



**HAL**  
open science

# 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.

Cyril Benhamou

► **To cite this version:**

Cyril Benhamou. 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.. Sciences du Vivant [q-bio]. AGROCAMPUS OUEST, 2012. Français. NNT: . tel-02809450

**HAL Id: tel-02809450**

**<https://hal.inrae.fr/tel-02809450>**

Submitted on 6 Jun 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.



## THESE / AGROCAMBUS OUEST

Sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne  
Pour obtenir le diplôme de :

**DOCTEUR DE L'INSTITUT SUPERIEUR DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
AGROALIMENTAIRES HORTICOLES ET DU PAYSAGE**

Spécialité : Sciences de l'Environnement  
Ecole Doctorale : Sciences De La Matière

Présentée par :

**Cyril BENHAMOU**

# **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.**

Soutenue le 15 novembre 2012 devant la commission d'examen

Composée de :

<b>Nathalie BRED A</b>	Directrice de Recherche, INRA, Nancy	Rapporteur
<b>Roger MOUSSA</b>	Directeur de Recherche, INRA, Montpellier	Rapporteur
<b>Christian DUPRAZ</b>	Ingénieur de Recherche, INRA, Montpellier	Examineur
<b>Sylvain PAYRAUDEAU</b>	Maître de Conférences, ENGEES, Strasbourg	Examineur
<b>Patrick DURAND</b>	Directeur de Recherche, INRA, Rennes	Examineur
<b>Philippe MEROT</b>	Directeur de Recherche, INRA, Rennes Professeur consultant Agrocampus Ouest	Directeur de thèse
<b>Catherine GRIMALDI</b>	Directrice de Recherche, INRA, Rennes	membre invitée
<b>Zahra THOMAS</b>	Maître de Conférences, Agrocampus Ouest	membre invitée



Laboratoire d'Accueil :

UMR 1069 INRA – Agrocampus Ouest *Sol Agro et hydrosystème Spatialisation*



## Remerciement

Je voudrais tout d'abord remercier les personnes qui ont été indispensables à l'achèvement de ce travail dont mes encadrants Philippe Merot et Catherine Grimaldi pour leur importante participation ainsi que pour leurs précieux conseils et soutiens, Chantal Gascuel qui a toujours été présente dans les moments difficiles, et pour son implication dans le bon déroulement de la thèse, Patrick Durand pour les échanges scientifiques et la mise en place du travail de modélisation et Jordi Salmon Monviola qui a été d'un grand soutien dans la conception du modèle. Je remercie également Valérie Viaud, Didier Michot et Mickael Corson pour leur aide.

Je remercie l'ensemble des techniciens qui ont participé au bon déroulement du suivi de terrain dont Jean Claude Marie, Yanick Hamon, Nicolas Gillet, Mickael Faucheux, Gilles Dutin et Gaétane Chirié, ainsi que l'ensemble des agriculteurs qui ont eu l'aimable gentillesse de nous prêter des morceaux de parcelles afin de mener à bien notre étude.

Je remercie l'ensemble du personnel de l'UMR-SAS pour leur accueil, leur bonne humeur et l'ensemble des discussions et échanges dans les couloirs du labo, à la cafétéria et lors des repas annuels. Je remercie notamment mes collègues de bureau Marine Lacoste, Alice Aubert, Benjamin Robert, Amphone Vongvixay, Charles Philippe Barthelemy et Guillaume Humbert avec qui les heures de bureau m'ont paru plus courtes. Je remercie l'ensemble des doctorants et contractuels Rémi Dupas, Issifou Adam, Ismaël, El Hadi, Pierre, Cédric, Thierry, Hongtao, Alban, Thibault, Emmanuel, Didier pour les nombreux échanges et avec qui les séances de tennis et de basket ont rendu ces trois années plus conviviales. Je remercie également Thomas Merle et Yannick qui ont apporté un peu plus de bonne humeur durant leur passage dans le labo de même pour Alexandre du Brésil et Sreelash venu d'Inde. Je remercie Monique pour son aide précieuse lors des recherches bibliographiques, Ophélie qui a toujours été de bonne compagnie durant les pauses à la cafétéria, Youssef pour sa bonne humeur et son soutien, et Joël pour l'ensemble de nos échanges.

