneurs en carbone mesurées à différentes profondeurs et distances d'une haie (D'après Follain, 2005). 25
Tableau 2 : L'ensemble des paramètres influant sur chaque fonction de la haie dans un versant ainsi que leur échelle de disponibilité 40
Tableau 3 : Paramètres sélectionnés pour la typologie 43

Introduction

En France, comme dans l'ensemble des pays où l'élevage et l'agriculture sont développés, des problèmes liés à ces types d'utilisation du sol apparaissent. Ces problématiques peuvent être, par exemple, l'amplification de l'érosion, la baisse de la qualité des sols, les modifications du cycle de l'eau et les conséquences liées au transfert de produits phytosanitaires ou d'engrais. L'ensemble de ces problématiques est étroitement lié aux propriétés physiques et chimiques de l'environnement dans lequel elles prennent place.

La réduction des impacts de ces pratiques est donc une question importante et d'actualité. En ce qui concerne les transferts de produits phytosanitaires ou de nutriments, des réflexions autour de l'application et l'épandage sur les parcelles existent et ont pour objectif de limiter, directement durant l'épandage, leur transfert vers les eaux de surface. Mais, pour la majeure partie des problématiques citées auparavant, il semble qu'il y ait peu de solutions, en dehors de la mise en place de zones tampon ou de la modification de l'occupation du sol et des pratiques.

Les zones tampon sont, dans ce rapport, considérées comme *« tout espace interstitiel du paysage rural, maintenu ou expressément mis en place pour assurer une fonction d'interception et d'atténuation des transferts de contaminant d'origine agricole vers les milieux aquatiques. Il s'agit généralement de dispositifs rustiques, conçus pour être facile à aménager, engendrer un minimum de coûts et nécessiter peu d'entretien »* (définition donnée par le groupe de travail sur les zones tampons). On peut par exemple citer les bandes enherbées, les zones humides artificielles ou encore les haies et les haies sur talus.

C'est dans ce cadre que les haies et les haies sur talus ont été étudiées. Implantées par le passé dans de nombreuses régions françaises et avec des motivations diverses, elles ont été progressivement détruites durant les 50 dernières années. L'augmentation de l'érosion des sols, la baisse de la qualité des eaux de surface, l'appauvrissement des sols qui ont suivi la destruction des haies, ont contribué à la prise de conscience de l'utilité de cette structure dans le paysage. De nombreuses études autour des haies et de leurs impacts sur le versant ont été initiées après cette prise de conscience (Carnet, 1978) (Mérot, 1978).

Grâce à ces études, leur influence sur les processus se déroulant sur le versant a pu être démontrée. Les recherches développées ont principalement abordé leurs impacts sur, la dynamique hydrique et les écoulements de l'eau, l'érosion, les flux et le stockage de nitrates et de matière organique et dans une moindre mesure les transferts de produits phytosanitaires. Les recherches ont commencé progressivement à partir de la fin des années 70 et au début des années 80.

L'objectif de ce rapport est, premièrement, de synthétiser les connaissances disponibles sur l'impact des haies ou des haies sur talus sur le versant ainsi que les processus qui y prennent place. Par la suite, une typologie fonctionnelle des haies ou haies sur talus sera élaborée. Son objectif est de montrer, à partir des fonctions mises en avant dans l'état de l'art, les paramètres de leur environnement physique et géographique, de leur structure ou encore de l'occupation du sol qui font varier leurs fonctions. Pour finir, un travail cartographique sera

réalisé à partir de couches reprenant les paramètres retenus dans la typologie. En partant de l'échelle nationale, l'objectif est d'isoler des secteurs intéressants sur lesquels la typologie pourrait être appliquée. Cette application à l'échelle d'un petit bassin versant ou d'un versant permettra de vérifier si les paramètres avancés par la typologie sont mobilisables et fonctionnels pour isoler la fonction d'une haie dans un versant.

Nous allons dans un premier temps présenter l'institut et l'équipe au sein de laquelle j'ai effectué mon stage. Cela permettra de détailler la place et le contexte de mon travail dans les objectifs finaux de l'équipe. Dans un deuxième temps, l'état de l'art permettra de développer le premier objectif de ce rapport qu'est la synthèse des connaissances disponibles sur les impacts de la haie sur le versant et les processus qui y prennent place. La dernière partie du rapport abordera l'élaboration de la typologie ainsi que les travaux cartographiques pour sa vérification et sa mise en place.

1 Présentation de l'institut

1.1 Historique et présentation de l'institut

L'histoire commence en 1982 avec la fusion du CERAFER (centres nationaux d'études techniques et de recherches technologiques pour l'agriculture, les forêts et l'équipement rural) et du CTGREF (centre technique du génie rural des eaux et des forêts). A cette époque l'institut se nomme Cemagref (Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts). Le centre est, à cette époque, un EPA (établissement public à caractère administratif) mais il devient le 1er janvier 1986 un EPST (établissement public à caractère scientifique et technologique) sous la double tutelle des ministères chargés de la recherche et de l'agriculture. Sur les 30 ans d'existence de l'institut, les thématiques ont beaucoup évolué, des problèmes de mécanisation en agriculture et d'aménagement rural vers des questions agro-environnementales.

En 2012 le Cemagref devient Irstea. C'est l'occasion pour l'institut de mieux affirmer son positionnement au cœur de la recherche environnementale sur les questions de l'eau, de la gestion des risques, des technologies vertes et de l'aménagement durable du territoire, sans abandonner le modèle de « recherche finalisée » développé par le Cemagref. Ce modèle a pour objectif de produire des solutions concrètes et bénéfiques à la décision publique. L'approche pluridisciplinaire de l'institut est un trait d'originalité mais aussi une force qui fait sa réputation.

Le modèle de recherches est basé sur 4 grands axes :

- Une démarche partenariale sur des aspects technologiques et méthodologiques, avec de nombreux acteurs économiques, que ce soit des entreprises ou des pôles de compétitivité. Cette démarche partenariale a été mise à l'honneur en 2006 quand l'institut a été labellisé Carnot. Label que l'institut possède encore.

- Une recherche en appui aux politiques publiques grâce aux nombreuses collaborations avec les ministères de l'agriculture et de la transition écologique et solidaire ou encore les collectivités.

- Une coopération scientifique avec de nombreux acteurs de la recherche, universités, instituts de recherche, pôles de compétence ou encore au travers de la création de l'alliance nationale de recherche pour l'environnent.

- Une dimension européenne et internationale avec une implication dans les réseaux européens de recherche en environnement (PEER ou Eurqua) et une coopération avec des établissements de recherche dispersés dans le monde.

L'institut compte environ 1533 collaborateurs dont 1129 chercheurs, ingénieurs, doctorants ou post-doctorants (chiffre 2016) répartis sur 3 départements de recherche, eaux, écotechnologies et territoires. Le budget annuel pour 2016 était de 109,5 millions d'euros avec 24% de ressources propres.

L'institut est composé de 9 centres régionaux.

Figure 1 : Les 9 centres Irstea en France

1.2 Le centre Lyon-Villeurbanne

Le centre Lyon-Villeurbanne est spécialisé sur la thématique de l'eau. De la gestion de la ressource à sa dépollution (ou prévention contre les risques de pollutions), en passant par l'étude des risques liés au cycle de l'eau, un grand nombre de chercheurs collaborent.

Le centre est composé de trois unités de recherche :

- RiverLy
- REVERSAAL, réduire, réutiliser, valoriser les ressources des eaux résiduaires
- Geste, gestion territoriale de l'eau et de l'environnement, basée à Strasbourg.

L'unité RiverLy est composée de neuf équipes dont l'équipe Pollutions Agricoles Diffuses au sein de laquelle j'ai effectué mes recherches.

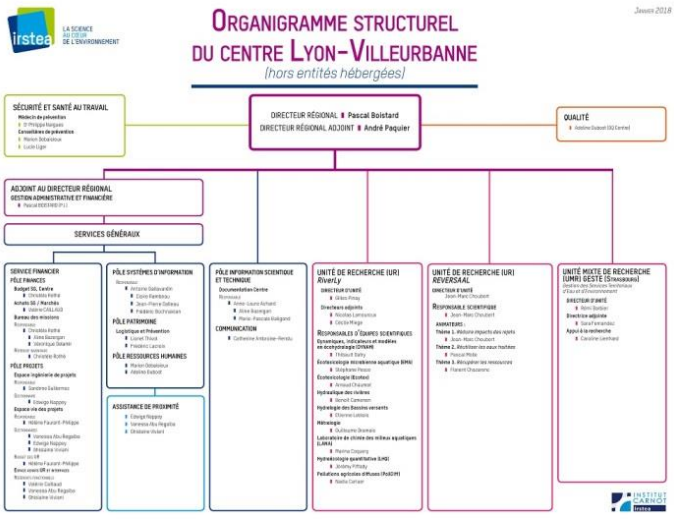


Figure 2 : L'organigramme du centre Irstea Lyon-Villeurbanne

1.3 L'équipe pollutions agricoles diffuses

L'équipe travaille depuis plus de 15 ans sur les voies de transfert et le devenir des produits phytosanitaires entre leur lieu d'application et les eaux de surface. Elle s'attache notamment à évaluer l'influence, sur ces transferts, des différents types de zones tampon (bandes enherbées, fossés), l'objectif étant, à terme, de développer des modélisations prenant en compte la structure du paysage à l'échelle du petit bassin versant.

Elle s'appuie, pour développer ces modélisations, sur des expérimentations de terrain ou des suivis en conditions naturelles au sein des écoulements d'eau de surface ou de sub-surface.

1.4 Contexte de mes recherches

Dans l'objectif de prendre en compte l'impact de la structure paysagère sur les transferts de produits phytosanitaires à l'échelle du petit bassin versant, l'équipe est obligée de travailler séparément sur l'influence de certaines structures du paysage pour par la suite les intégrer dans un modèle à l'échelle du bassin versant. Le modèle développé (PeshMelba pesticides et hydrologie : modélisation à l'échelle du bassin versant) possède déjà des modules de parcelles, de rivières ou encore de fossés. L'objectif, à court terme, est d'y inclure les bandes enherbées ainsi que les haies et les talus.

C'est dans ce contexte, que l'équipe se tourne sur l'impact de la haie ou haie sur talus sur ces transferts. Etant une structure paysagère très présente à l'échelle nationale, la connaissance de son action sur ces transferts est importante pour pouvoir l'intégrer au modèle en question.

L'objectif de mon travail pour l'équipe est donc de synthétiser les connaissances disponibles sur l'impact de cette structure du paysage sur le versant ou le bassin versant ainsi que sur les processus qui s'y déroulent. Une attention particulière sera portée sur ses impacts sur les transferts de produits phytosanitaires. La grande diversité structurelle des haies sous-entend aussi une grande diversité dans les influences qu'elle peut avoir à ces échelles. C'est pourquoi il est nécessaire de caractériser les paramètres principaux qui influencent les fonctions de la haie dans le versant. Grace à ce travail, l'équipe pourrait isoler des types de haies ou haies sur talus intéressants pour un suivi éventuel.

2 État de l'art

2.1 Introduction

Dans cette partie, l'objectif est d'aborder l'impact de la haie ou de la haie sur talus sur les différents processus de transfert s'opérant à l'échelle d'un versant. Nous allons détailler l'impact de la haie sur l'érosion du versant, la dynamique hydrique et les écoulements de l'eau, le stockage et les flux de nitrates et de matière organique et pour finir les transferts de produits phytosanitaires. Les vecteurs du transfert de produits phytosanitaires sont principalement l'érosion et les écoulements divers de l'eau. Grâce à ce travail nous allons aussi pouvoir aborder les différents paramètres influençant l'importance de son impact sur ces différents transferts, paramètres qui seront réutilisés pour la partie suivante.

2.2 Définition, historique et caractérisation de l'objet d'étude

2.2.1 Définition et historique

La haie sur talus est, par définition, l'assemblage de deux éléments du paysage. D'une part la haie, qui peut être définie comme une formation linéaire d'origine anthropique, composée d'arbustes ou d'arbres, créée pour remplir des fonctions variées et d'autre part, le talus, que l'on peut considérer comme une levée de terre. La haie n'est pas toujours implantée sur un talus, on la retrouve aussi directement sur le sol. Dans la suite du rapport, le terme « haie » sera employé pour décrire les haies et haies sur talus. La présence du talus ne sera signalée que s'il est nécessaire de le préciser, comme par exemple dans les parties abordant les impacts de la haie sur le reste du versant.

La diversité morphologique et structurelle des haies est aussi importante que le nombre de fonctions qui ont justifié leur mise en place. L'importance que la haie a prise dans le paysage français a même conduit à une définition plus quantifiée et réglementaire, celle de l'IFN (Inventaire Forestier National), *« Ligne boisée d'une largeur moyenne en cime inférieure à 25 mètres et d'une longueur au moins égale à 25 mètres, comportant au moins trois arbres recensables d'essences forestières avec une densité moyenne d'au moins un arbre recensable tous les dix mètres. Les arbres ne répondant pas à cette dernière condition de densité sont des arbres épars ».* Cette définition est applicable aussi aux haies sur talus. C'est l'une des structures principales des paysages agricoles d'Europe de l'ouest (Caubel, 2001) mais on la retrouve aussi dispersée dans le monde, comme en Asie, en Amérique ou encore en Afrique (Baudry, et al., 2000). Elle constitue la plupart du temps un réseau, plus ou moins dense et étalé selon les pratiques locales, que l'on nomme souvent bocage. L'un des exemples le plus connu en France est le bocage breton.

Les origines de la haie sont assez compliquées à déterminer. Les premières traces que l'on trouve en Europe remontent au néolithique puis à l'antiquité sous la forme d'enclos à bestiaux. Beaucoup de sites où l'on peut observer de si vieilles structures sont en Angleterre, comme par exemple le site archéologique du Zennor en Cornouailles ou encore celui de Dartmoor (Baudry & Jouin, 2003). En France, les premières traces de ces structures sont plus récentes. Elles remontent à l'âge du fer et se situent sur le littoral Breton. Ce sont des talus qui

ont été recouverts et donc conservés lors de la poussée dunaire. On trouve peu de traces plus anciennes car il est probable qu'une grande partie des structures en place à cette époque aient été remaniées au moyen-âge.

Les haies apparaissent plus largement aux 11ème et 12ème siècles, lors du grand défrichement. A cette époque, elles clôturent les terrains, servent d'enclos ou encore bordent les chemins. Il est possible que leur plantation ait aussi été amorcée à des fins d'irrigation et de drainage (Baudry & Jouin, 2003). La deuxième grande phase d'extension remonte aux 18ème et 19ème siècles, avec comme principaux éléments déclencheurs, l'essor démographique, l'abolition des propriétés nobiliaires et le développement d'une agriculture à but de rendement. Les populations ont fortement augmenté en campagne et les demandes de bois deviennent conséquentes, réduisant violemment les surfaces forestières. La haie apporte donc une alternative pour ce qui est du bois énergie. L'abolition des propriétés nobiliaires qui fait suite à la révolution, oblige à un partage des terres et donc à une délimitation de chaque propriété, passant par la clôture des parcelles. Au 19ème siècle, la loi oblige à clore les parcelles, le linéaire de haie sur talus augmente alors fortement. La fin du 19ème siècle et les premières décennies du 20ème siècle correspondent à la phase de prospérité du modèle et d'étendue maximale des haies et du réseau bocager en général. Il occupe à cette époque environ 280 000 ha en Bretagne soit autant que les massifs forestiers (Lefeuvre, 1986).

A partir de 1950, l'intensification et la mécanisation de l'agriculture se développent très rapidement. La seconde guerre mondiale a permis de grandes avancées en matière de mécanisation. Des engins sont alors importés puis produits en France tels que le tracteur ou encore la moissonneuse batteuse. Les petites parcelles composant le bocage deviennent de véritables freins à la production car les engins ne peuvent y pénétrer. On observe alors une rapide destruction du bocage et donc du réseau de haies le composant. Le linéaire bocager occupait en Bretagne 320 000 km en 1961, contre 250 000 km en 1996 (Caubel, 2001). Sur le territoire français dans son ensemble, on observe entre la fin des années soixante et les années quatre-vingt, une disparition d'environ 600 000 km de haies (Baudry & Jouin, 2003). Cette rapide disparition des structures composées de parcelles de petite taille est aussi observée sur les autres continents avec plus ou moins de décalage, la mécanisation et le basculement vers une agriculture intensive ne s'effectuant par forcément durant les mêmes années.

La haie n'a pas toujours été bien perçue, elle a beaucoup fait débat par le passé. Lors de sa grande apparition aux 11ème et 12ème siècles, son utilité est très critiquée. Elle fait de l'ombre sur les cultures, attire les oiseaux ou encore, elle n'est pas une barrière solide (Lefeuvre, 1986). Les aspects physiques et écologiques ne sont pas encore réellement pris en compte à cette époque. Progressivement la haie s'impose quand même dans les paysages agraires, surtout à partir du moment où elle permet de limiter les propriétés. Par la suite, durant la période de développement de l'agriculture intensive, tout ce modèle va être totalement remis en question. La haie bloque la lumière et freine la pousse des espèces cultivées, elle contraint énormément le passage des engins ce qui ralentit le travail et entraîne des pertes financières. La destruction d'un certain nombre d'entre elles est donc choisie. Il faudra attendre les années 1970 pour voir les premières initiatives de restauration ou de mise en valeur du bocage ainsi que les premières études sur le fonctionnement et les intérêts de la haie. Depuis, les études

sont plus nombreuses. Elles abordent principalement son impact sur l'organisation des sols, les flux hydriques, la régulation des stocks de nitrates, la teneur en matière ou carbone organique du sol à leurs abords ou encore, de façon plus rare, son impact sur les transferts de produits phytosanitaires.

Malgré cela, on trouve toujours ce type de structures en France et ailleurs dans le monde car l'efficacité des haies dans la régulation du ruissellement et de l'érosion est connue depuis longtemps et permet la production sur des zones de forte pente. D'ailleurs, un grand nombre d'études sur les haies et leurs impacts ont été réalisées sur des transects aux pentes souvent supérieures à 10% (Alegre & Rao, 1996) (Kiepe, 1996).

2.2.2 Nature et structure pédologique de la haie ou haie sur talus

Dans cette partie ne sont abordées uniquement que les haies sur talus. En effet, la présence du talus à un impact fort sur les processus que nous allons détailler ci-après.

De manière générale, on peut distinguer 3 zones dans la structure du talus : La zone superficielle, le noyau et la zone basale (Carnet, 1978) (Mérot, 1978).

La zone superficielle, d'une épaisseur allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres, est composée d'un horizon organique. Son épaisseur est variable en fonction du type d'espèces composant la haie et de l'activité des décomposeurs.

Le noyau est la partie centrale de la levée de terre, compris entre la zone superficielle et la partie basale qui ne fait plus partie de la levée de terre. Il est de même composition que les sols avoisinants. Mais il est plus poreux et perméable. C'est un horizon organo-minéral d'épaisseur variable, dépendant de la couche superficielle et du substrat.

La partie basale possède très souvent des horizons allant d'une composition proche de ceux du noyau à des horizons plus massifs. C'est pour cela que l'hydromorphie se met en place dans cette zone. Là aussi, les horizons peuvent être dans la continuité de la parcelle avoisinante mais, dans certains cas, la continuité peut être rompue par les fossés bordant le talus.

Dans l'ensemble on distingue donc la partie organo-minérale, qui est plus épaisse au niveau de la haie sur talus que dans la parcelle. Cette partie du sol s'épaissit au fur et à mesure que l'on approche de l'amont de la haie, mais à l'aval, une discontinuité s'opère et les horizons organo-minéraux se désépaississent brutalement. Pour la partie minérale, la présence de la haie ne modifie pas beaucoup l'organisation des horizons sauf dans le cas où les horizons organo-minéraux sont vraiment très développés. Dans ce cas, on remarque que la partie minérale est plus fine, comme si l'épaississement de la partie organo-minérale s'était faite à ses dépens (Follain, 2005).

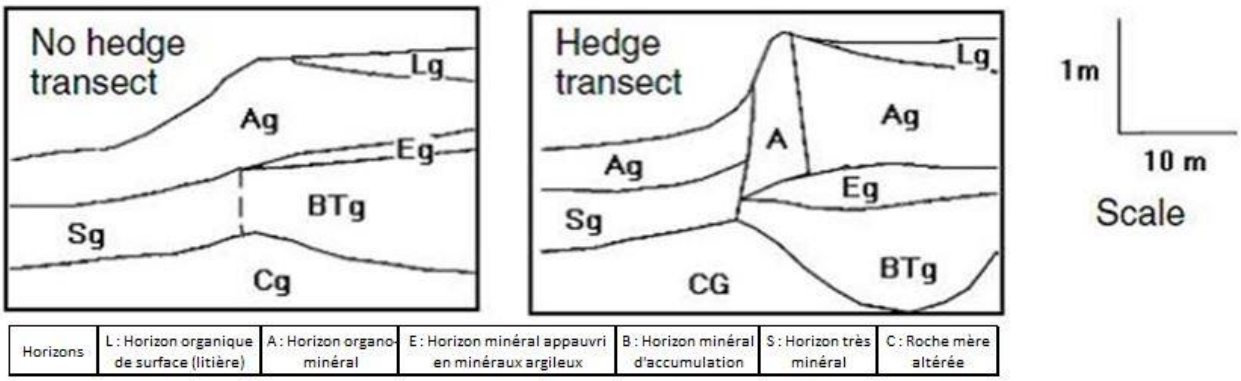


Figure 3 : Comparaison de la structure pédologique entre un transect avec et sans haie sur talus (D'après Caubel et al., 2003)

Le système racinaire des arbres composant la haie impacte beaucoup lui aussi l'organisation du sol. On remarque une forte déstructuration des horizons superficiels, notamment pour les horizons A mais aussi la création de fentes ou brèches dans les horizons plus profonds. De ce fait, la porosité grossière du sol augmente aussi fortement.

Du point de vue de leurs caractéristiques chimiques et biologiques, il n'y a pas de grande disparité entre les talus. L'acidité des sols est globalement plus marquée que sur la parcelle et le complexe absorbant (argilo-humique) est très désaturé. La densité apparente du sol diminue à proximité de la haie notamment à cause de l'augmentation de la porosité et de l'action des invertébrés. La dynamique de la teneur en matière organique est modifiée sous l'effet des conditions microclimatiques et des micro-organismes. L'augmentation de la teneur en carbone organique par rapport à la parcelle est principalement due à l'augmentation des restitutions carbonées (feuilles d'arbres, micro-organismes) (Benhamou, 2012).

D'un point vu morphologique on peut aussi souligner la nature dissymétrique du talus dans des conditions de moyenne ou forte pente. La rupture aval devient donc plus importante (Carnet, 1978) (Mérot, 1978).

2.3 Impacts de la haie sur le versant

2.3.1 Modification de la toposéquence

Comme dit précédemment, le système haie/talus est structuré et organisé pédologiquement différemment des sols avoisinants. Il présente donc une rupture dans l'organisation des sols le long de la toposéquence. On peut l'observer de par la position sur la toposéquence, amont ou aval de la haie.

A l'amont, on observe un épaississement des horizons organo-minéraux. L'épaississement peut s'opérer de deux façons différentes. Soit une rupture très marquée sur les 5-10 derniers mètres avant la haie soit, un épaississement plus étalé sur la parcelle, moins remarquable mais qui peut être tout aussi important. Ce phénomène est dû à deux processus. Le premier, qui semble en être la cause principale est le processus d'érosion-sédimentation. Le deuxième, moins souvent étudié et qui a probablement un effet moins important, du moins plus compliqué à évaluer, est l'ensemble des processus biologiques (Follain, 2005). Sur la partie la

plus haute de la parcelle l'érosion arrache des sédiments et les transporte le long de la pente jusqu'à ce qu'ils rencontrent un élément qui les bloque. La haie joue ce rôle de barrage et force donc le dépôt en amont de la haie. Plus le processus s'opère, plus la pente s'affaiblit en amont de la haie. En conséquence les dépôts ont lieu encore plus tôt dans la parcelle. Au fil du temps, le phénomène remonte donc le long du versant et on observe un épaississement des horizons organo-minéraux sur une distance de plus en plus importante. A cela viennent s'ajouter les processus biologiques, découpés en deux classes, l'effet des plantes et l'effet des animaux. L'effet des plantes est principalement dû à leur système racinaire. Ce dernier en grandissant, bougeant (notamment durant les tempêtes où les racines s'agitent) crée ou agrandit des galeries dans les horizons superficiels du sol, provoquant son épaississement. L'effet des animaux, principalement de la pédofaune, est le transport de sol des profondeurs vers les horizons de surface (Follain, 2005).