Je remercie également l'ensemble du secrétariat Séverine, Karine, Tiphaine, Maryvonne, pour leur sympathie et leur efficacité.

Je tiens enfin à remercier mon entourage, ma famille et mes amies pour leur soutien et encouragements durant ce long travail.



## Résumé

Un des effets négatifs de l'intensification de l'agriculture depuis cinquante ans est la pollution des eaux par les nitrates. Cette pollution a des conséquences environnementales, économiques et en termes d'aménités notamment dans le cas de l'eutrophisation. Dans ce contexte, les agro-écosystèmes doivent évoluer par la mise en place de systèmes innovants combinant l'utilisation et la préservation des ressources naturelles. Les zones tampons tels que les réseaux bocagers pourraient être un outil permettant en partie la régulation des flux d'azote vers l'exutoire des bassins versants. La question se pose particulièrement en Bretagne où près de 60 % du linéaire de haies a disparu entre 1960 et 1980.

La question traitée ici est la quantification de l'impact de ces zones tampons à l'échelle du bassin versant pour permettre le choix de stratégies de gestion du paysage permettant de maximiser leurs valeurs apportées. L'hypothèse est que l'effet de la haie peut être variable en fonction de sa position sur le versant. L'originalité de ce travail par rapport aux études précédentes a été de s'intéresser à la position dans le paysage et donc aux relations avec la nappe, aux interactions avec les cultures ou les prairies connexes, ainsi qu'aux modalités d'entretien.

Cette thèse s'est déroulée en deux parties. La première a eu pour objectif d'évaluer l'impact de la haie sur les variations locales d'humidité du sol et sur le fonctionnement hydrologique d'un versant en fonction de sa position. Pour cela un site de mesure a été instrumenté au nord de l'Ille et Vilaine (Bretagne). Ce site a été suivi durant un an entre septembre 2009 et septembre 2010. La seconde a eu pour objectif d'introduire un nouveau module de fonctionnement de la haie dans le modèle spatialisé TNT2 en développant le concept de maille double couvert, qui a permis de prendre en compte de manière fine le réseau bocager d'un bassin versant et ses interactions avec les cultures, ainsi que l'effet de son entretien.

Les résultats expérimentaux montrent que les arbres de la haie se distinguent des autres types de végétation par des prélèvements plus importants dans les couches profondes du sol et que ces prélèvements sont affectés par l'entretien (taille) de la haie. L'apport par remontées capillaires lorsque la nappe est peu profonde tamponne les variations d'humidité du sol à proximité de la haie. La diminution locale d'humidité du sol et l'interception des précipitations par la canopée de la haie semblerait avoir une influence sur les écoulements de nappe lors de la reprise des écoulements.

Le module réalisé lors du travail de modélisation a été testé de manière approfondie et son comportement est globalement conforme aux attentes. Les phénomènes identifiés comme importants par les études de terrain et l'analyse de la littérature sont globalement simulés et leurs variations en fonction des conditions climatiques et topographiques sont cohérentes.

Les résultats de simulation montrent que l'effet de la haie sur le bilan d'eau et d'azote est fonction de sa position sur le bassin versant et du type de culture qui lui est associé. La compétition entre la haie et la culture associée est de plus en plus importante avec l'augmentation de la profondeur de la nappe, dépendant de la position dans le versant. Cette compétition est en partie atténuée par la taille d'entretien. D'autre part, la présence de la haie tend à augmenter la profondeur du toit de la nappe et le déficit en eau du sol. Cela a pour conséquence de réduire la dénitrification et la minéralisation. Les simulations effectuées sur le bassin versant de Kervidy-Naizin, estiment que la présence d'un réseau bocager entraîne une diminution annuelle du débit et des flux d'azote à l'exutoire. A une échelle temporelle plus courte, l'effet de la haie est plus marqué lors de la reprise des écoulements et lors du tarissement de la nappe.

Ainsi ce travail confirme la nécessité de prendre en compte les haies comme une structure en interaction fonctionnelle avec les autres éléments du paysage, avec lesquelles elles forment le complexe du bassin versant.

Mots clefs : Bocage, Transpiration, Modélisation spatialisée, Nitrate, Dénitrification, Minéralisation  
Maille double couvert, Elagage.



## Abstract

One negative effect of agricultural intensification for more than fifty years has been water pollution by nitrates, which has environmental and economic consequences. In this context, the agro-ecosystem must develop into innovative systems through a combination of use and preservation of natural resources. Buffer zones, such as hedgerow networks, could be a tool to partially regulate nitrogen flow at the watershed outlet. In Brittany (western France), where nearly 60% of hedgerows disappeared from 1960-1980, the issue is particularly important.

The problem dealt with here is to quantify, at the watershed scale, the impact of these buffer zones to maximize their value with management-landscape strategies. The assumption is that the hedgerow impact varies depending on its position on the hillslope. Compared to previous studies, the originality of this work has been to focus on hedgerow position in the landscape and therefore its relations with groundwater, associated crops or pastures, as well as the influence of pruning.

This work is divided into two parts. The first was to assess the impact of the hedgerow on local variations in soil moisture and hydrological functioning of a hillslope depending on hedgerow position. An experimental site was instrumented in the north of the Ille-et-Vilaine department (Brittany) and monitored for a year (September 2009-September 2010). The second part was to develop a new submodel for hedgerows in the spatially explicit model TNT2. We developed the concept of double-cover cell, which takes into account impact of interactions with crops and pruning.

Experimental results showed that hedgerow can be distinguished from other vegetation by its water uptake in deeper soil layers, and that this uptake is affected by management (pruning) of the hedgerow. Close to the hedgerow, when the water table is deep, capillary rise contributes to soil water variations. Local reduction in soil water content and rainfall interception by the hedgerow canopy seems to have an influence on groundwater flow in autumn.

The hedgerow submodel was thoroughly tested, and its behavior generally met expectations. The processes identified as important in field studies and the literature review were broadly represented, and their variations due to climatic and topographic conditions were consistent.

Model predictions indicated that hedgerow impact on water and nitrogen balances depends on its position in the watershed and the crop associated with it. Competition between the hedgerow and the associated crop increased as water table depth increased, as a function of hedgerow location in the watershed. This competition was partially mitigated by pruning. In contrast, hedgerow presence tended to increase water table depth and soil water deficit, which reduced denitrification and mineralization. Simulations of the-Kervidy Naizin watershed predicted that presence of a hedgerow network reduces annual water and nitrogen flow at the outlet. At shorter time scales, the effect of hedgerows is more pronounced in spring and autumn, when discharge is low.

Keyword: Hedgerow, Transpiration, Spatially explicit model, Nitrate, Denitrification, Mineralization, Double cover cell, Pruning.



## Sommaire

Introduction générale.....	1
1 Etat de l'art.....	3
2 Étude expérimentale du fonctionnement hydrique de différentes haies le long d'un versant	27
3 Développement d'un module haie dans le modèle spatialisé TNT2.....	61
4 Application du modèle au bassin versant de Kervidy-Naizin .....	77
5 Discrétisation latérale des couches de sol des mailles double couvert.....	129
Conclusion Générale.....	153
Bibliographie.....	157
Annexe .....	167
Liste des figures.....	179
Liste des tableaux.....	186
Table des matières .....	189



## Liste de Sigles et Acronymes

**ACASSYA** : **AC**compagner l'évolution **Agro**-écologique de **S** **SY**stèmes d'élev**Age** dans les bassins versants côtiers

**AgrHyS** : **Agro-HydroS**ystèmes

**CEMAGREF** : **C**entre national du **M**achinisme **A**gricole, du **G**énie **R**ural, des **E**aux et des **F**orêts.