En aval de la haie, les horizons organo-minéraux sont totalement déconnectés des phénomènes qui s'opèrent à l'amont. Une diminution de leur épaisseur est observable. La rupture de pente que crée la haie provoque une érosion accentuée à son aval. Les horizons superficiels sont donc lessivés et leur épaisseur diminue (Viaud, et al., 2009).

Les horizons minéraux sont eux, beaucoup moins affectés par la présence ou non de haie. Ils restent parallèles à la roche sur laquelle ils se trouvent et ne varient qu'en cas de variation brutale de l'horizon sous-jacent. Dans certain cas, quand les horizons organo-minéraux sont vraiment très épais, on observe une diminution des premiers niveaux minéraux, voire même leur disparition. Cela laisse à penser que, quand les horizons organo-minéraux se développent fortement, ils le font aux dépens des premiers horizons minéraux, jusqu'à provoquer leur disparition (Follain, 2005).

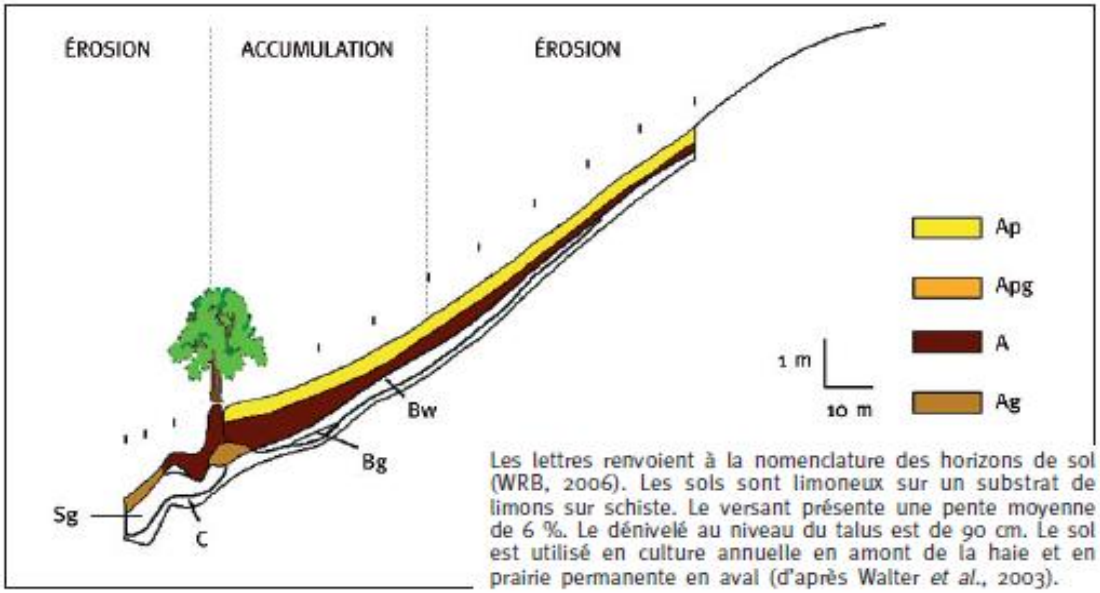


Figure 4 : Organisation des horizons du sol le long d'un versant présentant une haie dans le massif Armoricain (D'après Viaud et al., 2009)

Pour résumer, la toposéquence est principalement modifiée dans les 10 voire les 20 derniers mètres en amont et aval la haie. En amont les horizons superficiels s'épaississent, dans certain cas, au détriment des horizons minéraux plus profonds. La haie est donc un frein à l'érosion des versants. La quantité de sédiments retenus est d'ailleurs estimée entre 70 et 95% de la masse mobilisée sur la parcelle (Alegre & Rao, 1996) (Kiepe, 1996) (Viaud, et al., 2009). En aval, l'érosion est augmentée, les horizons organiques et organeaux minéraux s'amincissent.

2.3.2 Modification de la dynamique hydrique

2.3.2.1 L'interception

L'interception correspond à la partie des précipitations qui est retenue par la végétation, composant la haie dans notre cas, et qui s'évapore sans jamais atteindre le sol. On peut considérer que la végétation possède une capacité de réservoir à travers cette fonction. Cette capacité est variable selon l'indice de surface foliaire (LAI, leaf area index) et, dans une moindre mesure, de l'architecture du rameau et des houppiers de l'arbre en question (Benhamou, 2012). Lorsque ce réservoir est plein, l'eau fini par s'écouler le long des feuilles et du tronc pour rejoindre le sol.

Pour un couvert forestier en climat tempéré, l'interception représente 20 à 40% des précipitations (Benhamou, 2012). Ghazavi (2008), durant ses travaux de thèse, a pu mesurer l'interception d'une haie bocagère grâce à des pluviomètres à différentes distances de celle-ci. Les résultats ont montré que l'interception moyenne sur une largeur de 15 m par évènement pluvieux était de 28% durant la période avec feuille et 12% durant la période sans feuille.

2.3.2.2 Impacts de la haie sur la dynamique hydrique des sols

L'impact de la haie sur la dynamique hydrique des sols est très souvent abordé par saison, nous allons en faire de même.

- Hiver et début du printemps

A cette saison, le sol au voisinage de la haie est caractérisé par une humidité assez élevée même si elle est un peu plus faible que sur le reste de la toposéquence (Ghazavi, 2008). Ce léger retard dans l'humectation du sol au voisinage de la haie est principalement localisé à faible profondeur, sur quelques mètres maximum. Ce retard dans l'humectation des sols est dû à l'action du système racinaire. On observe une humidité plus élevée à l'amont qu'à l'aval de la haie, ce qui illustre bien son effet de barrage et de drain favorisant l'infiltration. Le niveau d'humidité du sol est très dépendant de la nappe sous-jacente et aussi de l'importance des précipitations (Caubel, 2001).

Dans l'ensemble, au début du printemps, on devrait observer une saturation du sol le long de la toposéquence, incluant les zones à proximité de la haie.

– Fin du printemps et été

Sur l'ensemble de la toposéquence, on observe un assèchement progressif des sols. Ce dessèchement est plus lent au pied de la haie car l'ombrage de celle-ci limite l'évaporation de l'eau contenue dans les horizons superficiels du sol. Inversement, il est plus sévère sous la haie que sur le reste de la toposéquence, car l'évapotranspiration de la haie est souvent plus importante que celle d'une culture basse, elle reçoit plus d'énergie par advection (Carnet, 1978). L'assèchement est donc plus lent mais plus sévère dans la zone où se situe la haie, dans un premier temps l'assèchement est plus important dans la zone d'action du système racinaire puis se généralise sur tout le transect si la sécheresse continue.

– Automne

En automne, l'inversion du bilan hydrique lance une période de réhumectation des sols. Ces derniers se réhumectent par infiltration des pluies de surface, écoulements latéraux provenant du versant et remontée de nappe (Ghazavi, 2008). La différence entre un transect avec haie et sans haie se fait alors fortement sentir. Pour un transect sans haie, la réhumectation est plus rapide et homogène. Dans le cas où il y a présence d'une haie, il n'y a que les zones situées à plus d'une dizaine de mètres de la haie qui ont un rythme comparable à celui du transect sans haie. Pour les zones aux abords de la haie, la réhumectation est plus tardive du fait que la sécheresse était plus importante en fin d'été. C'est à cette saison que les différences entre un transect avec et sans haie sont les plus importantes. Un transect comportant une haie peut avoir jusqu'à 2 ou 3 mois de retard dans sa réhumectation pour les zones qui subissent directement l'influence de la haie (jusqu'à une dizaine de mètres en amont de la haie).

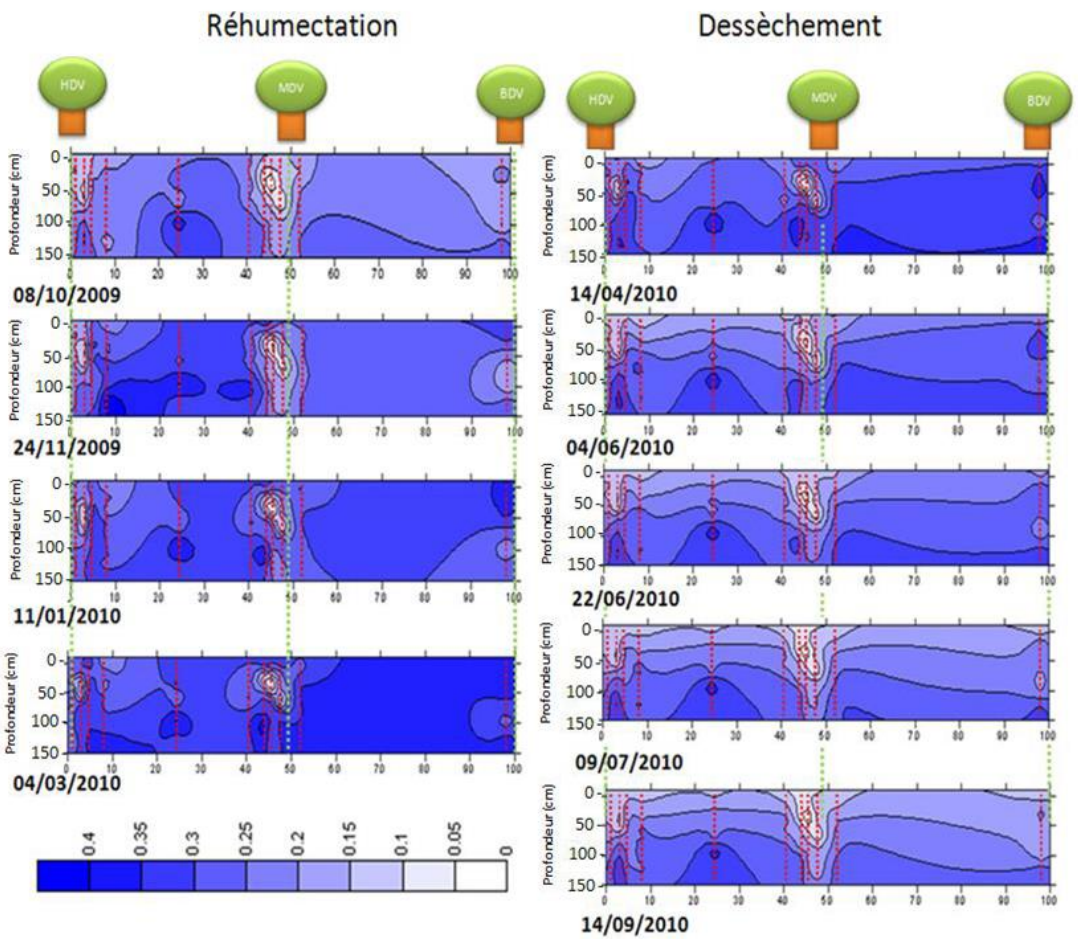


Figure 5 : Cartes des isovaleurs de l'humidité volumique mesurées par la sonde capacitive à différentes dates sur un transect allant du haut de versant au bas de versant et comptant trois haies, en haut de versant (HDV), en milieu de versant (MDV) et en bas de versant (BDV) (D'après Benhamou, 2012).
Les profils et profondeurs de mesures sont représentés par des points rouges.

Le schéma précédent illustre ce fonctionnement saisonnier de la dynamique hydrique des sols aux abords de la haie. On observe très bien le retard dans la réhumectation des sols sous la haie en automne et début d'hiver ainsi que l'assèchement plus sévère en été.

La haie impacte la dynamique hydrique des sols principalement parce qu'elle modifie les écoulements de l'eau, qu'ils soient de surface, de subsurface ou encore de nappe. Il convient donc d'étudier plus en détail quels sont les mécanismes à l'origine de cette modification des écoulements de l'eau. Nous allons donc, dans un premier temps, présenter les différentes formes d'écoulement de l'eau puis ensuite les impacts de la haie sur ceux-ci.

2.3.2.3 Les différentes formes d'écoulement de l'eau

Durant un évènement pluvieux, les écoulements de l'eau au sein d'un versant ont lieu en surface ou à différentes profondeurs dans le sol. Quand les écoulements ont lieu en surface, on parle de ruissellement, quand ils ont lieu dans les premières dizaines de centimètres du sol, on parle d'écoulements hypodermiques ou de subsurface et quand ils s'effectuent plus en profondeur, on parle d'écoulements souterrains.

Par souci de compréhension, il convient de rappeler que la conductivité hydraulique (Ks) est une grandeur qui exprime l'aptitude d'un milieu poreux à laisser passer un fluide sous l'effet d'un gradient de pression.

Le ruissellement peut être généré par deux processus principaux.

Dans le cas où il y a dépassement de l’infiltrabilité locale du sol, on parle de ruissellement par excès d’infiltration. Les dépressions superficielles de surface liées à la microtopographie se remplissent et ensuite l’eau en excès est évacuée par ruissellement de surface. On parle aussi de ruissellement Hortonien. Ce type de ruissellement peut aussi se mettre en place si le sol est parfaitement imperméable, ce qui est rare en condition naturelle.

Un deuxième processus est aussi responsable du ruissellement. Il se met en place sur des sols hydromorphes ou saturés en eau (sur l’ensemble du profil). On parle de ruissellement par saturation. L’eau tombant sur ces surfaces saturées ne peut pas s’infiltrer et se transforme donc en ruissellement de surface (Ambroise, 1999).

L’eau qui tombe à la surface du sol tend toujours à pénétrer dans le sol par infiltration. Dans un sol non saturé, le flux infiltré peut, soit recharger localement le sol (rétention hydrique), soit percoler plus en profondeur. Ces deux phénomènes sont contrôlés principalement par la conductivité hydraulique et la porosité du sol. L’eau qui percole vers la profondeur peut se retrouver bloquée par une couche de sol moins perméable (conséquence d’une baisse de la porosité et donc de la conductivité ou d’une discontinuité structurale du profil, limite d’horizon, limite sol-roche etc…). Cette eau s’accumule et forme des nappes. Les écoulements dans ces nappes sont majoritairement latéraux. Ils peuvent rejoindre la surface et le réseau hydrographique ou sortir du bassin versant sous forme d’écoulements souterrains (Ambroise, 1999).

Dans les premières couches du sol, les écoulements hypodermiques ou subsuperficiels se mettent en place. Ils ont lieu quand l’eau s’infiltre et rencontre rapidement une couche peu ou pas perméable. L’eau s’accumule et sous l’effet de la pente et de l’augmentation de la conductivité hydraulique locale, elle s’écoule.

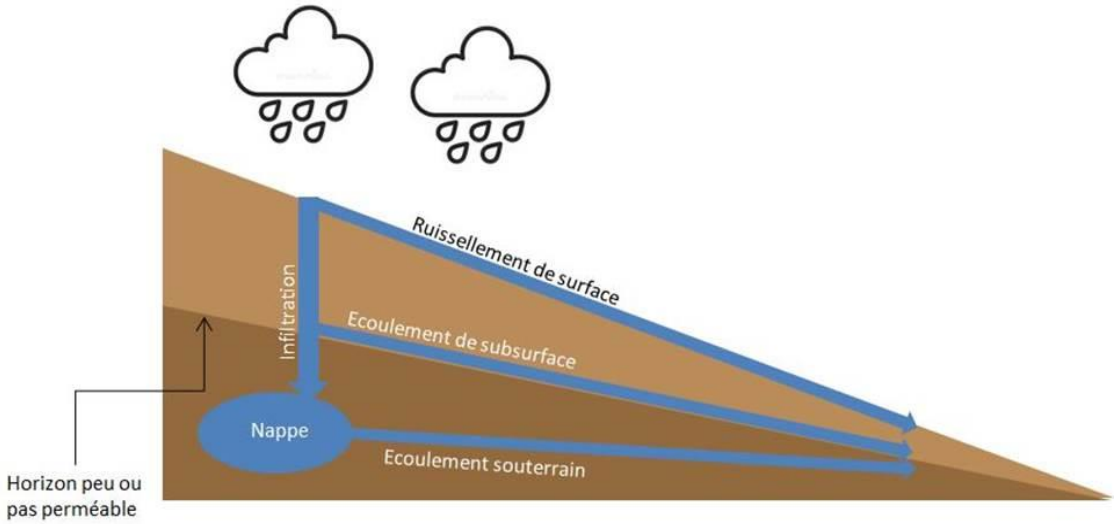


Figure 6 : Schéma récapitulatif des différentes formes d'écoulement le long d'un versant

On peut donc différencier 3 grands types d'écoulement qui se mettent en place après les précipitations. La haie, de par sa structure, son fonctionnement et sa composition modifie la dynamique de ces écoulements. Nous allons les aborder maintenant.

2.3.2.4 Impacts de la haie sur les écoulements de l'eau

Dans le cas du ruissellement hortonien, la haie joue un rôle de barrière physique qui permet de stopper sa progression. Cela évite que le flux se concentre et devienne plus important. De plus, comme dit précédemment, le sol à l'amont de la haie est assez poreux et donc perméable. Cela confère aussi à la haie un rôle de drain subvertical très important, car, en plus d'être bloqués, les écoulements sont très souvent infiltrés (Benhamou, 2012).

Pour ce qui est du ruissellement sur sols saturés, la haie contribue notamment à limiter l'expansion de zones saturées en eaux et donc contribue à limiter cette forme de ruissellement (Benhamou, 2012).

La part du ruissellement bloqué par la haie est en général élevée mais peut être assez variable selon des paramètres comme la pente, l'intensité des précipitations et le type de sol. Par exemple, Alegre et Rao (1997), sur un versant pentu (15%) et composé de sol fragile, ont mesuré une limitation du ruissellement de l'ordre de 83%. Pour Kiepe (1999), cette limitation est de l'ordre de 77%. Dans l'ensemble, on peut considérer que le ruissellement peut être réduit de 50 à 80%.

Les écoulements de subsurface sont eux principalement affectés par la présence du système racinaire. Ce dernier modifie les écoulements via un prélèvement dans la zone non saturée. Sachant que les arbres sont le couvert végétal ayant la plus grande capacité de prélèvement (Ghazavi, 2008) et que leurs zones préférentielles de prélèvement sont dans les couches superficielles du sol, leurs impacts sur les écoulements subsuperficiels sont certains. Ils participent aussi à une redistribution des écoulements dans la subsurface car les racines augmentent la porosité du sol. Cet impact n'a pas été beaucoup abordé et parait difficilement quantifiable. Il semblerait qu'il évolue selon différents paramètres comme les conditions

climatiques, la nature du sol, l'évapotranspiration globale du couvert végétal et donc de la saison

L'impact de la haie sur les nappes libres, soit les nappes se situant autour de quelques mètres de profondeur est important aussi. On peut observer, dans certain cas, une inversion du gradient de nappe. Les écoulements dans la nappe s'éloignent donc de l'axe formé par la rivière. Il est possible que cela soit dû à une recharge plus importante de la nappe au niveau de la zone humide ou de la rivière en pied de versant (Benhamou, 2012). Le phénomène est intensifié aussi par le rôle du système racinaire de la haie qui prélève de l'eau dans les nappes. Caubel (2001) a pu estimer ce flux de nappes intercepté par la haie en automne. Il est de l'ordre de 2 à 6% du flux total transitant par la nappe à cette période.

De par cette modification du gradient de nappe et ses prélèvements, la haie modifie aussi sensiblement les transferts latéraux au sein des nappes. En effet il semblerait que, plus le gradient hydraulique est faible, plus les prélèvements dans la nappe sont importants. Pour un gradient hydraulique de 0,01 m.m-1, le prélèvement peut, par exemple, atteindre 68% des transferts latéraux de nappes (Ryszkowski & Kędziora, 2007), soit un prélèvement beaucoup plus important que celui mesuré par Caubel (2001). On peut donc valider l'existence du phénomène mais signaler quand même qu'il est compliqué à évaluer.

Les écoulements qui ont lieu le long du versant et la dynamique hydrique des sols sont donc très impactés par la présence d'une haie ou d'un réseau de haies sur un versant. Les divers rôles de la haie sur ces fonctionnements et dynamiques sont dans l'ensemble bien connus et évalués. Cela permet une bonne compréhension des impacts que peut avoir la présence d'une haie sur les cultures ou activités des parcelles adjacentes.

2.3.3 Impacts sur les flux et le stockage de nitrates

2.3.3.1 Le cycle de l'azote

L'azote est présent dans la nature sous deux états. Un état libre, sous forme d'azote atmosphérique (N2), où il constitue 78 % de l'air que nous respirons et un état combiné, sous forme minérale (ammonium NH4+, nitrite NO2-, nitrate NO3-) ou sous forme organique. L'azote atmosphérique peut être apporté à la plante ou au sol par la pluie ou par fixation industrielle et naturelle. Il est ensuite minéralisé dans le sol (minéralisation, nitrification), absorbé par les végétaux et restitué au sol par ces derniers par décomposition de la litière ou d'organismes morts. Il peut repasser sous un état gazeux et être restitué à l'atmosphère par dénitrification ou volatilisation. La dénitrification a lieu lorsque les micro-organismes manquent d'oxygène (sol saturé en eau), les bactéries du sol transforment alors le nitrate en diazote gazeux (N2).

Le nitrate est très soluble. Il transite sous forme dissoute dans les sols saturés comme non saturés. En milieu non saturé, le transfert de nitrate se fait par infiltration et descente progressive le long du profil en fonction des averses. En milieu saturé, le déplacement se fait par convection avec l'eau et par dispersion.

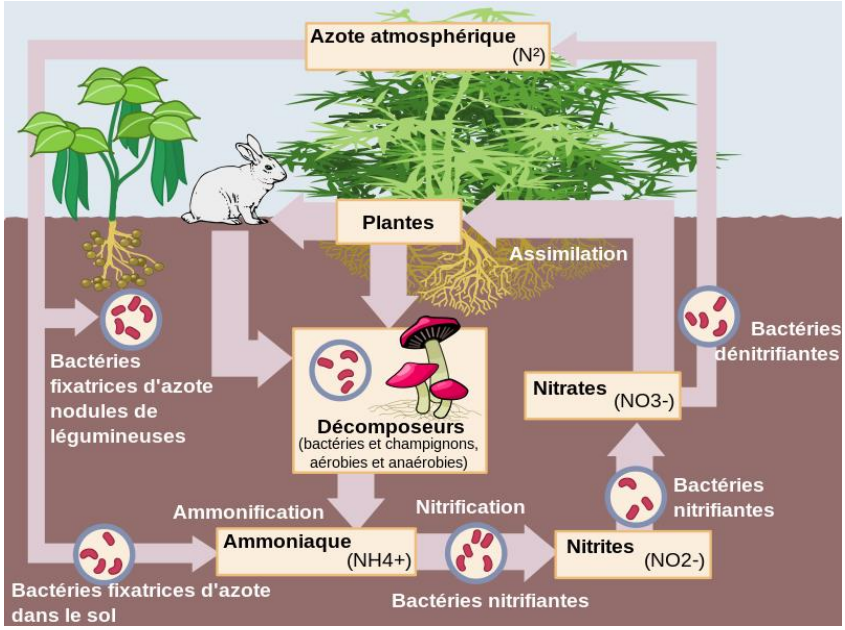


Figure 7 : Le cycle de l'Azote (Dréo Johann, 2006)

2.3.3.2 Utilisation en agriculture et pollutions engendrées

Le nitrate est très utilisé en agriculture sous forme d'engrais, au même titre que le phosphore ou encore le potassium. C'est un nutriment qui permet une croissance accélérée des cultures et donc des rendements supérieurs.

La pollution par les nitrates a un fonctionnement complexe. Etant des nutriments, ils sont consommés à la fois par les plantes et par les micro-organismes présents dans le sol, à travers la matière organique. Les micro-organismes stockent donc l'excédent de nitrate non consommé par les plantes jusqu'à leur mort. Une fois morts, leur décomposition par les bactéries libère l'azote qu'ils avaient séquestré, le restituant au sol. Ce phénomène pouvant se dérouler à tout moment dans l'année, on peut retrouver des quantités d'azote importantes dans le sol à une période où les plantes sont au repos et n'en consomment que très peu. Cet excès de nitrate est alors lessivé par les eaux de ruissellement ou d'infiltration. On peut donc le retrouver dans les eaux de surface longtemps après qu'il ait été épandu.