**DRAAF** : **D**irection **R**égionale de l'**A**limentation, de l'**A**griculture de la **F**orêt.

**IFN** : **I**nventaire **F**orestier **N**ational.

**INRA** : **I**nstitut **N**ational de **R**echerche **A**gronomique.

**LAI** : **L**eam **A**rea **I**ndex

**ORE** : **O**bservatoire de **R**echerche en **E**nvironnement.

**PTMN** : **P**rofondueur **M**oyenne du **T**oit de la **N**appe

**RD** : **R**éseau bocager sur sol **D**rainant

**RH** : **R**éseau bocager sur sol **H**ydromorphes

**RI** : **R**éseau bocager sur sol **I**ntermédiaire

**RU** : **R**éserve **U**tile

**SOERE RBV**: **S**ystèmes d'**O**bservation et d'**E**xpérimentation au long terme pour la **R**echerche en **E**nvironnement. **R**éseau des **B**assin **V**ersant.

**SSCENR** : **S**chéma de **S**ervices **C**ollectifs des **E**spaces **N**aturels et **R**uraux

**TerUti – LUCAS** : **U**tilisation du **T**erritoire – **L**and **U**se/**C**over **A**rea frame **S**tatistical **S**urvey

**ZIE** : **Z**one d'**I**nteraction **E**tendue

**ZIE** : **Z**one d'**I**nteraction **R**éduite



## Introduction générale

Les problèmes environnementaux liés à l'intensification de l'agriculture sont de plus en plus connus et quantifiés. La Bretagne est particulièrement marquée notamment en termes de pollution des eaux par les nitrates. Les flux d'azote sortants au niveau des estuaires, ont augmenté de plus de 3000 tonnes par an pour atteindre une valeur de 140 000 tonnes par an en 2000-2001 (Aurousseau, 2003). Cette pollution a des conséquences environnementales, économiques et en termes d'aménités notamment dans le cas de l'eutrophisation qui touche de nombreux bassins côtiers bretons dominés par l'élevage.

Dans ce contexte, les agro-écosystèmes doivent évoluer par la mise en place de systèmes innovants combinant l'utilisation intensive et la préservation des ressources naturelles. Les zones tampons tels que les réseaux bocagers pourraient être un outil permettant en partie la régulation des flux d'azote vers l'exutoire des bassins versants.

Une des conséquences de l'intensification de l'agriculture depuis cinquante ans est l'arasement des haies qui permet d'augmenter la taille des parcelles exploitées. Ainsi, en Bretagne, près de 60 % du linéaire de haies a disparu entre 1960 et 1980 (SSCENR, 1999). De nos jours, ce phénomène de régression tend à s'atténuer mais n'est pas encore stabilisé puisque les surfaces détruites, que ce soit par arasement ou par dépérissement, restent supérieures aux surfaces plantées. L'évolution du bocage entre 1996 et 2008 suivait toujours la même tendance avec une diminution moyenne de 1 % par an (AgrestBretagne-DRAAF, 2010).

L'axe 2 du projet ACASSYA, dans lequel cette thèse s'inscrit, a pour but de quantifier l'effet des zones tampons (tels que les réseaux bocagers) dans les paysages par la création d'outils de recherches agro-environnementales comme les modèles numériques. En effet l'impact de la haie sur la qualité des eaux doit se faire à une échelle cohérente qui est celle du bassin versant. La modélisation semble être l'outil le plus adapté pour l'étude des effets d'un réseau bocager sur le cycle de l'eau et de l'azote à cette échelle. Cependant, le suivi expérimental à une échelle plus locale semble indispensable pour calibrer et valider la modélisation. Les outils développés permettront d'envisager des stratégies de gestion du paysage afin de maximiser les valeurs apportées par les zones tampons.

L'objectif de la thèse a été plus précisément de modéliser et quantifier, à l'échelle du paysage, l'impact de la haie sur le cycle de l'eau et de l'azote en fonction de sa localisation sur le bassin versant et de sa gestion.

Ce manuscrit s'articule autour de cinq chapitres :

- Le premier chapitre présente les connaissances acquises au travers de nombreuses études sur les haies et réseaux bocagers et conclut par l'objectif de la thèse.
- Le second chapitre présente un cas d'étude sur l'impact des linéaires de haies sur le fonctionnement hydrologique d'un versant en fonction de leur position.
- Le troisième chapitre présente les modifications apportées au modèle TNT2 afin d'étudier l'impact d'un réseau bocager sur les transferts d'eau et de nitrate d'un bassin versant.
- Le quatrième chapitre présente l'application de ce modèle à l'étude de l'impact de la haie sur le bilan d'eau et d'azote d'un petit bassin versant.

- Le cinquième chapitre présente une amélioration apportée au modèle

# 1 Etat de l'art

De nombreuses études ont été effectuées sur la haie et les réseaux bocagers, tant au niveau de leur rôle en hydrologie, géochimie et pédologie. Dans ces différents domaines le bocage peut avoir une influence locale, à proximité directe des haies, ou bien une influence à l'échelle du paysage. Nous distinguerons dans ce chapitre les différentes influences de la haie, directes ou indirectes, observées à ces deux échelles.

## 1.1 Le bocage et son évolution

### 1.1.1 Définition du bocage et de la haie.

Le bocage et la haie font l'objet de nombreuses définitions selon que l'on s'intéresse à leurs structures, leurs histoires, ou leurs organisations sociales.

#### 1.1.1.1 *Le bocage*

Les définitions les plus anciennes du bocage l'associent au parcellaire agricole et mettent l'accent sur le rôle de limite ou d'enclos, tandis que les plus récentes associent le bocage à un type de paysage où il est qualifié par un réseau ou un système de haies.

Pour Meynier (1970), « Le bocage est le nom commun des régions agricoles de l'ouest de la France, où les parcelles et les champs sont enclos par des talus, des haies ou des rangées d'arbres marquant les limites de parcelles de tailles inégales et de formes différentes. »

Nous retiendrons pour la suite la définition suivante proposée par Baudry et Jouin (2003) : « Le bocage est un paysage ayant pour caractéristique la présence de réseaux de structures linéaires de végétaux ligneux, que ce soient des haies "traditionnelles", des rideaux brise vent récents ou des haies spontanées issues de l'absence d'entretien des clôtures ». Cette définition est large et fait consensus tant au niveau scientifique, chez les géographes, écologues, agronomes, que pour les populations habitant ces paysages. Le bocage est donc constitué de haies quelle que soit leur typologie.

#### 1.1.1.2 *La haie*

Les haies ne sont pas des éléments naturels mais sont façonnées par l'homme. Il existe donc une grande diversité de haies du fait de leurs fonctions attendues, de leur utilisation et de leur gestion. La haie présente également de nombreuses définitions qui diffèrent selon les questions abordées.

Pour Baudry et Jouin (2003) « une haie est un élément linéaire du paysage composé d'arbres et d'arbustes, et géré par l'homme ». Cette définition met l'accent sur la nécessité de gestion, cependant elle ne précise pas la continuité et la densité de la végétation ligneuse. Les haies peuvent présenter une grande diversité de morphologie du fait de pratiques et de gestions différentes. Les gestionnaires forestiers proposent de leur côté une définition plus précise et quantifiée de la haie, nécessaire pour les inventaires, et distinguant par là même les haies des bosquets et des arbres isolés. Pour L'IFN (Inventaire Forestier National), « La haie est une structure comportant des éléments boisés d'une largeur moyenne au plus égale à 10 mètres, de 25 mètres de longueur au minimum et comprenant au moins trois arbres inventoriés et au moins un arbre inventorable tous les 10 mètres ».

Pour notre étude, ces deux définitions sont pertinentes et complémentaires. L'effet des haies sur le cycle de l'eau et de l'azote est notamment fonction de la compétition souterraine et aérienne au sein d'une haie et avec les cultures voisines. Cette compétition est différente de celle qui existe dans un couvert forestier qui est une structure compacte ou pour un arbre isolé défini par une distance minimale entre deux arbres. On peut donc choisir une définition proche de celles énoncées précédemment soit : « La haie est définie comme une structure linéaire gérée par l'homme, d'une largeur moyenne au plus égale à 10 mètres et comportant au minimum trois arbres séparés au maximum de 10 mètres les uns des autres ».