Une fois dans l'eau, les nitrates présentent un double risque. En trop grande quantité, ils ont des effets toxiques sur la santé humaine s'ils sont ingérés. Dans les milieux aquatiques naturels, l'apport de nutriment qu'ils provoquent se traduit par une croissance excessive de certaines algues (par exemples les algues vertes en Bretagne) et, en conséquence, une diminution de l'oxygène dissous. On appelle ce processus l'eutrophisation.

2.3.3.3 Les impacts de la haie

Une partie du cycle de l'azote est réalisé au sein du sol et de la végétation. La haie a donc une influence certaine, que nous allons détailler par la suite. Ce rôle diffère selon la saison.

Pendant la saison de végétation, les arbres de la haie absorbent le nitrate présent dans le sol ou dans la nappe sous-jacente. Cette absorption est fonction de la profondeur et de l'étalement du

système racinaire (Grimaldi, et al., 2012). Des paramètres tels que la température ou le pH du sol influent sur la capacité des arbres à absorber le nitrate. Avec un pH acide (4-5), le nitrate est absorbé préférentiellement à l'ammonium et inversement. De manière générale, le nitrate disparaît quasiment entièrement de la rhizosphère à cette saison. On peut donc observer des concentrations plus importantes dans la couche superficielle du sol qu'en profondeur, selon les propriétés du système racinaire.

A la fin de l'automne et en hiver, une partie de l'azote prélevé par la végétation retourne au sol par retombée de litière. La partie restante peut être considérée comme immobilisée sur le long terme par la biomasse. Les pluies lessivent le nitrate présent en surface et l'entraînent plus en profondeur ou dans la nappe. La nitrification se développe dans la couche du sol non saturée, dans certains cas, là où le nitrate avait été entièrement consommé par les arbres en été. A cette saison, les sols peuvent aussi être saturés, comme par exemple sous le talus ou à l'amont de la haie. La dénitrification peut alors avoir lieu et faire faiblir le taux de nitrate (Ryszkowski & Kędziora, 2007). Les concentrations en nitrate le long du profil sont donc très hétérogènes.

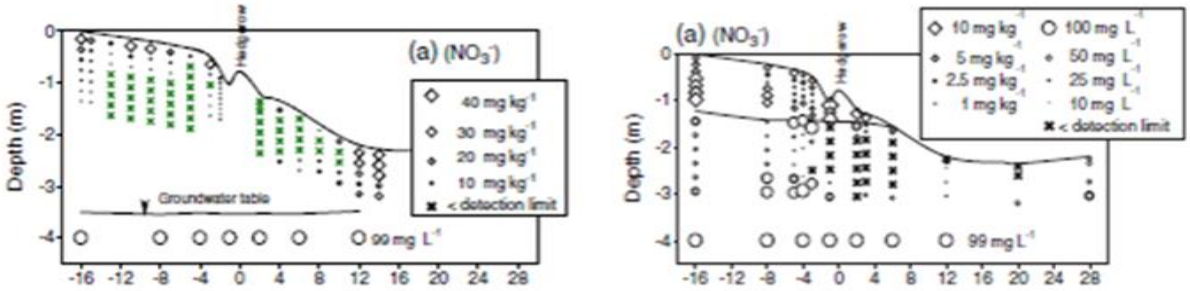


Figure 8 : Concentration en nitrates pour les mois d'octobre 2006 (gauche) et d'avril 2007 (droite) le long d'un transect présentant une haie (D'après Grimaldi et al., 2012).

Ces variations en profondeur sont observables principalement dans la partie superficielle de la nappe. Les parties plus profondes subissent beaucoup moins de fluctuations dans leur concentration en nitrate. Au-delà de 4-5 mètres de profondeur, la concentration en nitrate dissous semble être élevée toute l'année et ne fluctue que très peu (Grimaldi, et al., 2012).

Deux zones d'influence de la haie vis-à-vis de l'azote ont été distinguées par l'IDF et l'ITCF dans leurs rapports sur le rôle épurateur de la haie. Une première zone de 0 à 7 mètres de chaque côté de la haie qui est fortement influencée par la haie et son fonctionnement, ainsi que par ses modifications sur des dynamiques hydriques. Une deuxième zone, de 7 à 20 mètres, qui est influencée dans une moindre mesure.

Dans l'ensemble la haie influence donc directement et indirectement les transferts de nitrate à l'échelle du versant. Elle les influence directement de par l'absorption racinaire. En conséquence, la composition spécifique, la densité, le nombre d'arbres et les types de strates composant la haie, sont des paramètres à prendre en compte pour connaître l'influence d'une haie sur la concentration de nitrate à son abord. Indirectement, la présence de la haie modifie les conditions hydriques favorables aux processus de nitrification ou dénitrification (Caubel,

2001). Dans l'ensemble, la concentration en nitrate du sol baisse pendant les saisons de végétation et augmente au début de l'hiver.

En résumé, la géométrie du système rhizosphère-sol-nappe et des transferts hydriques sont un point clef. L'importance de l'âge de la haie ou de son entretien sont encore à étudier.

2.3.4 Influence sur la matière organique

L'impact de la haie sur la concentration en matière organique du sol est aussi très important. Dans l'ensemble, on distingue des teneurs en carbone organique plus importantes sous la haie que dans la parcelle. Selon Walter and al (2003), il y a deux effets principaux qui expliquent cette distribution. Un effet local, engendré par la haie elle-même et un effet dû à sa fonction anti-érosive.

L'effet local est défini par une concentration en carbone organique plus importante sous la haie que dans la parcelle pour les 30 premiers centimètres du sol. Au-dessous de ces 30 premiers centimètres de sol, la concentration baisse rapidement. Cette distribution est probablement due aux retombées de litière par les arbres composant les haies et à l'action du système racinaire plus en profondeur. Pour résumer, les feuilles d'arbres tombant au sol provoquent la forte concentration en carbone organique dans les premiers centimètres du sol et le système racinaire, lui, pompe une partie de ce carbone organique mais plus en profondeur (Walter, et al., 2003).

L'effet antiérosif, vu précédemment, impacte aussi la teneur en carbone organique. Le déplacement de particules érodées plus à l'amont dans la parcelle correspond en fait, à un déplacement de sol et de ses composants, dont la matière organique. L'accumulation qui est observée dans les premiers mètres à l'amont de la haie, entraîne donc l'augmentation de la teneur en carbone organique au pied de la haie (Adhikary, et al., 2017).

D'autres paramètres comme l'humidité et la température du sol peuvent aussi expliquer ces variations de la teneur en carbone organique à proximité des haies. Mais ceux-ci sont plus compliqués à expliquer et à démontrer.

La présence d'une haie peut contribuer à une augmentation de presque 40% de la teneur en carbone organique dans le sol. Selon Walter and al (2003) cette augmentation peut aller de 13 à 38%. Dans le cadre d'une étude en Bretagne, ils ont démontré que, pour une densité de haies élevée (200 m.ha), le stock moyen pouvait atteindre 117 tonnes de carbone organique par hectare, dont 38% dus à la présence de la haie. Pour une densité plus faible (50 m.ha), le résultat est de 84 tonnes par hectare dont une part due à la présence de haies de 13%. La haie a donc une importance primordiale et sa présence peut faire sensiblement augmenter les stocks.

Dans le tableau suivant, on peut voir d'autres chiffres qui sont les résultats obtenus par Follain (2005), dans le cadre de sa thèse. Les valeurs sont en pourcentage, elles représentent des teneurs en carbone mesurées dans le sol à différentes profondeurs et différentes distances de la haie. On y observe des résultats qui viennent corréler ce qui a été dit auparavant. La teneur

en carbone organique augmente à l'approche de la haie et faiblit très vite avec la profondeur dans le sol.

Distance (m) / Profondeur (cm)	[0 - 5]	[5 - 10]	[10 - 20]	Moyenne
[0 - 5]	4,40	3,80	3,60	3,93
[10 - 15]	3,00	2,60	2,60	2,73
[40 - 55]	1,50	1,10	1,20	1,27
Moyenne	2,97	2,50	2,47	2,64

Tableau 1 : Teneurs en carbone mesurées à différentes profondeurs et distances d'une haie (D'après Follain, 2005).

L'impact de la position (amont-aval) par rapport à la haie ne semble pas avoir été étudié par le passé. Certains résultats cartographiques issus de la thèse de Follain (2005) semblent pourtant montrer qu'à l'aval de la haie, les teneurs en matière organique sont plus faibles qu'a l'amont. Ces observations semblent logiques car l'effet antiérosif de la haie est l'un des responsables de l'accumulation de matière organique à son pied. Comme nous l'avons vu auparavant, l'effet antiérosif n'a lieu qu'à l'amont de la haie alors qu'à l'aval l'érosion est même accentuée. En considérant ce processus, il semble normal que les teneurs en matière organique soit plus faibles à l'aval qu'à l'amont.

2.4 Impacts de la haie sur les transferts de produits phytosanitaires

2.4.1 Introduction

Nous avons pu voir, dans la partie précédente, l'impact de la haie sur différents processus à l'échelle du versant ou du bassin versant, tels que les écoulements de l'eau ou encore l'érosion. Nous allons maintenant nous intéresser à l'impact de la haie sur les transferts de produits phytosanitaires, d'une part parce que ces transferts s'opèrent par le ruissellement ou l'érosion des parcelles et d'autre part, parce que nous avions avancé, dans l'introduction générale de ce dossier, l'objectif de caractériser le rôle de zone tampon de la haie.

2.4.2 Généralités sur les produits phytosanitaires

Les produits phytosanitaires, aussi appelés pesticides ou encore produits phytopharmaceutiques sont des préparations composées d'une ou plusieurs substances actives qui ont pour action de combattre, réduire, lutter ou anéantir des organismes dont la présence est dommageable pour des végétaux.

Ces différents produits sont classés selon la cible qu'ils visent et leur mode d'action. Les plus connus sont les herbicides, les fongicides, les insecticides ou encore les acaricides. Ils sont destinés respectivement à combattre les végétaux, les champignons, les insectes et les acariens.

Leur utilisation « massive » remonte aux années 1950-1960, en lien direct avec la révolution verte. A cette époque, la volonté politique et industrielle ainsi que les progrès technologiques et scientifiques, surtout dans le domaine de la chimie, entraînent une intensification de l'agriculture. Cette politique combine trois éléments :

- Les variétés sélectionnées à haut rendement
- L'importance et la sophistication de l'irrigation
- Les intrants, engrais ou produits phytosanitaires

Depuis, leurs effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine ont été mis en avant. Leur utilisation semble baisser dans les pays européens. La situation de la France pour les 20 dernières années est illustrée par le graphique ci-après.

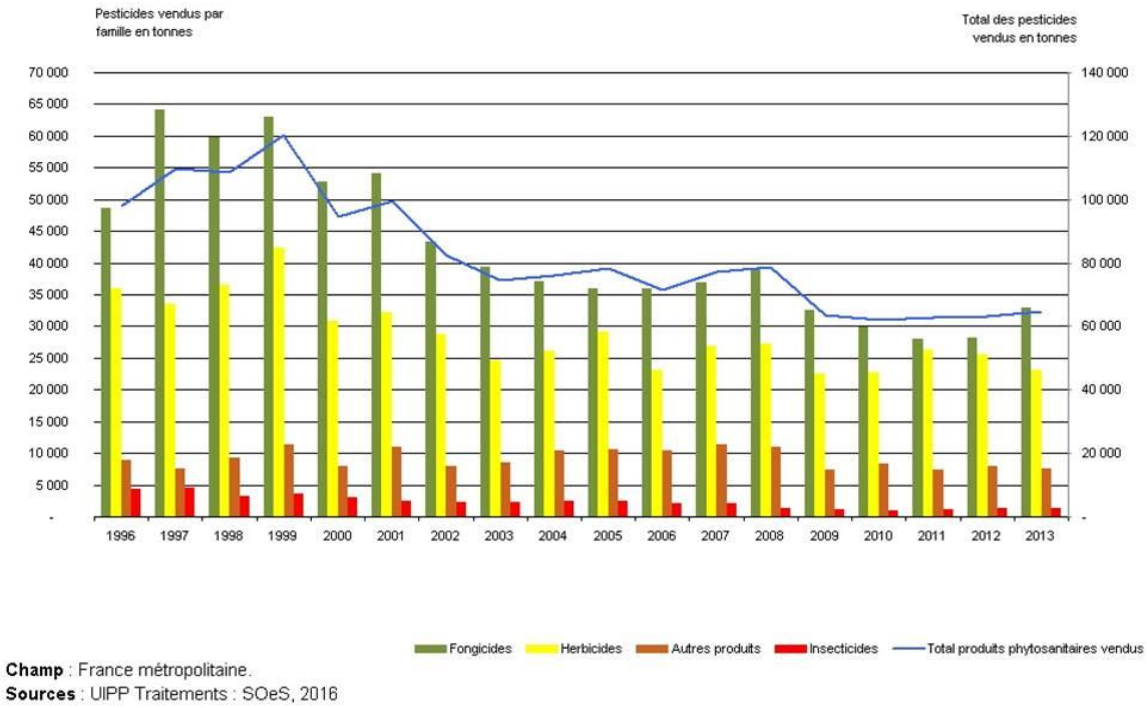


Figure 9 : Evolution des quantités de produits phytosanitaires vendues en fonction de leurs catégories depuis 1996.

Ces produits étant dangereux pour l'environnement et la santé humaine leur mise sur le marché et leurs applications en générale est très réglementé, l'annexe 1 détaille certaines de ces normes au niveau Européen comme national.

2.4.3 Processus de rétention et de dégradation des produits phytosanitaires

La dégradation des produits phytosanitaires est un processus important qui est responsable de leur dissipation et de leur élimination des milieux naturels. Ce processus s'effectue quand le produit est en solution ou en phase absorbé, c'est pour cela que la connaissance des mécanismes de sorption et de désorption est essentielle.

L'adsorption est un phénomène caractérisé par l'accumulation de molécules à la surface d'un solide, sous forme ionisée ou non. C'est donc un phénomène d'immobilisation des produits dans le sol qui peut être atteint par différents processus. La désorption correspond au phénomène inverse, les molécules adsorbées redeviennent mobilisables.

Dans l'ensemble, il est important de savoir que les produits phytosanitaires peuvent être immobilisés à la surface de particules solides et être transportés sous cette forme. Ces processus dépendent beaucoup de la teneur en matière organique et en minéraux argileux du sol (Calvet, 2005). Des études ont montré que les pesticides avaient une affinité particulière avec les surfaces organiques. Cette affinité est plus variable avec les minéraux argileux.

La dégradation des produits phytosanitaires est divisée en deux grandes catégories, la dégradation biotique et abiotique. La dégradation biologique ou biotique est le résultat de l'action des micro-organismes présents dans le sol, principalement des bactéries et des champignons. Les dégradations abiotiques, elles, sont dues à un ensemble de réactions chimiques ou photochimiques. La dégradation biologique est le phénomène principal dans la zone active du sol, elle est en grande partie responsable de la dégradation des produits phytosanitaires par des processus naturels.

L'annexe 2 aborde plus en détail les mécanismes de rétention et de dégradations de produits phytosanitaires.

2.4.4 Processus de transfert des produits phytosanitaires

Le transfert des produits phytosanitaires est engendré par différents types de processus. Ces transferts mettent en jeu différentes composantes environnementales telles que l'atmosphère, l'eau ou encore le sol. Le principal vecteur des transferts de produits phytosanitaires reste quand même l'eau du fait des différentes formes d'écoulement auxquelles elle peut donner naissance.

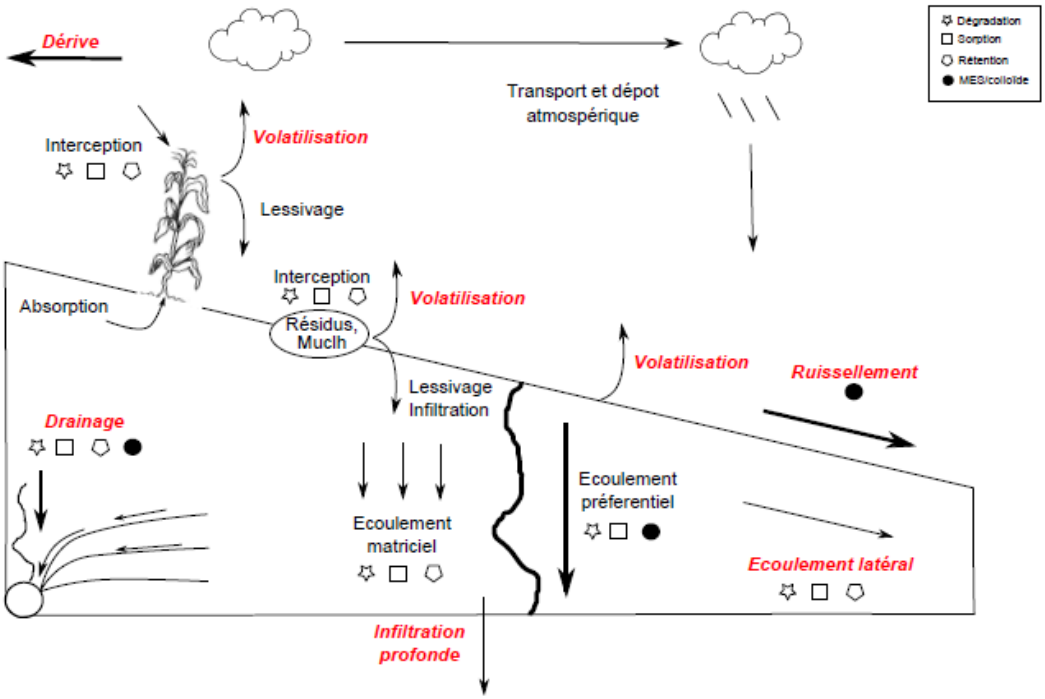


Figure 10: Représentation schématique des différents processus de transfert des produits phytosanitaires (D'après Dairon, 2015).
En rouge sont indiqués les mécanismes exportant les substances en dehors du système.

2.4.4.1 Dérive de pulvérisation et volatilisation

Les produits appliqués peuvent se retrouver dans le compartiment atmosphérique directement pendant l'épandage ou indirectement à partir des molécules du sol.

Les produits phytosanitaires sont principalement appliqués au sol par pulvérisation mécanisée. Cette pratique entraîne la dissipation des produits dans le compartiment atmosphérique avant même qu'ils aient atteint le sol (Gril, J. J., 1999). On nomme ce processus dérive de pulvérisation. Cette dérive peut entraîner la contamination des points d'eaux de surface adjacents ou même des parcelles attenantes. Le vent est une composante très importante qui affecte ces dérives, ce qui explique la réglementation citée auparavant.

Quand les produits se dissipent de façon différée, on parle de volatilisation. Ce processus correspond à un départ de produits de la surface du sol ou des plantes jusqu'à l'atmosphère sous forme de vapeur. La quantité de produit mobilisée par ce phénomène est mal connue et les études montrent des résultats contradictoires (Millet, and al., 2016). Le grand nombre de produits phytosanitaires existant ne facilite pas le travail. La volatilisation des produits de la surface du sol ou des plantes les jours suivant l'application pourrait atteindre une proportion importante de la quantité appliquée. Même si les résultats de beaucoup d'analyses semblent peu fiables et difficilement utilisables, les études sur le sujet ont permis, malgré tout, d'identifier les facteurs qui influencent la volatilisation. Ils sont détaillés ci-après :

- Les caractéristiques du produit appliqué : la constante de Henry des composés, leur concentration, leur coefficient de partage ou encore la pression de vapeur saturante.
- Les paramètres pédologiques : humidité du sol, granulométrie, taux de matière organique ou encore l'aération du sol.
- Les paramètres climatiques : la température, l'évaporation, le vent ou encore l'humidité de l'air.

2.4.4.2 Lavage foliaire et ruissellement

Le lavage foliaire, très souvent absent dans les publications, semble pourtant prépondérant pour la mobilisation des produits phytosanitaires. En effet, il permet de rendre le produit disponible au ruissellement (Gouy, 1993). Il est principalement fonction de l'intensité et du volume des pluies ainsi que des caractéristiques physico-chimiques du produit.

Une fois l'ensemble des produits au sol, l'action du ruissellement devient très importante. Le produit peut être mobilisé, soit en solution (produit dans la solution du sol ou désorption d'une partie des produits absorbés), soit sous forme absorbé par des particules (Carluer, et al., 2011). Le transfert sous forme de solution semble majoritairement responsable des transferts de produits phytosanitaires par le ruissellement. En effet, ce mécanisme ne nécessite pas une intensité de pluie importante ou une concentration des écoulements élevée. A l'opposé, le transfert par arrachement de particules se met en place plus tard, soit quand l'écoulement devient plus important ou quand l'intensité de la pluie est élevée, soit quand le sol est très érodable.

Dans l'ensemble, le transfert par ruissellement des produits phytosanitaires dépend donc des propriétés des substances phytosanitaires, des propriétés du sol, des pratiques agricoles, des conditions climatiques et hydrologiques ainsi que de la topographie (Gouy, 2012). Pour illustration, un produit à fort Koc (coefficient de partage eau-sol normalisé par rapport au taux de carbone organique du sol) n'est en général pas transporté en solution, il sera donc mobilisé principalement sous une pluie intense via les particules érodées du sol. A l'inverse un produit au Koc faible, n'est transporté qu'en solution mais possède une meilleure capacité d'infiltration, l'état d'humidité du sol au début de la pluie ainsi que sa perméabilité influenceront donc beaucoup la mobilisation de ce produit sous une pluie de faible ou moyenne intensité (Gouy, 2012). La topographie possède à l'opposé un fonctionnement immuable, elle dirige systématiquement le ruissellement vers l'aval topographique, ruissellement qui se concentre dans des zones de convergences topographiques (Peyrard, 2016).

2.4.4.3 Infiltration profonde ou percolation

La percolation correspond à une infiltration plus ou moins rapide de l'eau vers les nappes souterraines, pouvant entrainer une partie des produits phytosanitaires. Cette infiltration de substances phytosanitaires est réalisée, en grande partie, sous forme dissoute (lixiviation) mais peut aussi avoir lieu sous forme absorbée aux matières en suspension (Dairon, 2015). Ce mode de transfert commence en surface par la mobilisation de produit (produit au faible Koc

pour la forme dissoute), et son infiltration. Au fur et à mesure des pluies, le produit s'infiltre plus en profondeur (Peyrard, 2016). On distingue deux mécanismes d'infiltration principaux (Dairon, 2015) :

- L'écoulement matriciel, qui est assez lent et qui considère un milieu homogène.
- Le flux préférentiel, qui est décrit comme un écoulement rapide d'eau et de solutés à travers des voies de circulation privilégiées du sol. Ces voies de circulation privilégiées sont dues, par exemple, à des vides structuraux (macropores) à l'interface entre deux couches de perméabilité différente, à l'action de la pédofaune qui crée des vides biologiques ou encore à la présence d'argile, qui par dessèchement, peut entrainer des ruptures dans la structure du sol (Guimont, 2005).

La percolation est très impactée par les processus de rétention de pesticides à la surface du sol et dans la matrice poreuse. De plus, une majeure partie des sols présente une teneur en matière organique qui baisse avec la profondeur ce qui sous-entend que la capacité d'adsorption, de rétention et de dégradation des produits baisse aussi avec la profondeur.

2.4.4.4 Ecoulements latéraux ou de subsurface

Comme vu précédemment dans la partie abordant les différentes formes d'écoulement de l'eau dans un versant (2.3.2.3), quand l'infiltration de l'eau est bloquée par une rupture de perméabilité, l'eau s'accumule en subsurface. Si la pente et la conductivité hydraulique (Ks) sont suffisantes (Peyrard, 2016), l'eau peut alors s'écouler dans les horizons peu profonds du sol. Cette forme d'écoulement peut participer aux transferts de produits phytosanitaires, en solution principalement.

2.4.4.5 Le drainage agricole

Le drainage agricole est une technique ancienne visant à drainer un terrain pour supprimer un excédent d'eau et permettre par la suite, sa mise en culture. Ce système est aussi utilisé pour limiter l'engorgement d'un sol en période pluvieuse ou encore limiter sa compaction par le passage d'engins. Dans l'ensemble, cette technique permet un meilleur rendement des cultures. Il existe un grand nombre de systèmes de drainage en France, que ce soit de surface (réseau de fossés) ou enterré (réseau de tuyaux) (Dairon, 2015).

Ce type d'aménagement affecte les transferts hydriques de pesticides. Le rabattement de la nappe (baisse du plafond de la nappe) et l'accélération des écoulements dans le sol en sont responsables. De plus, comme il s'agit d'un réseau principalement linéaire et aboutissant à la rivière, la distance parcourue par les pesticides pour atteindre l'exutoire du bassin versant est plus courte et la potentialité de leur rétention ou de leur dégradation est donc plus faible. Le transfert de produits phytosanitaires est donc potentiellement accéléré par ces processus (Peyrard, 2016). A l'opposé, on peut aussi considérer que le réseau de drainage, pouvant faire baisser le ruissellement sur la parcelle, a la capacité de canaliser une partie du flux et le limiter à la parcelle où l'application a eu lieu. Si l'on considère ces aspects, le drainage a un effet positif sur les transferts de produits phytosanitaires à l'échelle de la parcelle et du versant. On pourrait donc dire que le transfert est accéléré et conduit vers les eaux de surface

avoisinantes mais limité quantitativement sur les parcelles et géographiquement dans le versant.

Malgré cela, une fois que les produits sont arrivés dans le fossé, leur devenir se partage entre (Boutron, 2009) :

- Etre transférés à l'aval du fossé
- S'absorber sur les matières constitutives du lit et les particules en suspension
- Etre soumis à des processus de dégradation

2.4.5 Influence de la haie sur les transferts de produits phytosanitaires

Si l'on considère les impacts de la haie sur les écoulements de l'eau, l'érosion du versant et la teneur en matière organique des sols, on peut penser, au vu des mécanismes de transfert des produits phytosanitaires, que la haie doit avoir un impact important sur ces derniers. Malgré cela, les impacts de la haie sur ces transferts n'ont pas forcément été tous étudiés.

L'impact de la haie sur la dérive de pulvérisation et les transferts par le ruissellement de surface ont été les deux principaux points mis en avant par le passé. Nous allons les détailler par la suite.

2.4.5.1 Dérive de pulvérisation

Les travaux concernant l'influence de la haie sur la dérive de pulvérisation sont les plus anciens réalisés. En effet, l'impact de la haie sur ces dérives semble évident car elle forme une barrière au vent et donc une zone de dépôt des particules mobilisées dans l'air. Mais les études ont montré que cet effet peut évoluer significativement selon certains paramètres.

En présence d'une haie composée d'espèces caducifoliées, le premier paramètre à prendre en compte est la saison. En hiver, la perte des feuilles des arbres fait baisser fortement son taux de recouvrement, qui correspond à une mesure de l'homogénéité de l'ensemble des houppiers. Si ce taux est faible, la haie présente un grand nombre de trouées et son efficacité pour bloquer le vent et les pesticides qu'il mobilise est faible. Cette baisse du taux de recouvrement peut diminuer de 30% la quantité de produits bloqués par la haie (Lazzaro, et al., 2008).

Les autres paramètres importants sont la puissance et la direction du vent. La puissance, car, si la haie n'a pas un taux de recouvrement très élevé, une plus forte puissance de vent fera augmenter la quantité de produits entrainées par la dérive. La direction du vent, elle aussi, modifie l'efficacité de la haie. Les études (Lazzaro, et al., 2008) (Davis, et al., 1994) ont montré qu'entre un vent soufflant parallèlement ou perpendiculairement à la haie, l'importance de la limitation de la dérive de pulvérisation était impactée.

La structure de la haie est aussi un paramètre qui influence ses effets sur la dérive de pulvérisation. Sa hauteur est primordiale, il semble préférable qu'une haie soit supérieure à 4

voire 5 mètres de haut. En effet, plus la distance de pulvérisation est importante, plus les particules prennent de la hauteur et sont interceptées par la partie haute de la haie. A l'opposé, plus la distance de pulvérisation est courte, plus les particules se retrouvent au bas de la haie (Kjær, et al., 2014). La hauteur de la haie est donc primordiale pour une bonne efficacité. On peut penser que la taille de la parcelle joue un rôle quant à l'efficacité de la haie pour bloquer cette dérive. En effet, plus la parcelle est grande plus la distance de pulvérisation peut être importante. De plus, cela illustre une hétérogénéité des dépôts le long du profil vertical de la haie. Cette donnée est importante si l'on souhaite travailler sur l'impact des pesticides sur la faune dans les haies.

Un dernier point important est le type de culture en présence. En effet, le type de pulvérisation est dépendant de la nature de la culture.

Le tableau ci-dessous illustre l'influence de la haie en fonction de la saison et donc de son taux de recouvrement et de la direction du vent. On peut aussi observer l'influence de la distance de pulvérisation sur le taux de particules traversant la haie. Dans cette étude, les impacts d'une haie simple et d'une haie double sont comparés à un transect sans haie. On peut alors mettre en avant le fait que la haie est efficace seule, mais qu'une zone de non traitement l'accompagnant serait très complémentaire. Les illustrations montrant les mouvements du produit après la pulvérisation démontrent bien l'impact de la haie d'un point de vue spatial.

Date	Hedge	Direction of the run respect to the hedge	Deposit percentage reduction		
			4.5 m from sprayer	8.5 m from sprayer	12.5 m from sprayer
20 September 2004	Absent	Parallel	50.5	92.2	98.4
		Perpendicular	82.8	94.9	99.5
	Single	Parallel	97.9	99.9	99.9
		Perpendicular	94.6	98.5	99.9
	Double	Parallel	95.0	99.9	100.0
		Perpendicular	100.0	100.0	100.0
13 December 2004	Absent	Parallel	60.5	94.6	98.4
		Perpendicular	55.3	82.3	86.5
	Single	Parallel	85.4	97.7	98.2
		Perpendicular	90.1	82.3	95.9
	Double	Parallel	82.6	99.9	100.0
		Perpendicular	77.1	99.1	98.5

Figure 11 : Pourcentage de réduction de la dérive de pulvérisation pour des transects sans haie, avec haie simple et avec haie double, en fonction de la direction (parallèle ou perpendiculaire à la haie) et de la distance de pulvérisation (D'après Lazzaro, et al., 2008)

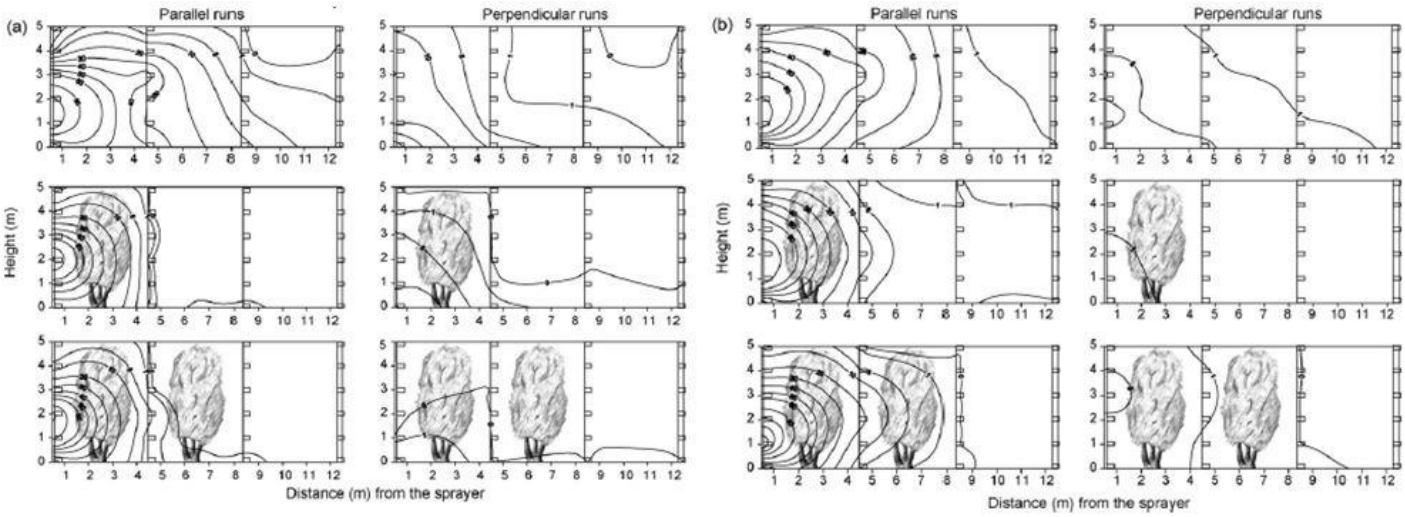


Figure 12 : Schémas spatiaux de l'impact d'une haie simple ou d'une haie double par rapport à un transect sans haie sur la dérive de pulvérisation en fonction de la position (parallèle ou perpendiculaire à la haie) de pulvérisation (D'après Lazzaro et al., 2008)

2.4.5.2 Transferts par le ruissellement en solution ou sous forme absorbée

L'influence de la haie sur les transferts de pesticides par le ruissellement et l'érosion de la parcelle est un sujet peu abordé. Au cours de mes recherches, je n'ai trouvé que deux articles abordant entièrement la question. Ils ont été publiés en 2017 et 2018 par un collectif de chercheurs chinois (Wang, et al., 2018).

Ils abordent l'influence de la haie sur les transferts d'atrazine par le ruissellement et par l'érosion du sol sous deux conditions de pentes différentes, un transect avec une pente de 15% et l'autre de 20%. L'étude est réalisée avec deux types de haie monospécifique, ce qui permet de tester l'influence de deux espèces différentes, le mélilot blanc (Melilotus albus), espèce herbacée atteignant une hauteur de 1,5 mètre, et l'herbe aux écouvillons (Pennisetum alopecuroides), espèce herbacée pouvant atteindre 1 mètre de haut. On est donc dans un contexte de haies herbacées sans présence de talus.

Nous avons précédemment vu que la haie réduit considérablement l'érosion des parcelles (de 70 à 95% des particules érodées sont bloquées) et le ruissellement (de 50 à 80%). On peut donc supposer une atténuation importante des transferts de pesticides par le ruissellement et par les particules érodées.

Les résultats de leurs études montrent une diminution du ruissellement et de l'érosion de l'ordre de 60 à 80%. Ce qui correspond aux chiffres trouvés auparavant. Pour les pertes d'atrazine, les résultats sont aussi très intéressants, comme l'illustrent les graphiques suivants.

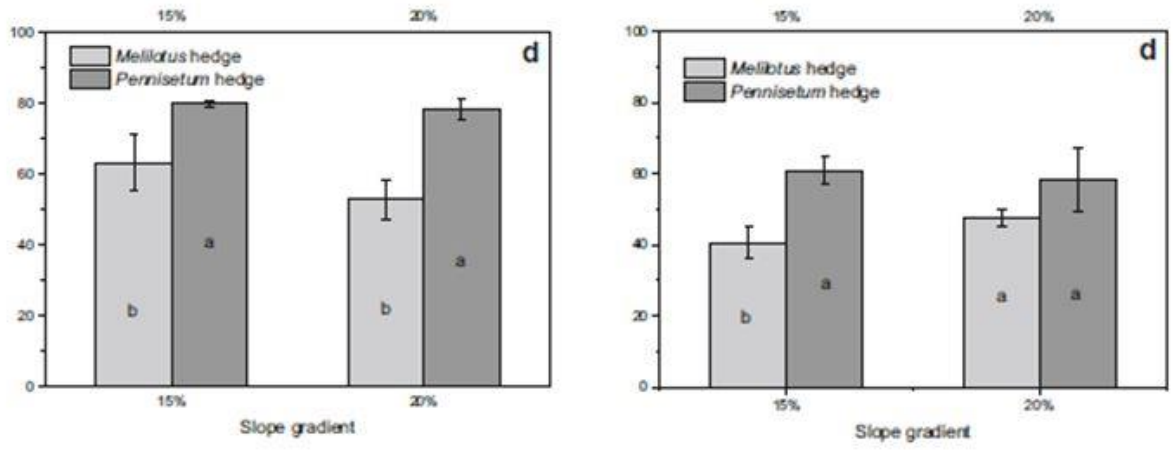


Figure 13 : Diminution des pertes d'Atrazines (en % par rapport à un transect sans haie) par le ruissellement (gauche) ou les matières en suspension (droite) en fonction du type de haie et de la pente (D'après Wang et al., 2018).

Un point important à signaler est que l'atrazine n'est que très rarement adsorbée, on peut donc penser que les résultats concernant les transferts par les matières en suspension ne sont que peu significatifs. Par contre, les résultats concernant le ruissellement donnent une bonne indication des impacts de la haie sur ce type de transfert.

2.4.5.3 Les autres processus de transfert des produits phytosanitaires

L'impact de la haie sur les autres mécanismes de transferts des produits phytosanitaires, comme la percolation et les écoulements latéraux ou de subsurface, n'a pas encore été mis en avant dans des publications et semble ne pas avoir été étudié par le passé. L'impact de la haie sur ces processus paraît difficilement quantifiable.

Malgré cela, au vu de l'état de l'art, on peut poser quelques hypothèses quant à l'impact de la haie sur ces formes de transfert.

Concernant la percolation, nous savons que ce mécanisme est très impacté par les processus de rétention en surface des produits et que le transport s'effectue principalement sous forme dissoute. En considérant cela, l'apport en matière organique au sol qu'engendre la présence de la haie doit favoriser la rétention des produits en surface et donc limiter leur percolation. A l'opposé, nous avons pu mettre en avant la fonction de drain subverticale aux écoulements de la haie, due à une augmentation de la porosité grossière du sol à son abord. Cette augmentation de la porosité grossière du sol devrait favoriser la percolation plus en profondeur des produits phytosanitaires.

Pour les transferts latéraux ou de subsurface, nous savons que ce transport de produits s'effectue très majoritairement sous forme dissoute. En conséquence, à l'instar de la percolation, l'augmentation de la teneur en matière organique du sol à l'abord de la haie doit participer à la rétention des produits et donc limiter leur écoulement.

Ces différentes hypothèses montrent bien la complexité de l’impact de la haie sur ces processus. Certains paramètres tendent à faire décroitre ces transferts quant d’autre tendent à les faire augmenter. Cela justifie le faible nombre d’études sur le sujet et l’absence de résultats quantifiés permettant de jauger l’impact réel de la haie sur les transferts de produits phytosanitaires.

2.5 Conclusion de l’état de l’art

Au cours de cette partie, nous avons pu caractériser les fonctions de la haie par rapport à différents processus s’opérant dans un versant. Ces processus sont l’érosion des sols, la dynamique hydrique et les écoulements de l’eau, les flux et stockage de nitrates ou de matière organique et les transferts de produits phytosanitaires. Nous avons pu développer les mécanismes en jeux et ainsi comprendre comment la haie influence son environnement et les processus qui s’y déroulent.

On a pu voir la complexité de beaucoup de ces processus comme par exemple, l’influence de la haie sur les transferts de produits phytosanitaires. On comprend alors que la haie est une structure complexe et multifonctionnelle qui a un impact important sur l’environnement avoisinant et son fonctionnement. Dans l’ensemble, ces impacts peuvent être considérés comme positifs pour l’environnement.

Les paramètres principaux qui expliquent chaque fonction ont été détaillés et peuvent être isolés. Ces paramètres vont être remobilisés dans la partie suivante.

3 Elaboration d'une typologie fonctionnelle des haies ou haies sur talus

3.1 Introduction, contexte et objectifs

3.1.1 Introduction

« Une typologie est une démarche méthodique consistant à définir un ensemble de types, afin de faciliter la classification et l'étude de réalités complexes ». Cette citation définit parfaitement le travail qui va suivre. Nous avons pu caractériser dans la partie état de l'art, un ensemble de fonctions et d'impacts que la haie a sur le versant et les processus qui s'y déroulent. Ces fonctions donnent donc à la haie un rôle dans le versant (anti-érosive, barrière au ruissellement…) et peuvent être classifiées.

Une typologie peut donc permettre par la suite d'étudier chaque fonction de la haie indépendamment des autres et d'en isoler les caractéristiques principales (présence d'un talus, structure de la haie etc….). En isolant les caractéristiques principales de chaque type de haie, nous allons pourvoir conserver ceux qui sont communs à l'ensemble des types et en faire des paramètres finaux de la typologie.

3.1.2 Contexte, les différentes typologies des haies existantes

En conséquence de leur multifonctionnalité (corridors écologiques, délimitation de parcelles, fonctions vues dans l'état de l'art) et de la diversité des enjeux qui leur sont associés (maintien du bocage encore existant, projet de plantation), les haies ont déjà été catégorisées ou classées avec certains objectifs et divers paramètres. Nous allons rappeler quelles sont les typologies préexistantes autour des haies.

3.1.2.1 Les typologies issues de l'agroforesterie

Des typologies des haies ou haies sur talus concernant le volet de l'agriculture ont déjà été réalisées par le passé. Elles ont été produites par diverses structures comme des associations d'agriculteurs ou encore des chambres d'agriculture. Jusqu'à l'année dernière, aucune typologie à l'échelle nationale n'avait été réalisée, les typologies existantes traitaient le sujet à l'échelle régionale. Il existe, par exemple, des typologies différentes, que ce soit dans les types de haies qu'elles traitent ou dans les appellations données, pour la Bretagne ou encore le Massif Central.

La situation a évolué l'année passée avec la parution du « référentiel national sur la typologie des haies ». Le document, réalisé par l'Afac-agroforesterie, à partir d'un grand nombre de typologies de petite échelle, recense les différents types de haies que l'on trouve en France et les modalités de leur gestion et de leur entretien. Il distingue 21 modèles de haies en France selon les modalités de gestion pour leur bon renouvellement et leur rentabilité (Annexe 1).

Ces typologies sont orientées principalement en direction des sphères de l'agriculture et de l'agroforesterie. Elles abordent les types de haies existantes en les caractérisant par des notions liées aux formes forestières (taillis, futaie, taillis sous futaie etc…). En conséquence,

ces typologies présentent les essences principales qui forment chaque type de haies ou encore les différents modes de gestion et d'entretien pour une valorisation maximale que ce soit au niveau économique ou écologique. La production de bois énergie est un facteur qui est présent et qui existe depuis longtemps.

3.1.2.2 Les typologies en regard de la biodiversité

Un autre aspect des haies a motivé leur classification. Il s'agit de leur fonction de réserve pour la biodiversité faunistique et de corridors. Ces aspects de la haie sont abordés par l'ONCFS, dans une typologie alliant types et périodes d'entretien bénéfiques pour la faune. Il semble que l'entretien que l'on porte au linéaire d'arbres ou d'arbustes modifie le type d'espèces animales présentes ainsi que leur déplacement. Il en va de même pour la position de la haie, sa densité et les essences présentes.

En effet, selon les paramètres structuraux de la haie (hauteur, type de strate, nombre de strates, largeur, entretien), ses fonctions envers la biodiversité varient de, source alimentaire, zone de refuge, de repos, de reproduction ou encore de corridor écologique. On y trouve dans l'ensemble tous les groupes zoologiques (mammifères, oiseaux, reptiles, microorganismes…) et tous les niveaux de colonisation (sol, litière, feuillage, tronc…).

Dans le contexte actuel qui allie politiques de protection, de maintien et de restauration de la biodiversité, on comprend pourquoi une typologie des haies autour de leurs fonctions de réservoirs ou d'axes de déplacement pour la faune est nécessaire. Elle permet d'aider à envisager leur rôle en regard de la biodiversité pour ainsi favoriser leur implantation.

3.1.3 Objectifs de la typologie fonctionnelle envisagée

On observe que la plupart des typologies existantes n'abordent pas les impacts de la haie sur les différentes formes d'écoulement de l'eau, l'érosion, le stockage de carbone, la régulation du nitrate ou encore les transferts de produits phytosanitaires. Pourtant, nous avons pu voir dans la partie état de l'art que ces impacts sont importants et connus, même s'ils ne sont pas toujours quantifiés.

L'objectif du travail est alors de réaliser une typologie des haies au sein d'un versant selon leur capacité à remplir les fonctions détaillées précédemment dans l'état de l'art. Au-delà des paramètres liés à la haie elle-même, il est essentiel, pour cette typologie de prendre en considération des paramètres comme son environnement physique et géographique, sa position dans le versant et l'occupation du sol avoisinante. Le but de cette typologie est d'isoler, grâce à ces paramètres, les types de haies susceptibles d'assurer une ou plusieurs des fonctions retenues.

La construction de cette typologie peut être considérée comme théorique car elle utilise et généralise des résultats d'études trouvées dans la bibliographie pour mettre en relation les différents paramètres entre eux et aboutir aux fonctions. Cela peut lui conférer une certaine généricité, mais demande à être vérifié ultérieurement sur le terrain par application de la typologie sur un versant. Par ailleurs, compte tenu de la nature et de la précision des paramètres qui y sont renseignés, cette typologie peut s'appliquer à deux échelles principales.

Soit à grande échelle, avec comme objectif d'approcher le rôle potentiel joué par les haies sur de grandes aires géographiques, soit, à petite échelle, pour identifier plus précisément dans un bassin versant quelles haies assurent l'une des fonctions retenues et pourquoi.

Pour clôturer ce travail, une analyse cartographique sera réalisée, en partant de l'échelle nationale, pour cibler des zones intéressantes à étudier. Une fois ces zones sélectionnées, un zoom à l'échelle du bassin versant ou du versant permettra de vérifier la validité de la typologie et sa capacité à approcher les fonctions d'une haie dans son environnement

3.2 Elaboration de la typologie

3.2.1 Démarche

3.2.1.1 Les fonctions sélectionnées

Les fonctions principales retenues pour la typologie sont celles qui ont été détaillées dans l'état de l'art. La partie développant une fonction dans l'état de l'art est mise entre parenthèses :

- la modification de la dynamique hydrique et des écoulements de l'eau (2.3.2)
- la fonction anti-érosive (2.3.1)
- la limitation des transferts de produits phytosanitaires par les écoulements et l'érosion (2.4.5.2)
- la limitation de la dérive de pulvérisations (2.4.5.1)
- la régulation des stocks et des flux de nitrates (2.3.3.3)
- l'apport de matière organique au sol (2.3.4)

3.2.1.2 Les paramètres caractérisant chaque fonction

Chaque fonction de la haie dans un versant est due à un ensemble de paramètres soit intrinsèques à la haie, soit liés à l'environnement dans lequel elle se situe. Il convient donc de rappeler tous les paramètres qui confèrent à une haie ses fonctions dans un versant. Ils sont rassemblés en trois groupes, l'environnement physique et géographique de la haie, sa structure (paramètres intrinsèques à la haie) et l'occupation sol et les pratiques sur les parcelles avoisinantes. Nous allons détailler les paramètres inclus dans ces groupes.

L'environnement physique et géographique de la haie

- La position par rapport à la ligne de plus grande pente
- La position dans le versant
- La nature du sol
- La teneur en eau du sol
- L'intensité de la pente

La structure de la haie

- La présence d'un talus
- Les strates végétales
- Le système racinaire
- La largeur de la haie
- Son taux de recouvrement

L'occupation du sol et les pratiques sur les parcelles avoisinantes

- L'occupation du sol
- L'entretien de la haie

Une majeure partie de ces paramètres sont qualitatifs. Il n'y a que l'intensité de la pente, la teneur en eau du sol et la largeur de la haie qui peuvent être exprimés quantitativement. Pour beaucoup, leur obtention est assez simple. Certains sont connus à grande échelle et ne nécessitent qu'une recherche sur internet. C'est le cas de l'occupation du sol, de la nature du sol, de sa teneur en eau ou encore de l'intensité de la pente. La position par rapport à la ligne de plus grande pente, la position dans le versant, tous les paramètres de la structure de la haie et l'entretien de la haie nécessitent soit une visite de terrain, soit un travail sur SIG. La visite de terrain est préférable car le travail sur SIG ne permet pas de trouver le taux de recouvrement de la haie, la présence d'un talus ou encore la nature du système racinaire.

Dans l'ensemble, on pourrait dire que la position par rapport à la ligne de plus grande pente, la nature du sol, l'intensité de la pente, la teneur en eau du sol, la position dans le versant et l'occupation du sol sont des paramètres faciles à obtenir. A l'opposé, tous les paramètres de la structure de la haie et l'entretien de la haie sont plus compliqués à aborder.

Ci-après, un tableau récapitulant l'ensemble des paramètres et leurs impacts relatifs sur la fonction de la haie en question. L'échelle à laquelle les données peuvent être disponibles ou acquises si nécessaire est précisée.

	Paramètres		Echelle d'acquisition	
Fonctions	Importants	Peu importants	Petite échelle	Grande échelle
Anti-érosive	- Position par rapport à la ligne de plus grande pente - Présence d'un talus - Intensité de la pente - Strate végétale (herbacée) - Largeur de la haie	- Nature du sol - Position dans le versant - Occupation du sol	- Strate végétale (herbacée) - Présence d'un talus - Position par rapport à la ligne de plus grande pente - Position dans le versant - Largeur de la haie	- Intensité de la pente - Nature du sol - Occupation du sol
Modification de la dynamique hydrique et des écoulements de l'eau	- Position par rapport à la ligne de plus grande pente - Présence d'un talus - Intensité de la pente - Strate végétale (herbacée) - Teneur en eau du sol - Nature du sol - Position dans le versant - Système racinaire - Largeur de la haie	- Occupation du sol	- Position par rapport à la ligne de plus grande pente - Présence d'un talus - Strate végétale (herbacée) - Position dans le vers - Système racinaire - Largeur de la haie	- Intensité de la pente - Nature du sol - Teneur en eau du sol (IDPR) - Occupation du sol
Limitation des transferts de produits phytosanitaires par les écoulements et l'érosion	- Position par rapport à la ligne de plus grande pente - Présence d'un talus - Intensité de la pente - Strate végétale (herbacée) - Teneur en eau du sol - Nature du sol - Position dans le versant - Système racinaire - Occupation du sol - Largeur de la haie		- Position par rapport à la ligne de plus grande pente - Présence d'un talus - Strate végétale (herbacée) - Position dans le vers - Système racinaire - Largeur de la haie	- Intensité de la pente - Nature du sol - Teneur en eau du sol (IDPR) - Occupation du sol
Limitation de la dérive de pulvérisations	- Strate végétale - Occupation du sol - Entretien de la haie - Largeur de la haie - Taux de recouvrement de la haie	- Position dans le versant	- Entretien de la haie - Strate végétale - Largeur de la haie - Taux de recouvrement de la haie - Position dans le versant	- Occupation du sol
Régulation des stocks et des flux de nitrates	- Strate végétale - Occupation du sol - Système racinaire - Teneur en eau du sol - Nature du sol	- Intensité de la pente	- Système racinaire - Strate végétale	- Intensité de la pente - Occupation du sol - Teneur en eau du sol (IDPR) - Nature du sol
Apport de matière organique	- Strate végétale - Nature du sol - Largeur de la haie	- Système racinaire - Entretien de la haie	- Strate végétale - Système racinaire - Entretien de la haie - Largeur de la haie	- Nature du sol

Tableau 2 : L'ensemble des paramètres influant sur chaque fonction de la haie dans un versant ainsi que leur échelle de disponibilité

3.2.2 Sélection des paramètres pour la typologie

Sur l'ensemble des paramètres permettant d'approcher les fonctions d'une haie dans un versant, le choix est fait de n'en retenir que certains pour la typologie. En effet, les paramètres étant nombreux et pour certains complexes à exprimer ou encore à mettre en relation avec les autres, il est plus intéressant de sélectionner ceux qui sont accessibles et dont le rôle est important et connu. Les ensembles de paramètres vus précédemment, soit, l'environnement physique et géographique de la haie, la structure de la haie et l'occupation du sol avoisinant sont conservés.

Pour l'environnement physique et géographique, les variables conservées sont la pente, la texture du sol et la position de la haie par rapport à la pente et dans le versant.

La pente modifie la formation du ruissellement et impacte donc l'intensité de l'érosion. La bibliographie montre un seuil important autour de 15 ou 20% de pente (Vaezi, et al., 2017). A partir de ces pourcentages, les processus semblent s'accélérer, notamment sur les sols où la mobilisation est facile. La pente sur laquelle se situe la haie est donc un facteur prédominant pour approcher ses fonctions, notamment pour la limitation de l'érosion et des écoulements de l'eau ou du ruissellement.

En ce qui concerne la texture du sol, elle est présente dans la typologie sous deux formes, les textures à tendance limoneuse ou argileuse. Le choix a été fait de ne pas mettre les textures sableuses car on les trouve très peu, en France, sous les types d'occupation du sol détaillés dans la typologie.

Les sols à tendance argileuse sont connus pour avoir une forte capacité de rétention d'eau. Dans notre cas, la dénitrification ou certains processus de dégradation des produits phytosanitaires sont favorisés dans les sols gorgés d'eau.

Les sols à texture limoneuse, sont eux, très sensibles à l'érosion hydrique. Ils sont en général bien aérés et ont une rétention d'eau équilibrée.

La texture du sol sur lequel la haie est implantée peut modifier ses impacts sur les processus ayant lieu sur le versant. Par texture du sol, on entend sa teneur en argile, limons et sable. On parle de texture et non pas de nature du sol. En effet, la nature du sol sous-entend de prendre en compte d'autres paramètres importants comme la porosité du sol, son taux de matière organique, la profondeur du premier horizon imperméable… Mais, faire apparaître tous ces paramètres dans la typologie risque de trop la complexifier.

La position de la haie dans le versant est représentée par trois emplacements possibles :

- En tête ou haut de versant
- En milieu de versant
- En bas ou pied de versant.

Sa position ne modifie pas le fonctionnement de la haie en elle-même. Mais elle affecte les possibilités d'impacts qu'elle peut avoir. Logiquement, une haie se situant en haut de versant ne peut pas limiter l'érosion ou encore faire barrière aux écoulements car ces processus ne sont pas encore présents. En revanche, une haie positionnée en haut de versant peut quand même avoir une fonction d'apport en matière organique pour, par exemple, les cultures plus en aval. C'est pour cela que la typologie considère des haies anti-érosives ou ayant des impacts sur les dynamiques hydriques uniquement en milieu ou bas de versant.

Le dernier paramètre de cette catégorie est la position de la haie par rapport à la ligne de plus grande pente, avec deux possibilités :

- En travers de la ligne de plus grande pente
- Parallèle à la ligne de plus grande pente.

Ce positionnement est primordial pour interpréter les fonctions d'une haie.

En travers de la pente, une haie aura principalement un effet de barrière physique aux écoulements ou à l'érosion. Dans le sens de la pente, elle aura plutôt le fonctionnement inverse avec un rôle de guide pour le ruissellement. La présence d'un talus quand la haie est en travers de la pente a d'ailleurs tendance à amplifier cette fonction de barrière physique.

Pour la structure de la haie, les paramètres retenus sont la présence d'un talus et le nombre de strates végétales.

La présence d'un talus modifie peu l'organisation du reste de la haie. En revanche, son impact sur les transferts d'eau et de particules érodées est très important, comme vu précédemment.

La stratification végétale de la haie est un élément très important pour en apprécier les fonctions. La strate herbacée à un rôle primordial quand il n'y a pas de talus. En travers de la pente, sa présence peut jouer le rôle de barrière efficace, à l'image d'un talus.

Dans l'ensemble, la présence des strates arborées et arbustives sont intéressantes sous plusieurs aspects. Elles sont une barrière aux dérives de pulvérisations de produits phytosanitaires, et permettent, grâce aux retombées de litière, un apport de matière organique au sol. La matière organique possède des propriétés intéressantes pour l'adsorption et la dégradation des pesticides. La présence des strates arbustives et arborées indique aussi l'existence de systèmes racinaires développés ou profonds. Le système racinaire joue un rôle important sur les flux de nitrates transitant dans le sol, notamment par son absorption. Sa présence modifie aussi la dynamique hydrique des sols et les écoulements de subsurface ou encore de nappe.

Le dernier paramètre sélectionné pour la typologie est l'occupation du sol entourant la haie.

L'occupation du sol est déclinée uniquement sous deux types que sont l'élevage et les cultures. Ce choix s'explique par le fait qu'une grande partie des haies aux fonctions détaillées dans la typologie se situe sur ces deux types d'occupation du sol, et en grande majorité sur des zones d'élevage.

L'occupation du sol modifie beaucoup les propriétés du sol et donc la fonctionnalité de la haie. Tout d'abord, une haie ne peut limiter les transferts de produits phytosanitaires qu'en aval d'une parcelle agricole. Hormis cela, des études ont montré que l'érosion et le ruissellement sont plus importants sous un couvert agricole que sous des pâturages (Zalidis, et al., 2002). Cela semble être dû au travail régulier du sol. De plus, le sol est très souvent mis à nu sous une plantation de céréales ou de vigne, favorisant l'arrachage des sédiments et leur déplacement. Les pâturages étant très souvent recouverts d'herbe, le sol est maintenu et s'érode beaucoup moins. Néanmoins, en cas de forte pluie, le simple couvert herbeux ne suffit plus à limiter l'érosion et la formation du ruissellement. Des études ont aussi montré que la teneur en matière organique des sols sous couvert agricultural est plus faible que sous d'autres types de sol, comme les pâturages (Zhao, et al., 2013). Cette différence dans la teneur en matière organique modifie obligatoirement la capacité du sol à fixer et dégrader les produits phytosanitaires ou encore les nitrates.

Environnement physique et géographique de la haie	Structure de la haie	Occupation du sol
Position par rapport à la ligne de plus grande pente	Présence d'un talus	Occupation du sol
Position dans le versant	Strates végétales	
Pente		
Texture du sol		

Tableau 3 : Paramètres sélectionnés pour la typologie

3.2.3 La typologie fonctionnelle des haies ou haies sur talus

3.2.3.1 Présence d'un talus

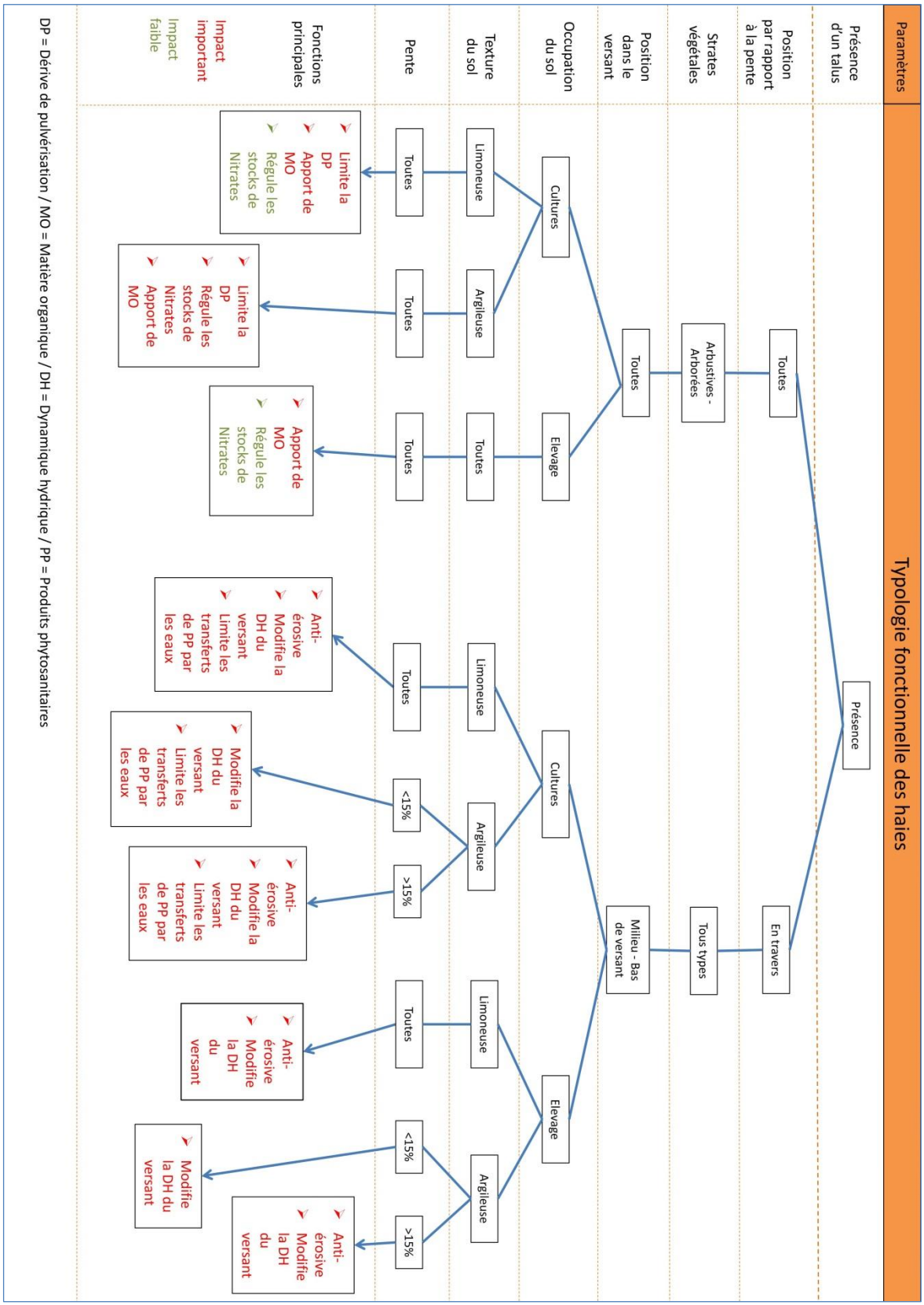


Figure 14 : Typologie fonctionnelle des haies sur talus

3.2.3.2 Absence d'un talus

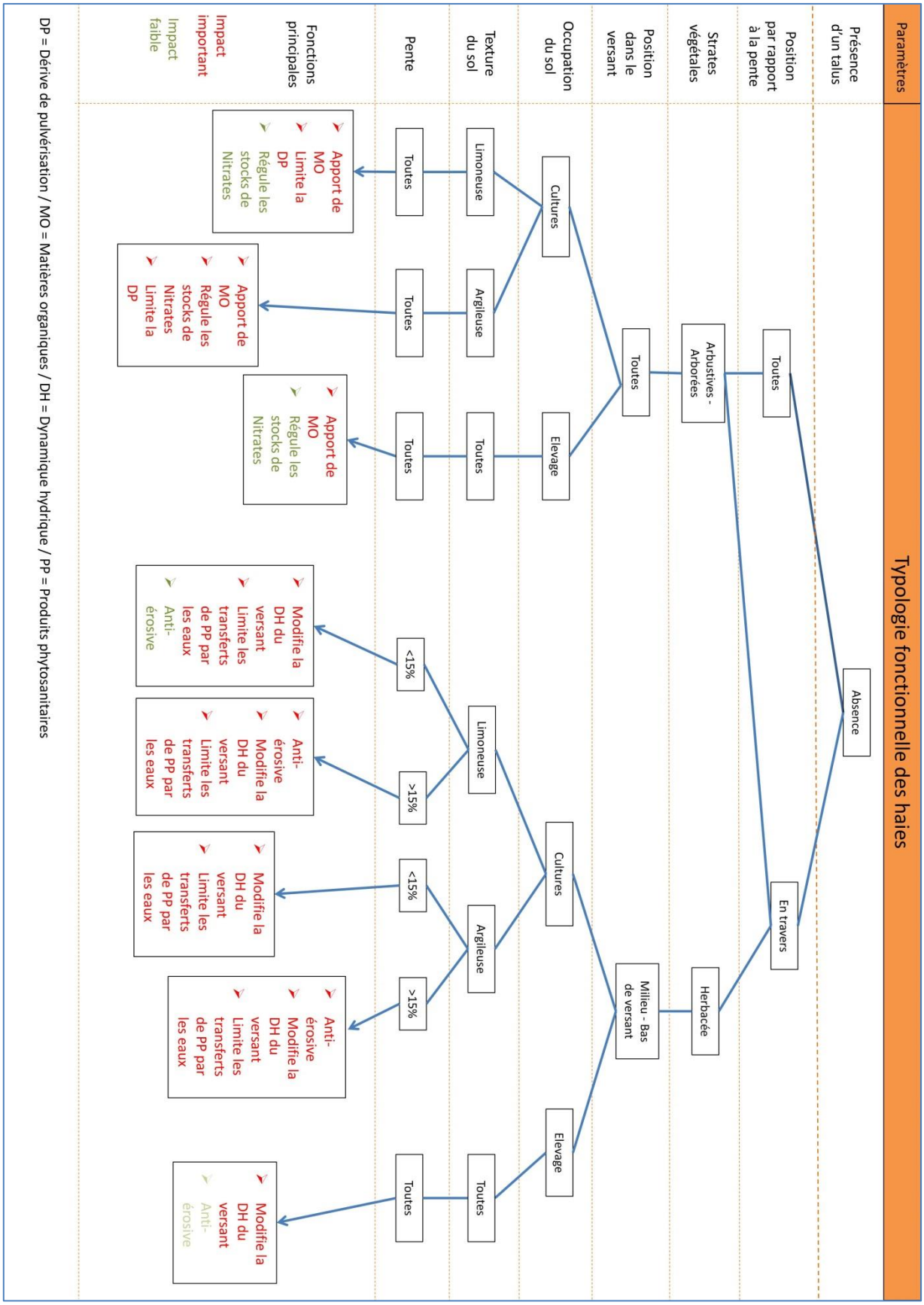


Figure 15 : Typologie fonctionnelle des haies avec absence de talus

3.2.4 Notice explicative

L'objectif de cette partie est d'expliquer les choix et le fonctionnement de la typologie pour chaque fonction.

La fonction anti-érosive

La fonction anti-érosive est principalement caractérisée par la présence d'un talus ou d'une strate herbacée développée ainsi qu'une position de la haie en travers de la ligne de plus grande pente et au milieu ou bas de versant.

En comparaison avec régime d'élevage, sous une culture, une haie peut être anti-érosive avec une condition de pente inférieure car la mobilisation des particules de sol est plus facile sous un couvert agricole. Ce phénomène est aggravé si la texture du sol est limoneuse. Ceci explique pourquoi, en présence d'un sol limoneux, on peut observer un effet antiérosif même si la pente n'est pas obligatoirement supérieure à 15%. Dans l'ensemble, la pente a un rôle important sur l'érosion et une haie devient toujours antiérosive lorsqu'elle est en travers d'une pente supérieure à 15%.

La modification de la dynamique hydrique et des écoulements de l'eau

Pour cette fonction, la haie doit posséder, dans l'ensemble, les mêmes caractéristiques que pour lutter contre l'érosion, notamment pour les aspects présence d'un talus, stratification végétale, position dans le versant et par rapport à la ligne de plus grande pente.

Les principales différences viennent du fait que la pente et l'occupation du sol ont une moindre influence sur cette fonction de la haie. En effet, en tout type de pente et d'occupation du sol, la haie impacte toujours la dynamique hydrique du sol et les écoulements potentiels.

La texture du sol reste importante, il semble que les sols argileux retiennent plus facilement l'eau que les sols limoneux et qu'ils soient moins perméables. Les écoulements de subsurface sont très présents sur ce type de sol.

La limitation des transferts de produits phytosanitaires par les écoulements et l'érosion

Pour la limitation des transferts de pesticides par les écoulements et les matières en suspension, les facteurs importants sont les mêmes que pour l'érosion du sol et la dynamique hydrique, étant donné que ce sont ces deux processus qui sont responsables des transferts de pesticides.

Il y a deux points différents qui sont l'occupation du sol et la composition des strates végétales. Il va de soi qu'une haie ne peut pas modifier les transferts de produits phytosanitaires par les écoulements et l'érosion sous un régime d'élevage, il faut donc que l'occupation du sol soit des cultures. La strate herbacée a toujours un rôle prépondérant s'il n'y a pas la présence d'un talus, mais dans ce cas, la présence des strates arbustives et arborées est aussi importante. En effet, ces deux strates sous-entendent une teneur en matière organique importante aux abords de la haie et donc une capacité de rétention et de dégradation de produis phytosanitaires accrue comme vu dans l'état de l'art.

La limitation de la dérive de pulvérisations

Pour cette fonction, la présence ou non d'un talus ne modifiera pas l'efficacité de la haie pour limiter la dérive de pulvérisations. La texture du sol, la pente et sa position par rapport à la ligne de plus grande pente n'ont pas d'impact et ne sont pas à prendre en compte pour évaluer son efficacité.

Sa position dans le versant, en revanche, est importante. En bas de versant ou proche d'un cours d'eau la haie est très importante puisqu'elle peut protéger les eaux de surface (zone humide de bas de versant, cours d'eau etc…). La contamination des eaux de surface est, en effet, la première conséquence de la dérive de pulvérisations.

Deux autres paramètres à considérer sont l'occupation du sol et la stratification végétale de la haie. L'occupation du sol, puisque, pour qu'il y ait une dérive de pulvérisations, il faut être sous couvert agricole, et la stratification végétale car il faut la présence de strates arborées et arbustives au minimum pour limiter la dérive de pulvérisations. Une haie multistrate serait encore préférable.

La régulation des stocks de nitrates

En ce qui concerne la régulation des stocks de nitrates, la haie peut avoir les mêmes caractéristiques et se situer dans le même environnement physique que pour limiter la dérive de pulvérisations à une exception près, l'occupation du sol peut aussi être de l'élevage.

La présence de strates arborées et arbustives est à nouveau très importante, car elle induit la présence d'un système racinaire développé et donc la possibilité d'un potentiel pompage de nitrates dans le sol par les arbres.

L'apport de matière organique

Pour l'apport de matière organique, l'unique paramètre important est la présence des strates arborées et arbustives, sachant que la haie multistrate est la plus favorable.

La présence ou non d'un talus n'est pas importante. Il en est de même pour la position dans le versant et par rapport à la pente, le type d'occupation du sol, la texture sol et la pente.

Dans ce cas, la haie a le même rôle qu'un arbre, toutefois, ses effets sont amplifiés, car une haie est composée d'un alignement de plusieurs arbres.

3.3 Travaux cartographiques

3.3.1 Travail à l'échelle nationale

L'objectif de cette partie est d'isoler des secteurs d'étude intéressants quant à l'objectif final qu'est la vérification de la typologie avancée précédemment. Cette vérification passe par l'application de la typologie sur des secteurs de petite dimension (par exemple un versant) à la densité de haie élevée. L'objectif est d'évaluer la capacité de la typologie à nous renseigner sur les fonctions d'une haie dans le versant en appliquant les paramètres vus précédemment.

Dans un premier temps, nous allons isoler les zones où la densité de haies est importante, ce qui permettra de ne pas travailler sur l'ensemble du territoire national. Dans un deuxième temps, nous allons présenter les couches et les modifications réalisées pour que leur utilisation soit possible. Pour finir, nous allons exposer les résultats de ces croisements, les étudier et déterminer les futurs secteurs d'étude.

3.3.1.1 Densité de haies

Premièrement, étant donné que l'échelle d'étude est pour l'instant nationale, des données sur la densité de haies à cette échelle sont nécessaires. On peut, à partir de celles-ci, conserver les zones où la densité de haies est élevée pour, par la suite, focaliser nos études et croisements sur ces zones.

Voici le résultat de cette sélection. Ne sont conservées que les zones où la densité de haies est supérieure à 4% de la surface agricole utile, sachant que 1 % correspond à 2,3 km de haie par km² de surface agricole utile.

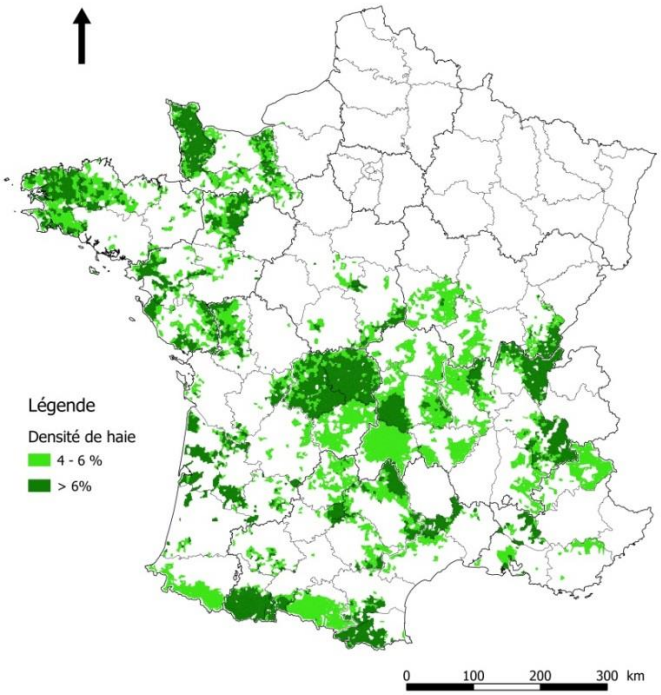


Figure 16 : La densité de haies en France par commune

3.3.1.2 Données et traitements

Certains paramètres utilisés dans la typologie sont disponibles et utilisables à l'échelle nationale. C'est le cas de la pente, de l'occupation du sol et de la texture du sol. Deux de ces paramètres semblent judicieux pour isoler des secteurs au niveau national. Ce sont la pente et l'occupation du sol. En effet, comme vu précédemment, la pente joue un rôle important sur les processus opérant à l'échelle du bassin versant et donc sur l'impact de la haie dans le versant. L'occupation du sol détermine directement, à l'image de la pente, certaines fonctions de la haie comme celles concernant les transferts de produits phytosanitaires.

Obtenir des valeurs de pente au niveau national est réalisable à l'aide d'un MNT et d'une analyse de pente sur SIG. Pour travailler à cette échelle, il semble préférable de choisir un MNT à la résolution assez grossière pour que le support soit d'un seul bloc et que les traitements puissent fonctionner correctement. En considérant ces contraintes, mon choix se porte sur la BD Alti de l'IGN à 250 mètres de résolution. Le livrable étant d'un seul bloc et d'une résolution correcte, il semble parfait pour un travail à cette échelle. Le MNT d'origine et le résultat du traitement de pente sont présentés ci-dessous.

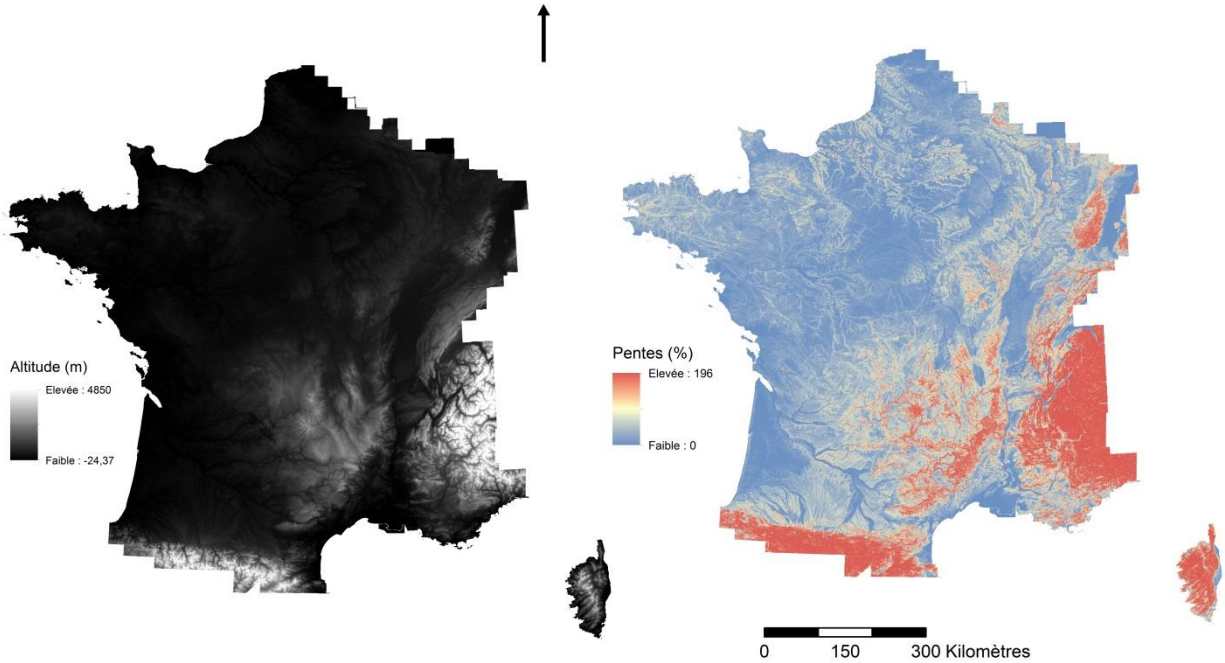


Figure 17 : Résultat du calcul de pente réalisé à partir de la BD Alti (250 m) sur l'ensemble du pays

La typologie séparant la pente en deux ensembles, supérieure ou inférieure à 15%, il convient maintenant à partir du raster de pente, d'isoler les zones correspondant à ces deux ensembles. Le résultat est exposé ci-après.

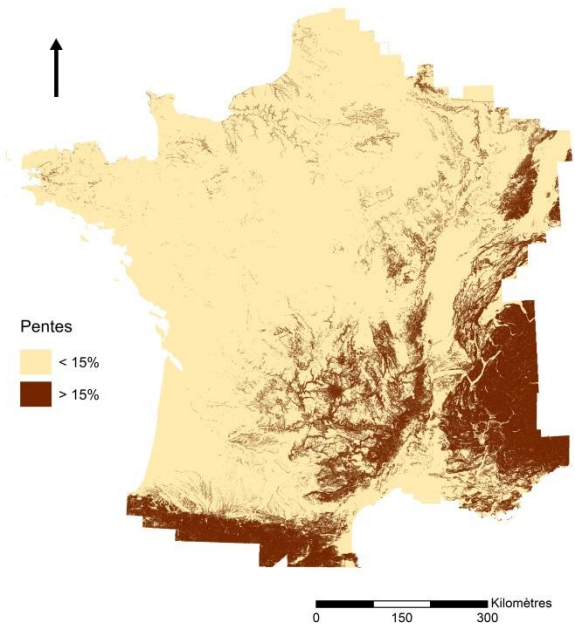


Figure 18 : Résultat de la sélection des zones où la pente est supérieure à 15%

Pour l'occupation du sol, les données OTEX (classification des exploitations selon leur spécialisation, orientation technico – économique) conviennent très bien et permettent d'obtenir assez de détails pour connaître les orientations et pratiques agricoles à l'échelle communale en France. On peut donc, par la suite, rassembler les pratiques en deux types principaux, utilisés pour la typologie, que sont l'élevage et les cultures. Le croisement avec les zones identifiées précédemment, où la densité de haies est importante, est nécessaire pour alléger la couche et ne pas traiter le pays en entier.

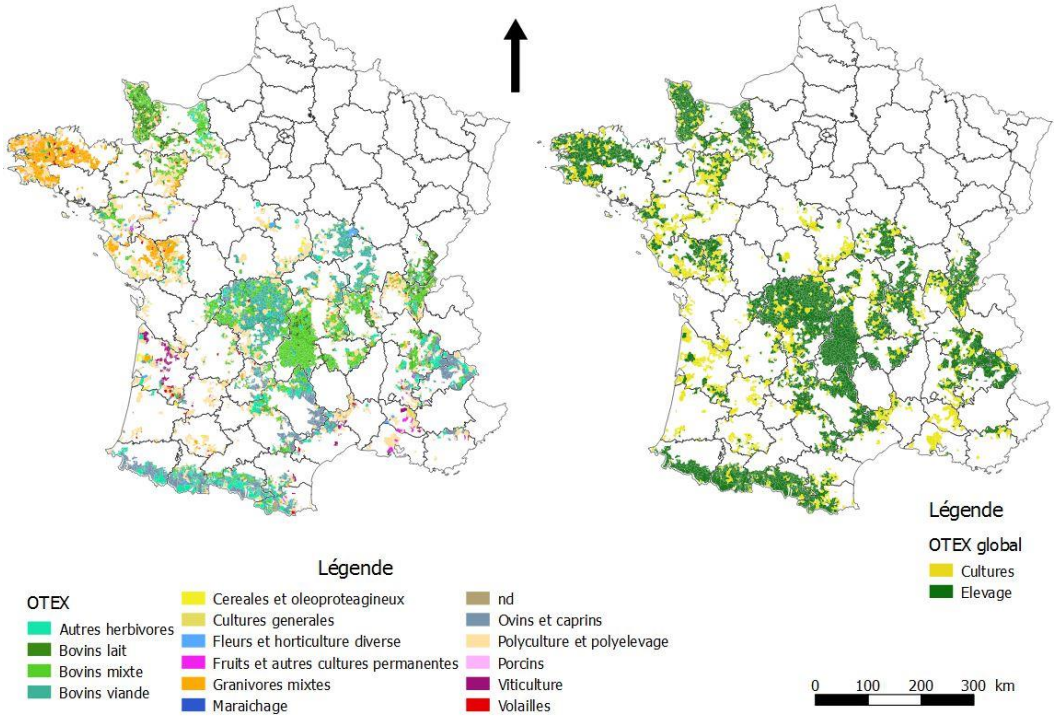


Figure 19 : L'occupation du sol pour les zones où la densité de haies est supérieure à 15%

3.3.1.3 Résultat

Comme expliqué précédemment, la sélection de secteurs d'étude précis et intéressants sera réalisée à partir du croisement entre la pente et l'occupation du sol. Pour la pente, on distingue les secteurs de pente inférieure et supérieure à 15% et pour l'occupation du sol les cultures et l'élevage.

Voici, ci-dessous, une carte présentant le type d'occupation du sol en fonction de la pente, cela sur des secteurs où la densité de haies est supérieur à 4%.

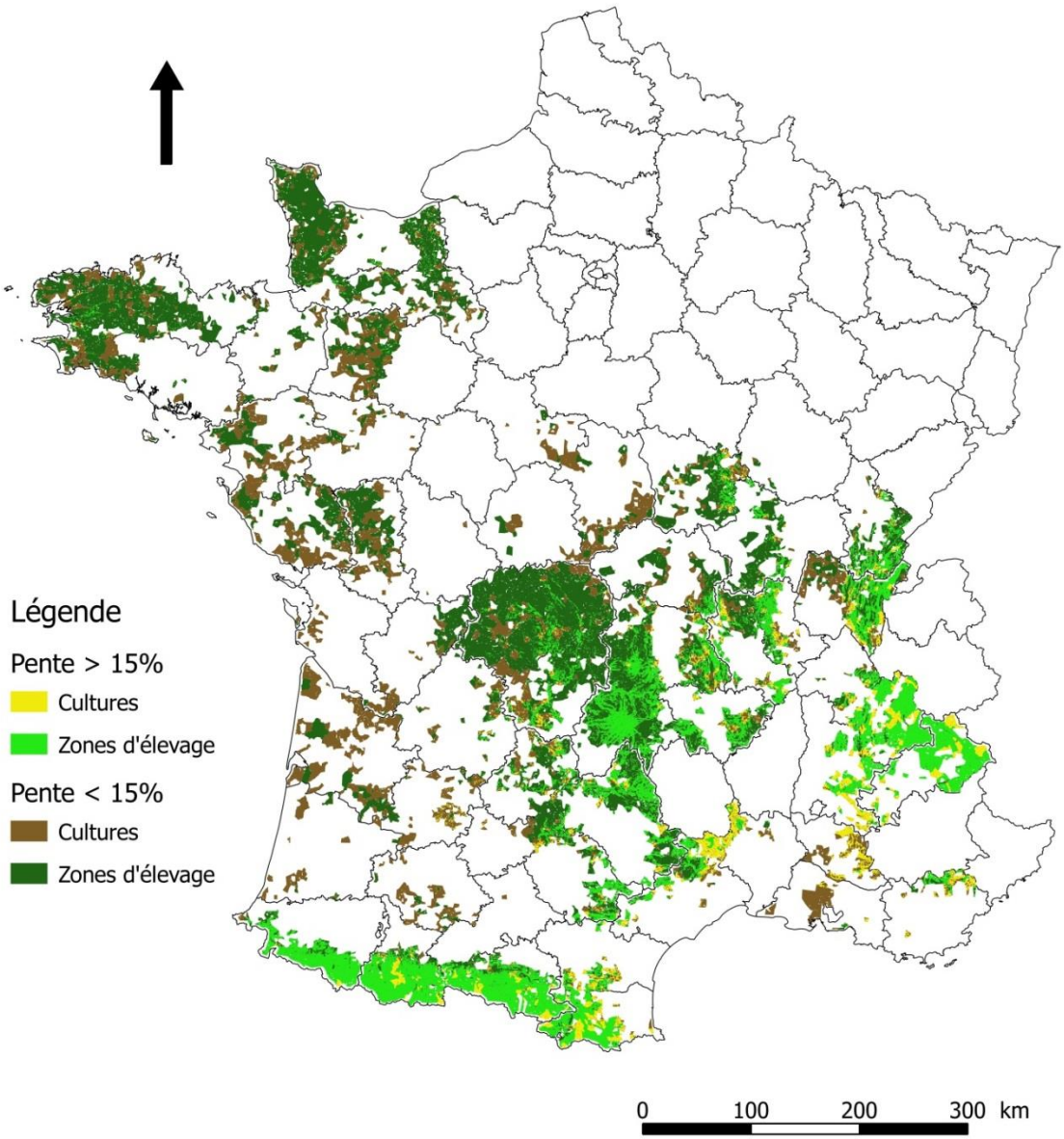


Figure 20 : Le type d'occupation du sol en fonction des classes de pente pour les zones où la densité de haies est supérieure à 4%

3.3.2 Sélection des secteurs

Le choix est fait de sélectionner deux secteurs dont la principale différence sera la pente. Le premier secteur, se situant dans les Hautes-Alpes, possède des valeurs de pente supérieures à 15%. Le deuxième secteur, localisé dans les Côtes-d'Armor, montre des pentes constamment inférieures à 15%. Les deux secteurs ont une très forte densité de haies et une occupation du sol variée, avec des cultures et de l'élevage. Pour obtenir une idée plus précise de l'occupation du sol sur ces zones, nous avons utilisé le registre parcellaire graphique, qui détaille chaque pratique par parcelle.

Les deux cartes suivantes montrent la localisation des secteurs au niveau national ainsi que l'occupation du sol sur ces secteurs grâce au registre parcellaire agricole de 2016.

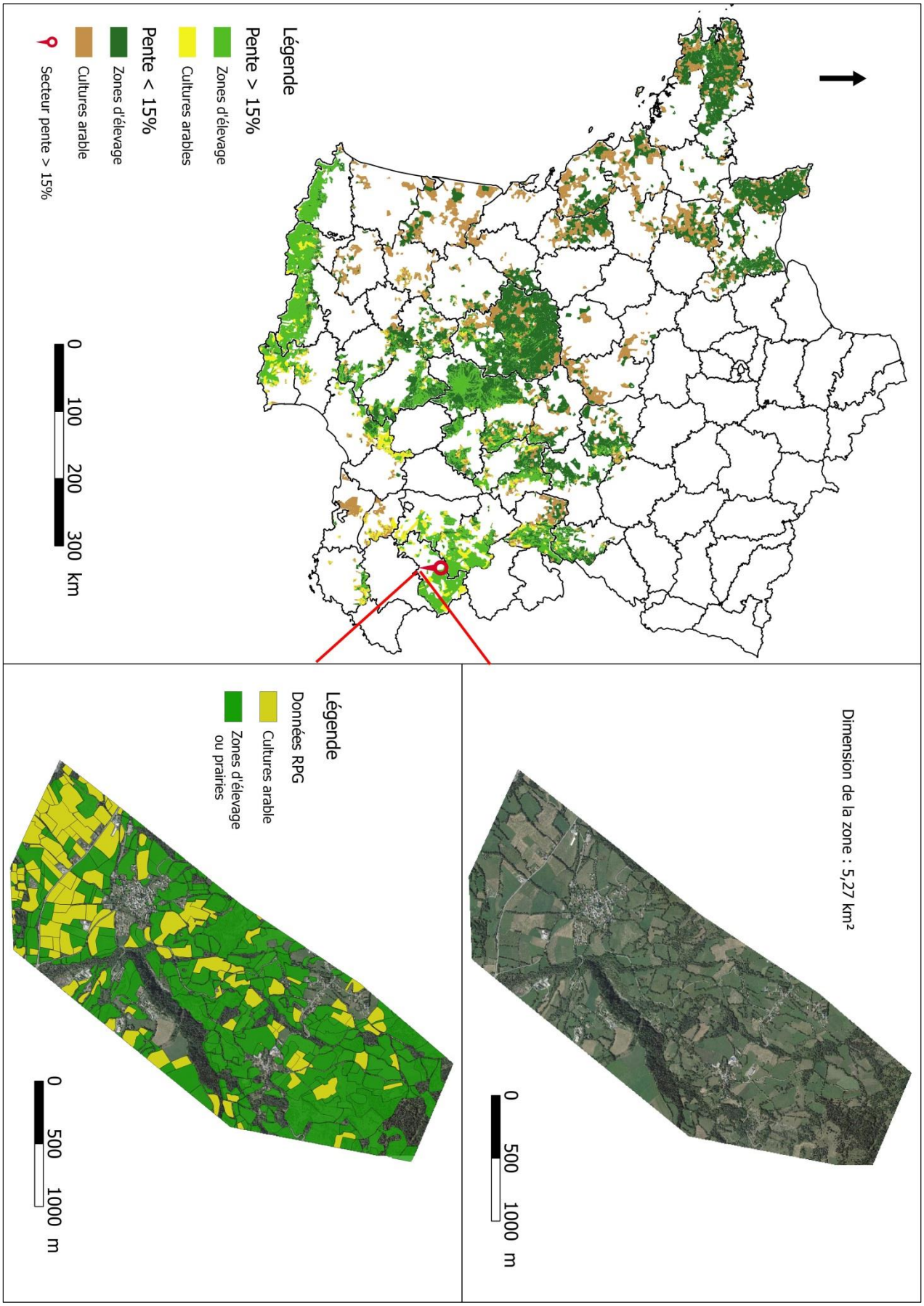


Figure 21 : Localisation, occupation du sol et vue aérienne du secteur sélectionné dans les Hautes-Alpes

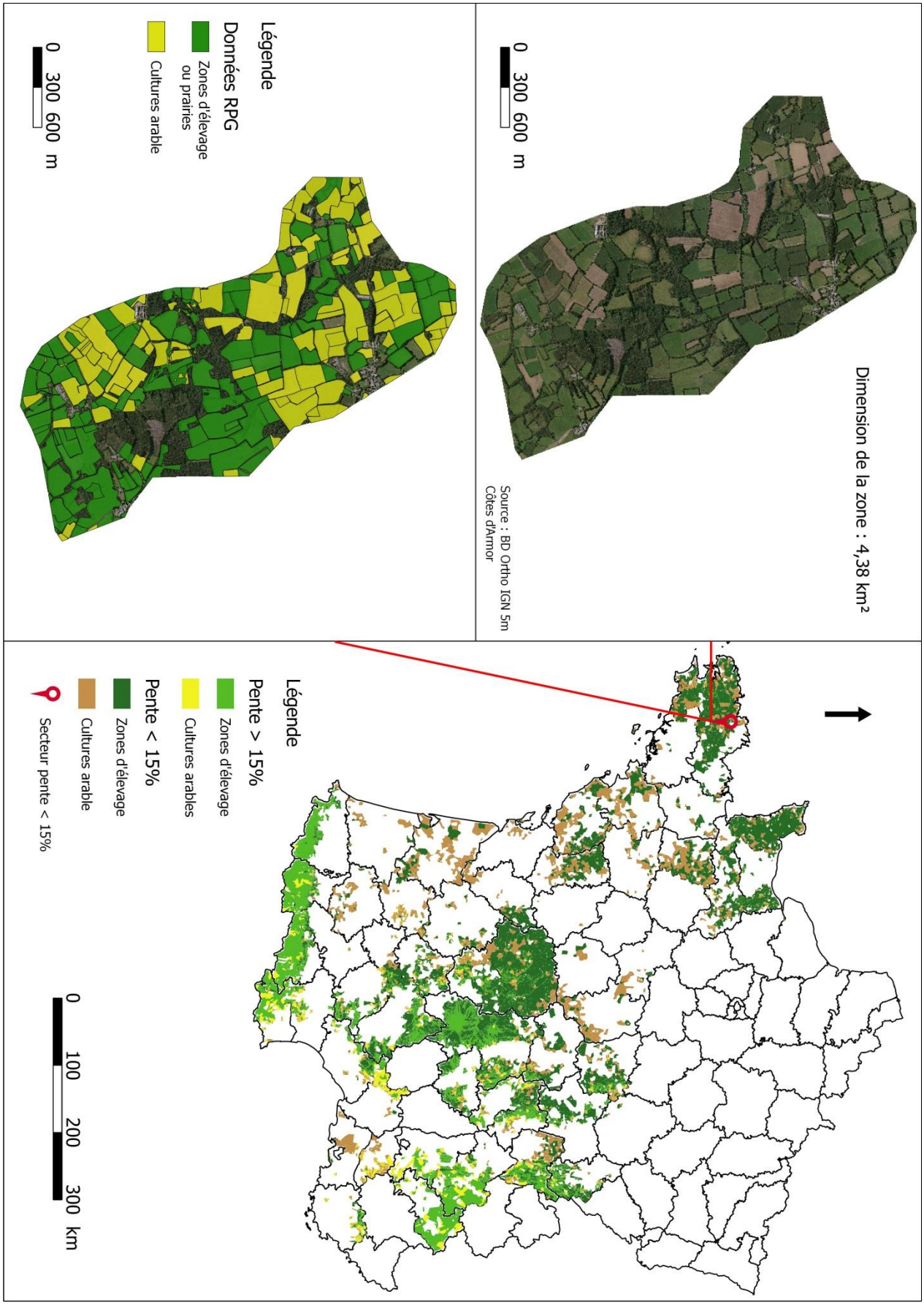


Figure 22 : Localisation, occupation du sol et vue aérienne du secteur situé dans les Côtes-d'Armor

3.3.3 Travail à l'échelle des secteurs

Maintenant que les secteurs sont sélectionnés, nous allons pouvoir commencer la deuxième étape, qui est le travail à l'échelle du versant. Cette étape consiste en la cartographie des haies présentes sur les secteurs pour obtenir une couche du linéaire de haies. A partir de cela, les paramètres restants de la typologie (position par rapport à la ligne de plus grande pente, position dans le versant etc….) vont pouvoir être appliqués. On pourra alors voir si la typologie nous permet d'approcher les fonctions des haies dans nos secteurs.

3.3.3.1 Digitalisation du linéaire de haies

La digitalisation du linéaire de haies montre une densité de haies élevée sur les deux secteurs (5,64 km/km² pour le secteur dans le Champsaur et 9,05 km/km² pour celui dans les Côtes-d'Armor). A l'opposé, l'organisation du réseau de haies est très différente d'un secteur à l'autre. Pour le secteur se situant dans les Côtes-d'Armor, on observe un réseau très organisé qui quadrille le versant. On retrouve la disposition typique du bocage, ce qui explique la densité plus élevée. Pour le secteur se situant dans les Hautes-Alpes, cette disposition semble plus aléatoire.

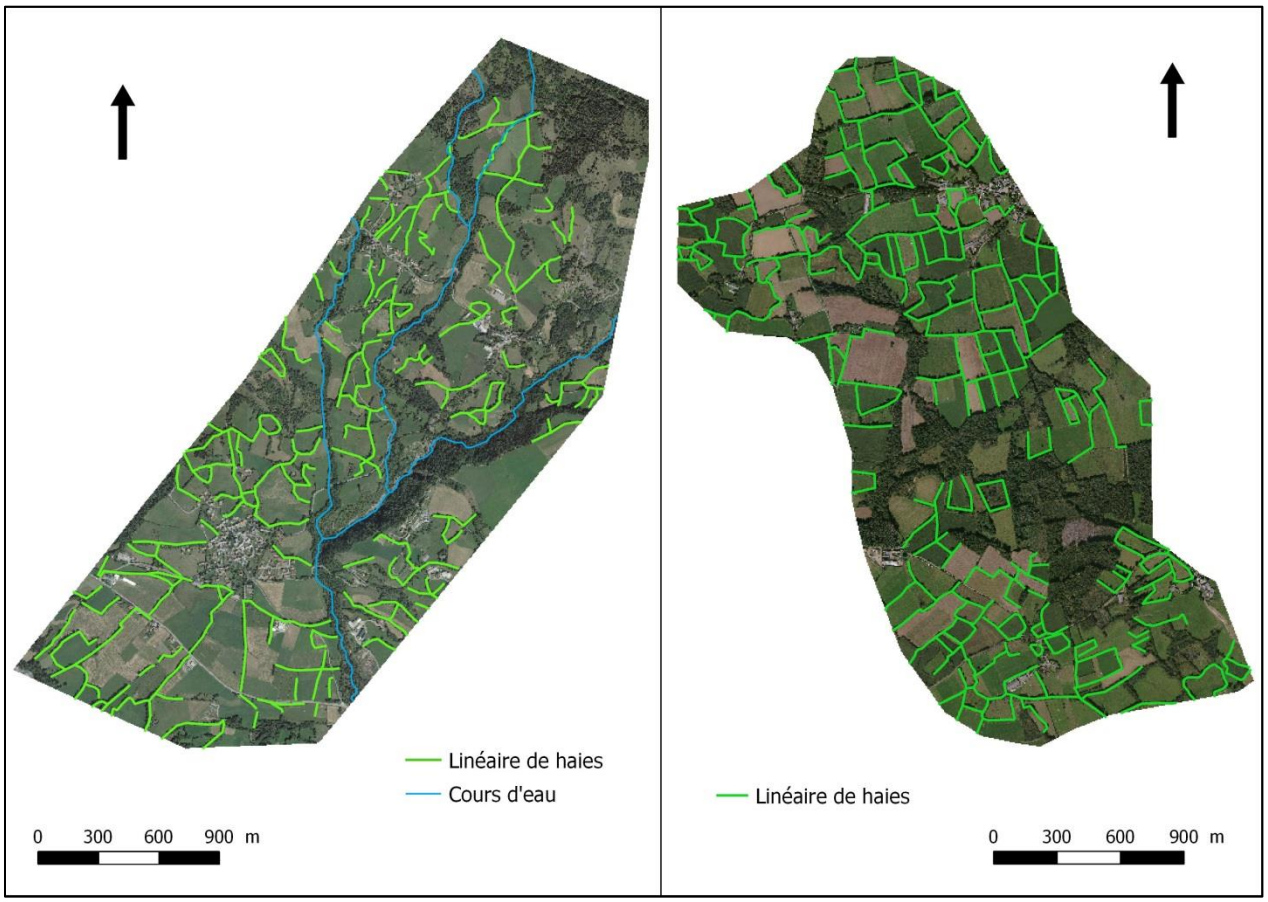


Figure 23 : Le linéaire de haies sur les deux secteurs. A gauche le secteur localisé dans le Champsaur et à droite le secteur localisé dans les Côtes-d'Armor.

3.3.3.2 Application des paramètres de la typologie

La pente ne sera pas abordée dans cette partie car les intensités de pente des deux secteurs ont déjà été détaillées auparavant. La pente ayant été utilisée lors des travaux à l’échelle nationale.

Deux autres paramètres ne pourront pas être appliqués durant cette partie. Ce sont la présence d’un talus et la stratification végétale de la haie. Pour la présence d’un talus le problème est qu’à partir d’une photographie aérienne il est impossible d’isoler leur présence. Il en va de même pour la stratification végétale, on peut à partir d‘une photographie aérienne distinguer uniquement la présence de strates végétales développées tels que les strates arborées ou arbustives. Par contre, il est impossible de mettre en avant la présence d’une strate herbacée sous ces strates développées. Ces deux paramètres ne seront donc pas appliqués dans l’étude qui va suivre. Pour pouvoir les utiliser une visite de terrain semble obligatoire.

La position dans le versant, la position par rapport à la ligne de plus grande pente et l’occupation du sol ont donc été utilisées. La position dans le versant (pour rappel ; haut, milieu ou bas de versant) a été mise en place en fonction de la forme du versant ainsi que des ruptures de pente. Pour la position par rapport à la ligne de plus grande pente une analyse de direction des flux à partir du MNT a permis de mettre en évidence les directions de pente. A partir de cette analyse on peut donc déterminer qu’elles sont les haies en travers ou dans le sens des écoulements et de la pente. Pour l’occupation du sol les données RPG ont été utilisées comme précédemment.

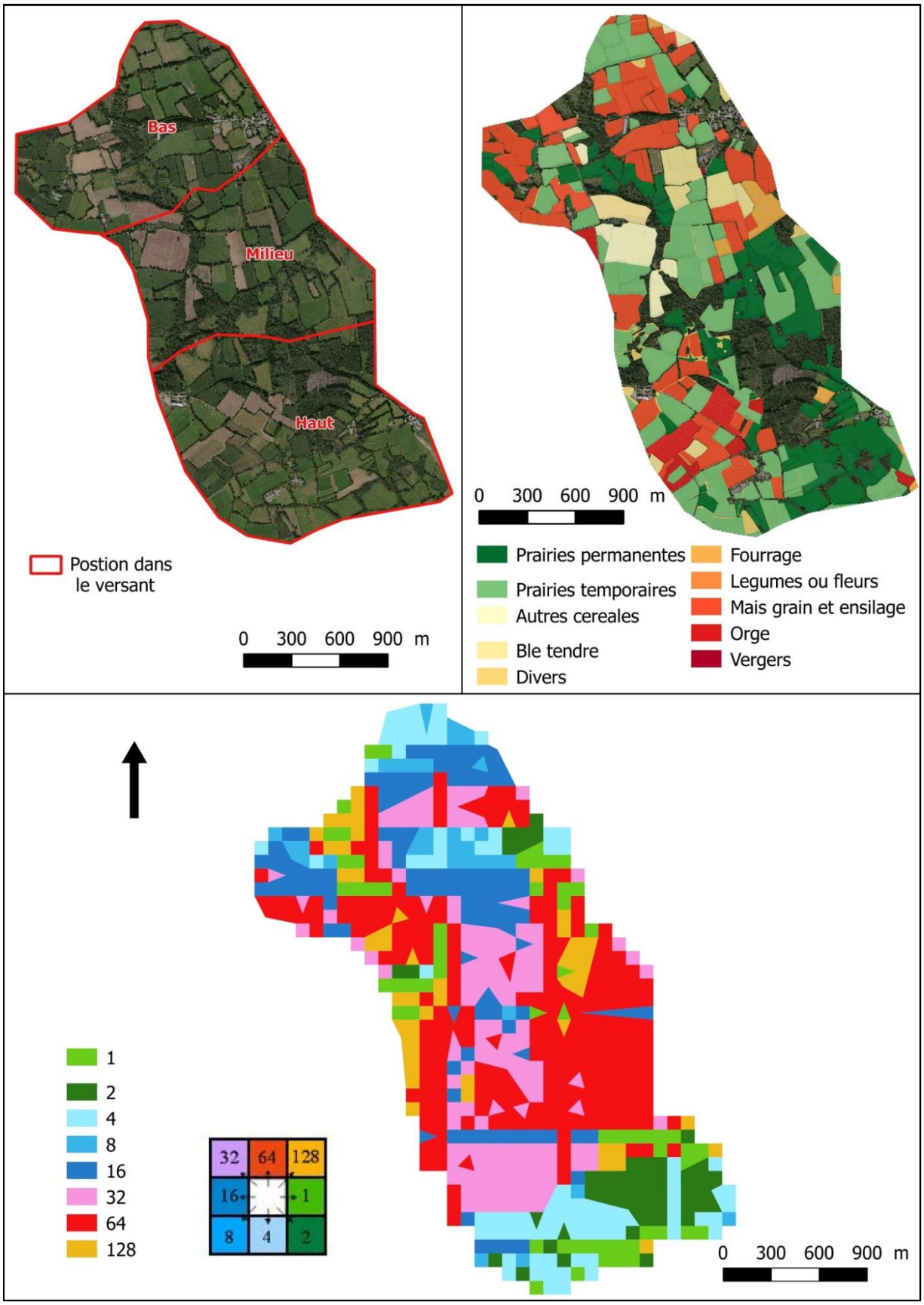


Figure 24 : La position dans le versant, l'occupation du sol et la direction des pentes pour le secteur des Côtes-d'Armor.

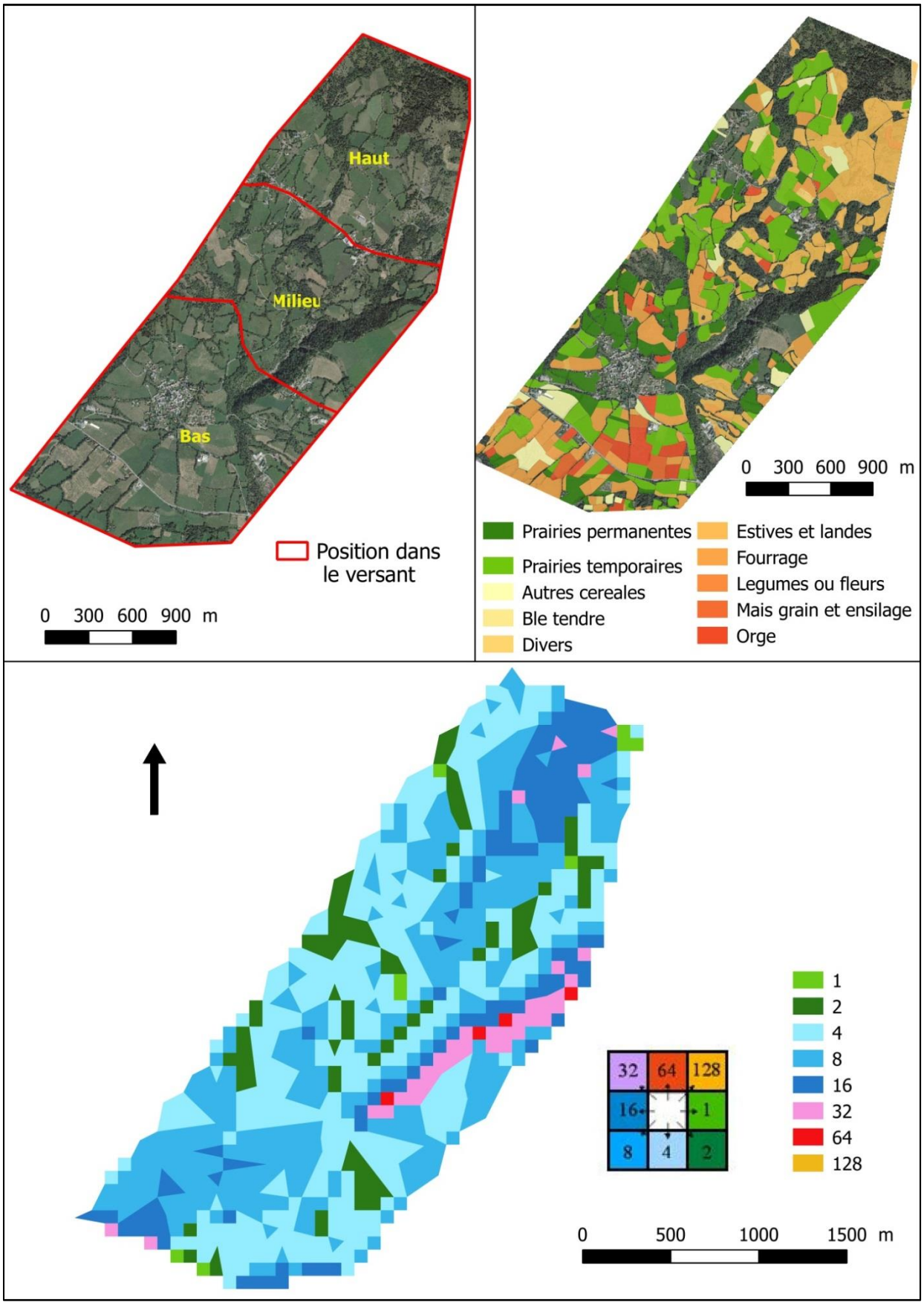


Figure 25 : La position dans le versant, l'occupation du sol et la direction des pentes pour le secteur localisé dans le Champsaur.

3.3.3.3 Résultat et discussion

Dans l'ensemble, la typologie nous permet, assez simplement, d'isoler la fonction d'une haie dans le versant.

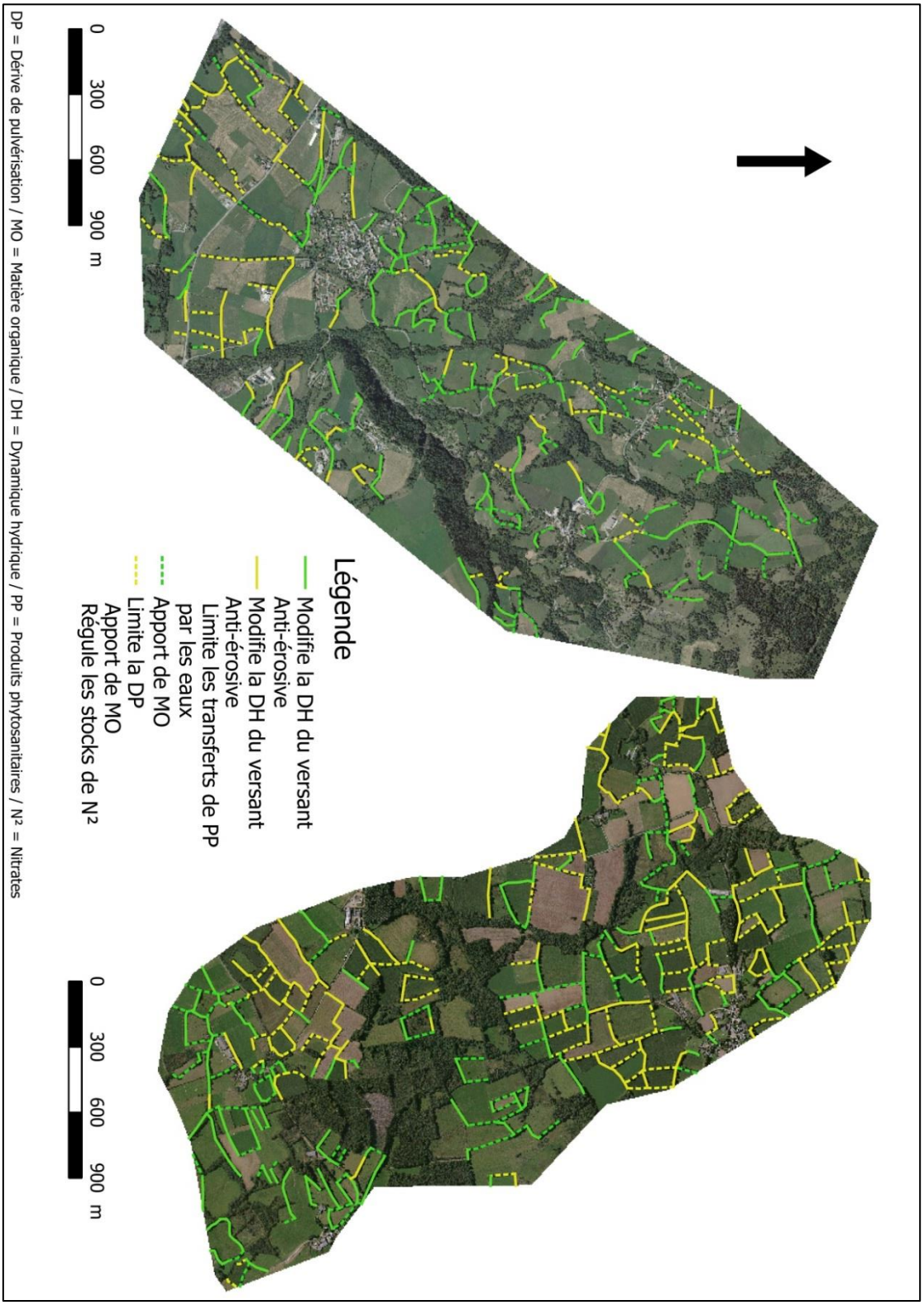


Figure 26 : Résultats de l'application de la typologie. A gauche le secteur localisé dans le Champsaur et à droite le secteur localisé dans les Côtes-d'Armor.

Les principaux problèmes rencontrés pour appliquer la typologie viennent, comme vu précédemment, de certains paramètres et de leur mobilisation. Si l'on considère la typologie sous cette forme, une visite de terrain serait préférable avant son application.

Comme vu plus tôt dans le rapport, un certain nombre de paramètres qui ont une influence connus sur les impacts de la haie dans le versant n'ont pas été utilisés pour cette typologie. Ces paramètres n'ont pas été intégrés à la typologie soit, car ils n'ont pas été jugés prédominant sur les autres soit, car leurs mises en place est complexe. On pourrait donc se demander, en réponse au problème d'application de la typologie dû à une visite obligatoire sur le terrain, si l'on peut construire deux typologies différentes, une de terrain et l'autre purement théorique. La typologie de terrain pourrait prendre en compte les paramètres suivant :

- La structure de la haie
- Les strates végétales
- La largeur de la haie
- Son taux de recouvrement
- L'entretien de la haie
- Le système racinaire (forme, profil)
- Les espèces composant la haie

La typologie plus théorique pourrait être utilisée à différentes échelles selon les données disponibles et leurs précisions. Elle pourrait prendre en compte ses paramètres :

- La position par rapport à la ligne de plus grande pente
- La position dans le versant
- La nature du sol et sous-sol
- L'intensité de la pente
- L'occupation du sol
- La teneur en eau et la saturation du sol (IDPR, Indice de Beven-Kirkby)

Cela permettrait, selon l'échelle de travail, la précision souhaitée, la possibilité de déplacement ou encore la capacité de manipulation sur SIG de pouvoir dans tous les cas se servir de cette typologie.

Conclusion

En lien avec les différents objectifs de réhabilitation de la qualité des eaux de surface, des recherches sont menées sur les transferts d'eaux et de produits phytosanitaires à différentes échelles comme celle du bassin versant, du versant ou de la parcelle. Ces travaux s'attachent à modéliser, à quantifier ou à isoler l'impact de certaines structures paysagères sur ces transferts. L'objectif peut aller de la compréhension des processus au développement de réponses comme des zones tampon diverses.

A travers l'état de l'art réalisé, nous avons caractérisé et isolé différentes fonctions de la haie dans un versant ou dans un bassin versant. Nous nous sommes concentrés sur les impacts sur l'érosion, les transferts d'eau ou de produits phytosanitaires, la séquestration et les flux de nitrates et de matière organique. Nous avons pu détailler l'action des haies sur ces différents transferts, les processus en jeux et, quand il était possible, les ordres de grandeur.

Dans un deuxième temps, les principales caractéristiques responsables des fonctions d'une haie dans un versant ont été mises en avant. Elles ont été regroupées dans une typologie pouvant aider à isoler la fonction d'une haie grâce à des paramètres principaux. Nous obtenons donc un arbre de décision qu'il faudra appliquer sur des zones test pour vérifier sa validité.

On observe, à l'heure actuelle en France, un intérêt grandissant pour cette structure du paysage, notamment pour ses fonctions et intérêts environnementaux. Les plantations semblent être en augmentation. Le rapport permet d'approcher les caractéristiques qui sont responsables des fonctions d'une haie. Il peut aussi aider à la réflexion quant à la mise en place de haies ou de haies sur talus. Il permet de se concentrer sur le type de haies (structure de la haie, présence d'un talus etc…) à implanter par rapport à l'objectif de la plantation et l'environnement avoisinant.

Perspectives

Au vue de l'état de l'art, il semble que l'impact de la haie sur les transferts de produits phytosanitaires par le ruissellement, les écoulements de subsurface ou encore l'infiltration a été peu étudié.

Pour le ruissellement, quelques études existent et permettent d'approcher les impacts de la haie sur ces types de transfert, mais elles restent trop peu nombreuses. Dans le cas des écoulements de subsurface ou de la percolation, il semble qu'aucunes études n'abordent le sujet.

L'augmentation de la teneur en matière organique du sol à l'approche de la haie ainsi que son rôle de drain subvertical sont des aspects propres à la haie. Il existe peu de structure du présentant ces fonctions. Pour une meilleure compréhension des impacts de la haie sur les transferts de pesticides, ces aspects devraient être mis en avant et étudié.

Il semble nécessaire de conduire des études de terrain avec différentes conditions de pentes, différents sols et différents types de haies (sur talus, avec une strate herbacée développée, sans strate herbacée) pour évaluer plus globalement le rôle de la haie par rapport aux produits phytosanitaires. Ainsi la modélisation de son action pourrait être réalisée avec plus de précisions.

Bibliographie

Adhikary, P. P. et al., 2017. Soil erosion control and carbon sequestration in shifting cultivated degraded highlands of eastern India: performance of two contour hedgerow systems. *Agroforestry Systems,* 01 8, Volume 91, pp. 757-771.

Alegre, J. C. & Rao, M. R., 1996. Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *Agriculture, Ecosystems \& Environment,* Volume 57, pp. 17-25.

Ambroise, B., 1999. *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant: processus, facteurs, modèles.* Éd. HGA.

Aubertot, J. N. et al., 2005. *Pesticides, agriculture et environnement : réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Synthèse du rapport de l'expertise*.

Baudry, J., Bunce, R. G. H. & Burel, F., 2000. Hedgerows: An international perspective on their origin, function and management. *Journal of Environmental Management,* Volume 60, pp. 7-22.

Baudry, J. & Jouin, A., 2003. De la haie au bocage: organisation, fonctionnement et gestion. *Paris, INRA Editions, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.*

Benhamou, C., 2012. *Modélisation de l'effet des interactions haies-cultures sur les transferts d'eau et d'azote à l'échelle d'un petit bassin versant agricole*.

Bernard, K., Carluer, N. & Henaff, G. L., 2014. Limitation du transfert hydrique des produits phytosanitaires par les zones tampons : caractérisation de l'existant et propositions de dispositifs correctifs et complémentaires. *Techniques Sciences Méthodes,* pp. 83-99.

Blonska, E., Lasota, J. & Zwydak, M., 2017. The relationship between soil properties, enzyme activity and land use. *Forest Research Papers,* Volume 78, pp. 39-44.

Boutron, O., 2009. *Etude de l'influence de l'hydrodynamique sur le transfert des produits phytosanitaires dans les fossés agricoles ; Approches expérimentale et numérique.*

Branger, F., 2007. *Utilisation d'une plate-forme de modélisation environnementale pour représenter le rôle d'aménagements hydro-agricoles sur les flux d'eau et de pesticides : application au bassin de la Fontaine du Theil (Ille-et-Vilaine)*.

C.R de la table ronde INSA, U. d. R. 5. 6. e. 7. j. 1., 1976. *Les bocages, histoire, écologie, économie: "Aspects physiques, biologiques et humains des écosystèmes bocagers des régions tempérées humides".* INRA.

Calvet, R., 2005. *Les pesticides dans le sol: conséquences agronomiques et environnementales.* France Agricole Editions.

Carluer, N., Henaff, G. L., Margoum, C. & Gouy, V., 2011. Ecoulements agricoles et produits phytosanitaires. *Techniques Sciences Methodes,* pp. 37-46.

Carluer, N., Le Hénaff, G., Margoum, C. & Gouy, V., 2011. Écoulements agricoles et produits phytosanitaires. *Techniques Sciences Méthodes,* pp. 37-46.

Carnet, C., 1978. *Étude des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne : une approche du rôle du bocage*.

Caubel, V., 2001. *Influence de la haie de ceinture de fond de vallée sur le transfert d'eau et de nitrate*.

Caubel, V., Grimaldi, C., Merot, P. & Grimaldi, M., 2003. Influence of a hedge surrounding bottomland on seasonal soil-water movement. *Hydrological Processes,* Volume 17, pp. 1811-1821.

CORPEN, G. Z. T., 2007. Les fonctions environnementales des zones tampons, Les bases scientifiques et techniques des fonctions de protection des eaux. *Ministère de l'écologie dlé, du développement durable et de l'aménagement du territoire et Ministère de l'agriculture et de la pêche, Paris, France.*

Dairon, R., 2015. *Identification des processus dominants de transfert des produits phytosanitaires dans le sol et évaluation de modèles numériques pour des contextes agro-pedo-climatiques variés*.

Davis, B. N. K. et al., 1994. The Effects of Hedges on Spray Deposition and on the Biological Impact of Pesticide Spray Drift. *Ecotoxicology and Environmental Safety,* Volume 27, pp. 281-293.

Follain, S., 2005. *Effet du réseau bocager sur l'organisation des sols. Redistributions des sols et stockage en carbone organique*.

French, D. D. & Cummins, R. P., 2001. Classification, composition, richness and diversity of British hedgerows. *Applied vegetation science,* Volume 4, pp. 213-228.

Ghazavi, G., 2008. *Quantification spatiale et temporelle de l'impact d'une haie sur les différents termes du bilan hydrique*.

Ghazavi, G. et al., 2008. Hedgerow impacts on soil-water transfer due to rainfall interception and root-water uptake. *Hydrological Processes,* 11, Volume 22, pp. 4723-4735.

Gouy, V., 1993. *Contribution de la modélisation à la simulation du transfert des produits phytosanitaires de la parcelle agricole vers les eaux superficielles*.

Gouy, V., 2012. *Transferts hydriques superficiels des substances phytosanitaires utilisées en agriculture : dynamique de mobilisation, atténuation possible et impact sur les cours d'eau.* HDR, Université Lyon I.

Grébil, G., Novak, S., Perrin-Ganier, C. & Schiavon, M., 2001. La dissipation des produits phytosanitaires appliqués au sol.

Gril, J. J., 1999. Processus de transfert superficiel des produits phytosanitaires, de la parcelle au bassin versant. *La Houille Blanche,* pp. 76-80.

Gril, J. J., Carluer, N. & Hénaff, G. L., 2011. Des zones tampons pour limiter la pollution des eaux par les pesticides dans les bassins versants. *Techniques Sciences Méthodes,* pp. 20-32.

Grimaldi, C., Baudry, J. & Pinay, G., 2012. Des zones tampons dans les paysages ruraux pour la régulation de la pollution diffuse.

Grimaldi, C. et al., 2012. Nitrate attenuation in soil and shallow groundwater under a bottomland hedgerow in a European farming landscape. 11, Volume 26, pp. 3570-3578.

Guimont, S., 2005. *Devenir des pesticides dans les sols en fonction de l'état d'humidité et du mode de circulation de l'eau dans le sol*.

Kiepe, P., 1996. Cover and barrier effect of Cassia siamea hedgerows on soil conservation in semi-arid Kenya. *Soil Technology,* Volume 9, pp. 161-171.

Kjær, C. et al., 2014. Pesticide drift deposition in hedgerows from multiple spray swaths. *Journal of Pesticide Science,* Volume 39, pp. 14-21.

Lauriks, R., Wulf, R., Carter, S. & Niang, A., 1998. A methodology for the description of border hedges and the analysis of variables influencing their distribution: A case study in western Kenya. 11, Volume 44, pp. 69-87.

Lazzaro, L., Otto, S. & Zanin, G., 2008. Role of hedgerows in intercepting spray drift: Evaluation and modelling of the effects. *Agriculture, Ecosystems \& Environment,* Volume 123, pp. 317-327.

Lefeuvre, 1986. Des arbres et des hommes. *Le bocage, la haie, le bois. Journées interrégionales, Saint-Hilaire-du-Harcouët Manche, DRAF, Ministère de l'Environnement et Ministère de l'Agriculture.*

McCann, T. et al., 2017. How hedge woody species diversity and habitat change is a function of land use history and recent management in a European agricultural landscape. *Journal of Environmental Management,* Volume 196, pp. 692-701.

Mérot, P., 1978. *Le Bocage en Bretagne granitique : une approche de la circulation des eaux*.

Millet, M. & Bedos, C., 2016. La contamination de l'atmosphère par les produits phytosanitaires. Protéger les végétaux des attaques de pesticides nuisibles. 1.

Pacyna, S. & Vanpeene-Bruhier, S., 2001. *Spatial knowledge and characteristics of the mountain hedgerow network of Bourg d'Oisans plain (French Alps).*, pp. {105-110}.

Patty, L., 1997. *Limitation du transfert par ruissellement vers les eaux superficielles de deux herbicides (isoproturon et diflufenicanil). Methodologie analytique et etude de l'efficacite de bandes enherbees.*

Peyrard, X., 2016. *Transfert de produits phytosanitaires par les écoulements latéraux en proche surface dans le Beaujolais de coteaux: suivi sur parcelle exploitée, expérimentation de traçage in situ et modélisation*.

Ryszkowski, L. & Kędziora, A., 2007. Modification of water flows and nitrogen fluxes by shelterbelts. *Ecological Engineering,* Volume 29, pp. 388-400.

Vaezi, A. R., Zarrinabadi, E. & Auerswald, K., 2017. Interaction of land use, slope gradient and rain sequence on runoff and soil loss from weakly aggregated semi-arid soils. *Soil and Tillage Research,* Volume 172, pp. 22-31.

Vanpeene Bruhier, S. et al., 2007. Le bocage de la plaine de Bourg-d'Oisans : de la connaissance de son évolution à sa gestion dans le cadre d'un plan local de gestion de l'espace. Dans: *Bocages et sociétés,* Presses universitaires de Rennes, pp. 175-184.

Viaud, V., Grimaldi, C. Mérot, P., 2009. Impact des haies sur la ressource en eau et en sol à partir de l'exemple de la Bretagne : résultats récents et perspectives. *Revue Forestière Francaise.*

Walter, C., Merot, P., Layer, B. & Dutin, G., 2003. The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. *Soil Use and Management,* Volume 19, pp. 201-207.

Wang, Q. et al., 2018. Effectiveness of narrow grass hedges in reducing atrazine runoff under different slope gradient conditions. *Environmental Science and Pollution Research,* Volume 25, pp. 7672-7680.

Wang, Q. et al., 2018. Effect of grass hedges on runoff loss of soil surface-applied herbicide under simulated rainfall in Northern China. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* Volume 253, pp. 1-10.

Zalidis, G. et al., 2002. Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* Volume 88, pp. 137-146.

Zhao, X. N., Wu, P. T., Gao, X. & Persaud, N., 2013. Soil Quality Indicators in Relation to Land Use and Topography in a Small Catchment on the Loess Plateau of China. 2.Volume 26.

Annexes

Annexe 1 : Principales réglementations autour des produits phytosanitaires

Elles concernent tout autant la mise sur le marché des produits que leur application

Par exemple, au niveau Européen, la réglementation traite principalement les éléments relatifs à :

- la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges (règlement (CE) n° 1272/2008)
- la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques (règlement (CE) n° 1107/2009)
- l'instauration d'un cadre d'action communautaire pour parvenir à une utilisation des pesticides compatible avec le développement durable (directive 2009/128/CE du 21 octobre 2009)

Au niveau Européen, en 2013, 423 substances actives étaient autorisées.

Au niveau national, la réglementation s'applique plutôt à leur application, pour limiter les risques pour l'environnement, les consommateurs et les utilisateurs.

Le vent est un paramètre important. Il est interdit de traiter avec un vent supérieur à 19Km/h car on estime qu'au-dessus de 15 km/h une dérive de pulvérisation se produit.

Leur utilisation est soumise au respect de zones de non traitement (ZNT) par rapport aux milieux aquatiques. Les dimensions de ces zones sont différentes en fonction du produit utilisé, elle varie entre 5 et 50 mètres. La pulvérisation du produit doit respecter cette zone.

Le délai autour des périodes de traitement est aussi une restriction importante. On distingue deux types de délais, le délai de re-entrée (DRE) et le délai avant récolte (DAR). Le DRE est un délai à respecter entre le moment où l'on traite et le retour sur la parcelle traitée. Le délai est compris entre 6 et 48 h en fonction des produits utilisés. Le DAR correspond, lui, à un laps de temps entre l'application du produit et la récolte. Ce délai peut aller de 3 jours à plus de 90 jours. Ce délai a été imposé pour limiter les quantités de résidus sur les productions.

Chaque utilisation de substances doit aussi être inscrite dans le registre phytosanitaire. L'agriculteur utilisant ces produits est obligé de le renseigner. Il permet une traçabilité des périodes et quantités de traitements appliqués à une parcelle.

On compte à l'heure actuelle en France, environ 4 000 produits qui bénéficient d'une autorisation de mise sur le marché.

Annexe 2 : Détails sur les mécanismes d'adsorption, de désorption et de dégradation des produits phytosanitaires

Adsorption et désorption

L'adsorption est un phénomène caractérisé par l'accumulation de molécules à la surface d'un solide, sous forme ionisées ou non. Dans le cas des produits phytosanitaires et de leur adsorption à la surface du sol, le phénomène se déroule à l'interface entre la phase solide, caractérisée par des particules d'argile et de matière organique et la phase liquide, caractérisée par le pesticide soit en suspension, soit en solution (Guimont, 2005). C'est un mécanisme majeur d'immobilisation des produits dans le sol (Patty, 1997). Cette immobilisation à la surface d'un solide dépend des caractéristiques des molécules composant le produit phytosanitaire et de l'énergie impliquée entre les molécules et l'absorbant.

L'adsorption d'un composé sur le sol peut être due à des interactions d'ordre physique, chimique ou à une forme de transition entre les deux.

Les interactions physiques sont de nature électrostatique, à l'image des forces de Van der Waals. Elles ne nécessitent que peu d'énergie. Ces forces sont responsables de l'adsorption des pesticides non-ioniques ou non polaires sur les acides humiques.

Les interactions d'ordre chimique sont par exemple les échanges d'ions, les échanges de ligands ou encore la protonation. Ces interactions nécessitent des énergies fortes et sont dépendantes des propriétés des feuillets d'argile et de la matière organique.

La liaison hydrogène peut être considérée comme une interaction d'ordre à la fois physique et chimique. Elle ne nécessite qu'une faible énergie (Guimont, 2005).

La désorption correspond au phénomène inverse. La fraction de produit adsorbée redevient biodisponible et donc mobilisable. Le phénomène est plus long et rarement complet. On parle d'hystérésis (Patty, 1997).

Ces processus dépendent beaucoup des caractéristiques physico-chimiques du sol, comme la teneur en matière organique et en minéraux argileux (Calvet, 2005). Des études ont montré que les pesticides avaient une affinité particulière avec les surfaces organiques. Cette affinité est plus variable avec les minéraux argileux, elle est fonction de leur nature ou encore de leur charge électrique totale. Le pH de la solution du sol semble avoir aussi un impact important sur ces processus. En effet, un changement de pH peut impacter la charge nette des pesticides ionisables et donc modifier les interactions de sorption. Par exemple, la rétention des pesticides ionisables diminuerait avec l'augmentation du pH (Patty, 1997). Les caractéristiques physico-chimiques de la molécule en question sont les derniers aspects à prendre en compte. Sa structure moléculaire, le pKa de la molécule (détermine l'état d'ionisation à un pH donné), la solubilité et la taille moléculaire de l'adsorbat sont les paramètres de la molécule à prendre en compte (Guimont, 2005).

Les deux principaux mécanismes de dégradation des produits phytosanitaires

– Dégradation biologique ou biotique

La dégradation biologique est le résultat de l'action des micro-organismes présents dans le sol, principalement des bactéries et des champignons. Les micro-organismes doivent posséder les enzymes adéquates pour transformer les produits présents. Ce processus varie en fonction de la molécule (structure chimique) et des facteurs pédoclimatiques (pH, humidité, teneur en matière organique) qui influent sur l'activité microbienne (Guimont, 2005).

On compte deux processus principaux de dégradation biologique, le métabolisme direct et le co-métabolisme (Calvet, 2005).

- Le métabolisme direct correspond à la dégradation de produits phytosanitaires par des micro-organismes (principalement des bactéries), qui l'utilisent comme source d'énergie pour leur croissance et le maintien de leurs activités. Certains micro-organismes, dont la plupart sont des bactéries, possèdent un patrimoine enzymatique permettant la transformation complète du produit. D'autres ne peuvent effectuer qu'une partie des transformations, ce qui nécessite donc l'action de plusieurs micro-organismes pour obtenir la molécule inorganique finale. On appelle ça un « consortium » de micro-organismes. Cette réaction est dépendante de la nature du pesticide, ainsi que de l'équipement enzymatique des micro-organismes présents.

- Le co-métabolisme est un processus de dégradation des pesticides au cours duquel les micro-organismes assurent leur maintenance et leur multiplication aux dépens d'un substrat organique. Il ne dégrade donc pas le pesticide pour s'en servir de source d'énergie ou d'élément nutritif. Ce processus nécessite donc l'intervention de nombreux micro-organisme, dont beaucoup de champignons, principalement car leur spectre enzymatique est peu spécifique. Le co-métabolisme ne conduit que rarement à une dégradation très poussée du pesticide sauf s'il y a intervention de plusieurs souches.

– Dégradation abiotique

Les dégradations abiotiques sont dues à un ensemble de réactions chimiques ou photochimiques. Ces réactions peuvent se faire en solution, en phase absorbé sur les minéraux ou encore sous l'action de la lumière (Calvet, 2005).

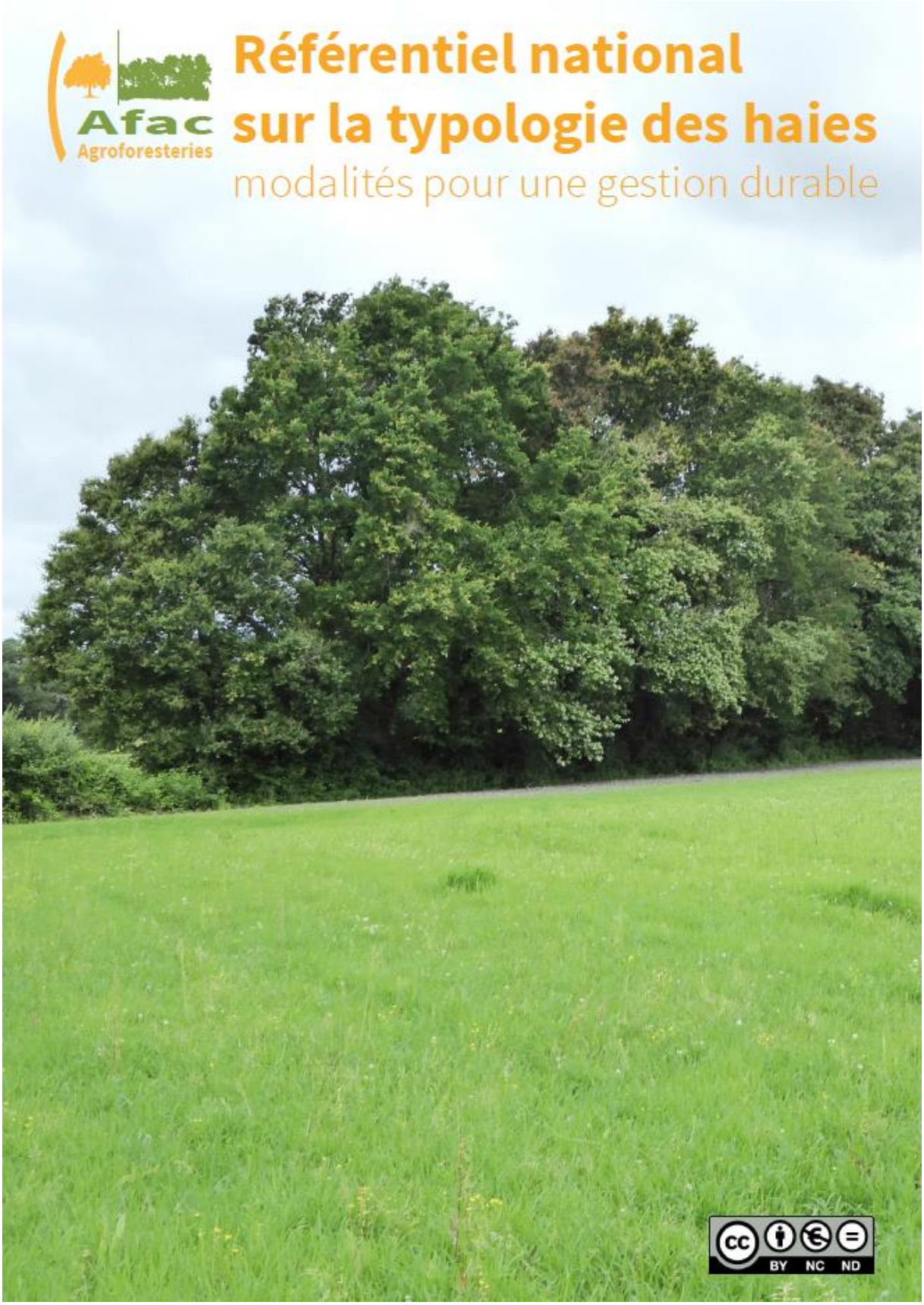
Les principales dégradations abiotiques en solution sont l'hydrolyse, où la décomposition du corps est due à la suppression d'une liaison covalente par l'action d'une molécule d'eau, l'oxydoréduction, qui sous-entend l'action d'un composé oxydant ou réducteur et pour finir la combinaison, dont l'origine est la présence de composé organique (Calvet, 2005).

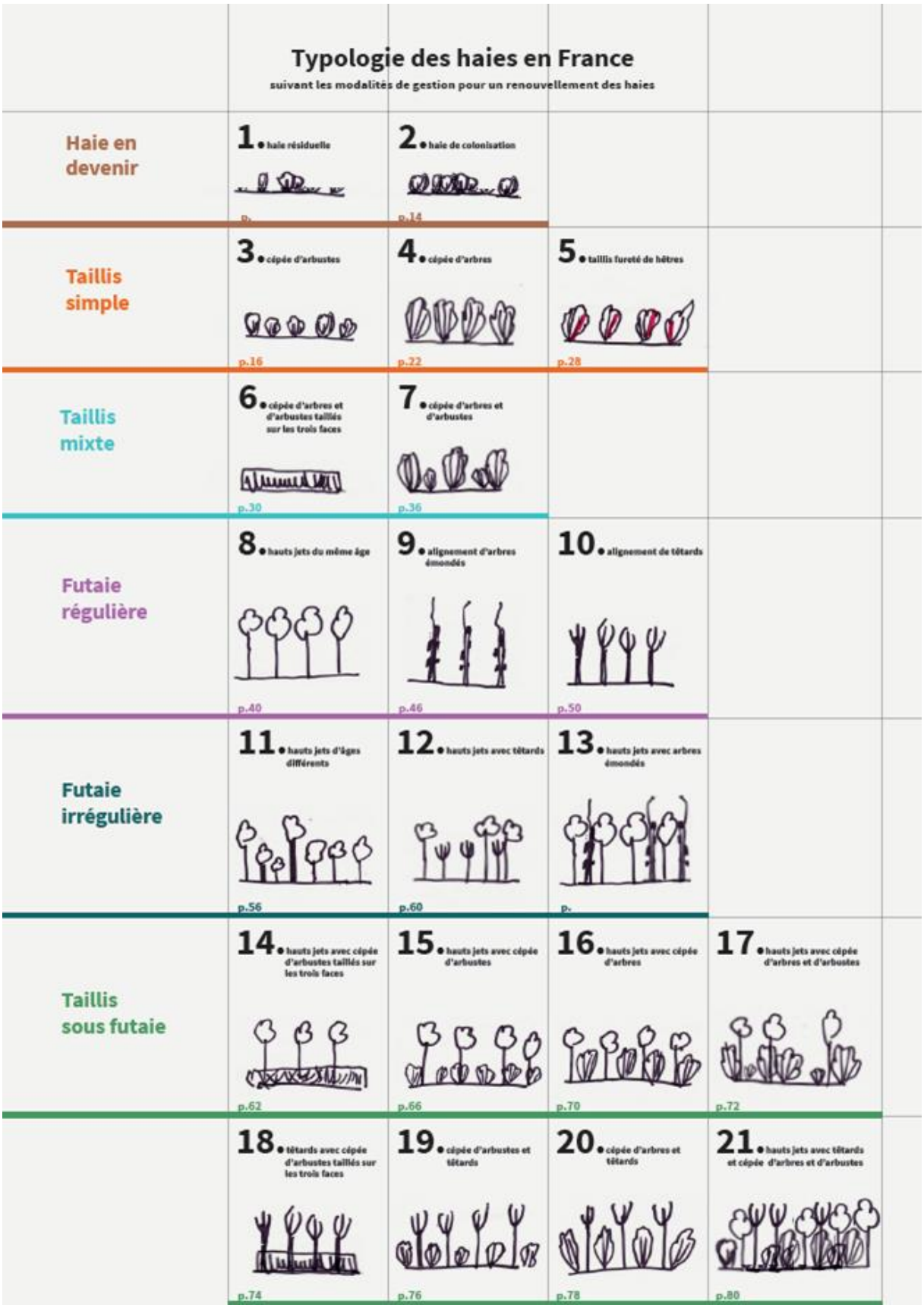
L'interface entre la solution du sol et les constituants solides possède des propriétés physico chimiques particulières, qui favorisent la dégradation des produits phytosanitaires absorbés. Ces dégradations en phase absorbées ont surtout été étudiées pour les minéraux argileux et les substances humiques (Guimont, 2005). Les résultats des analyses pour les minéraux argileux

semblent montrer que ces processus peuvent avoir lieu sur un sol en place. Il est très compliqué d'évaluer leur importance, notamment par rapport aux autres processus de dégradation. De plus, de nombreux facteurs semblent influencer ces réactions, comme la température, les propriétés des surfaces (chimique, électrique) ou encore la teneur en eau.

Le dernier type de dégradation abiotique est la photodégradation. Ce processus a une action sur les produits phytosanitaires se situant à la surface du sol, des feuilles ou encore dans l'air, et dans l'eau. Il agit donc sur des produits dissous, absorbés ou gazeux. La lumière active des réactions chimiques diverses qui vont décomposer les pesticides (hydrolyse, oxydation, réduction) (Guimont, 2005).

Annexe 3 : « Référentiel national sur la typologie des haies » réalisé par l'Afac-Agroforesterie




Typologie des haies en France
suivant les modalités de gestion pour un renouvellement des haies
Haie en devenir
1 • haie résiduelle
p.
2 • haie de colonisation
p.14
Taillis simple
3 • cépée d'arbustes
p.16
4 • cépée d'arbres
p.22
5 • taillis fureté de hêtres
p.28
Taillis mixte
6 • cépée d'arbres et d'arbustes taillés sur les trois faces
p.30
7 • cépée d'arbres et d'arbustes
p.36
Futaie régulière
8 • hauts jets du même âge
p.40
9 • alignement d'arbres émondés
p.46
10 • alignement de têtards
p.50
Futaie irrégulière
11 • hauts jets d'âges différents
p.56
12 • hauts jets avec têtards
p.60
13 • hauts jets avec arbres émondés
p.
Taillis sous futaie
14 • hauts jets avec cépée d'arbustes taillés sur les trois faces
p.62
15 • hauts jets avec cépée d'arbustes
p.66
16 • hauts jets avec cépée d'arbres
p.70
17 • hauts jets avec cépée d'arbres et d'arbustes
p.72
18 • têtards avec cépée d'arbustes taillés sur les trois faces
p.74
19 • cépée d'arbustes et têtards
p.76
20 • cépée d'arbres et têtards
p.78
21 • hauts jets avec têtards et cépée d'arbres et d'arbustes
p.80

Résumé

La structure paysagère semble avoir un impact important sur de nombreux processus s'opérant à l'échelle du bassin versant ou du versant. Ces processus peuvent être la dynamique hydrique et les écoulements de l'eau, les transferts de produits phytosanitaires ou encore les flux de différents composés comme la matière organique ou les nitrates.

L'objectif de ce rapport est de synthétiser les connaissances disponibles sur l'impact d'un élément du paysage, la haie ou haie sur talus sur ces différents processus. Les études étant dans l'ensemble nombreuses et diverses, réaliser une synthèse semble nécessaire pour avoir une vision claire de ces impacts. Par la suite, la réalisation d'une typologie permettra d'identifier les paramètres de son environnement physique et géographique, de sa structure ou encore de l'occupation du sol qui font varier les impacts de la haie ou haie sur talus sur ces différents processus. La typologie sera vérifiée par un travail cartographique, débutant à l'échelle nationale et aboutissant à petite échelle. L'objectif étant de vérifier si les paramètres mis en place sont utiles et fonctionnels pour isoler les fonctions d'une haie dans le versant.

Mots clés : haie, talus, érosion, ruissellement, matière organique, produits phytosanitaires, typologie

Abstract

The landscaped structure seems have an important impact on many processes taking place at the catchment or the hillside scale. These processes can be hydric dynamics, water flows, pesticide fate or solids compound transfer like organic matter or nitrates.

The objective of this report is to synthesize the available knowledge on the impact on these various processes, of an element of the landscape, the hedgerows or the hedgerows on bank.

Because of the numerous and the diversity of the studies on this subsject, realize a synthesis seems necessary to have a clear vision of these impacts. Afterward, the realization of a typology will allow to show the influence of the parameters like physical and geographical environment, structure of the hedgerow and the land use on these various processes. The typology will be verified by a cartographic work, that begins at national scale to finish at small scale. The objective is to verify if the parameters are useful and functional to isolate one or several functions of the hedge on the hillside or the watershed.

Keywords : hedgerow, bank, runoff, erosion, organic matter, pesticides, typology