### 1.1.2 Histoire du bocage.

L'origine du bocage remonte à la préhistoire d'après Meynier (1970), mais la grande majorité des haies est apparue plus récemment au Moyen Age et surtout au XIX<sup>e</sup> siècle. L'origine du bocage est très controversée. En Bretagne, par exemple, les recherches archéologiques menées sur les talus<sup>1</sup> montrent qu'ils ont été formés avec les déblais des fossés qui servaient à accentuer la capacité à piéger l'eau sur les sols imperméables (Bardel et al., 2008). Les talus non cultivés ont ensuite rapidement été colonisés par la végétation ligneuse qui a profité des conditions favorables du milieu spécifique que constitue le complexe talus/fossé. Au contraire les haies situées sur les ruptures de pentes constituent un piège pour les limons charriés par les eaux de ruissellement. Ces alluvions peuvent alors former un fort dénivelé entre la partie amont et aval et constituer ainsi un système de banquettes ou de «terrasses et rideaux» (Quine et al., 1999) après plusieurs décennies. Les haies peuvent également correspondre à des limites de défrichement de forêt (Forman and Baudry, 1984).

Ce qui singularise le bocage par rapport à d'autres formes d'occupation du sol réside dans la nécessité d'organiser l'espace agricole pour des productions diverses et morcelées de type polyculture et élevage. Le bocage étant une structure vivante qui associe l'homme et la nature dans un mouvement permanent (Bardel et al., 2008), la végétation s'est ensuite adaptée aux conditions préexistantes. Les arbres deviennent une production agricole parmi les autres, contrairement à d'autres formes du paysage où ils sont cantonnés dans des bois ou bosquets. Il s'agissait en fait d'une forme d'agroforesterie, d'autant plus que l'on trouvait associé au bocage, des vergers de pommiers extrêmement nombreux. Cette symbiose entre la haie et la parcelle se traduit par des modes de conduite et d'exploitation des haies différents selon les types de cultures associées.

Les paysages ruraux de l'Ouest de l'Europe, comme de nombreuses régions du monde sont structurés par des réseaux de haies qui entourent les parcelles agricoles. Ces réseaux de haies ont été en partie détruits du fait de l'intensification de l'agriculture et de l'augmentation de la taille des parcelles. Cependant, du fait des nombreux services écosystémiques rendus par les haies (voir §1.1.3), les politiques européennes et nationales favorisent leur réhabilitation. Les pratiques agricoles relatives à la replantation ont une dynamique d'évolution rapide dans l'ouest de la France, en Bretagne et en Normandie, ainsi que dans le Sud-Ouest. Elles représentent environ chaque année en France un linéaire de 1000 à 1500 kilomètres (Baudry and Jouin, 2003). Récemment le programme « Breizh Bocage » a été lancé dans le cadre du contrat de projet Etat région 2007–2013, pour préserver et renforcer le maillage bocager en Bretagne et réduire le transfert vers les eaux des

---

<sup>1</sup> Dans les régions de bocage un talus désigne un muret construit en mottes de terre et d'herbe armé ou non de pierre, délimitant en général une parcelle.

polluants d'origine agricole. Durant ce programme le linéaire de haies reconstruit en Bretagne est de 3000 km par an. Leur reconstruction impulse de nouvelles recherches.

### 1.1.3 Les fonctions et valeurs du bocage.

Les haies exercent des fonctions très diverses qui se traduisent par des valeurs en termes d'intérêt économique, social ou environnemental (Fustec et al., 2000). En effet les haies possèdent des valeurs tant écologiques au niveau du maintien de la biodiversité (Burel and Baudry, 2005), énergétiques par la production de bois de chauffe (Lotfi et al., 2010), climatologiques (haies brise-vent), hydrologiques en termes de limitation de l'érosion, du ruissellement (Merot et al., 2009), et de la pollution diffuse agricole (Caubel, 2001; Grimaldi et al., 2012), pédologiques pour leur action sur la teneur en carbone organique et la densité des sols (Follain et al., 2007; Walter et al., 2003), ainsi que sociales par leur intérêt paysager et patrimonial (Le Caro, 2001).

Une haie peut avoir plusieurs valeurs simultanément ou successivement. Elle peut à la fois jouer un rôle de limite de parcelle pour y spécifier les usages et avoir une valeur économique ou de production, elle peut à la fois avoir une valeur écologique et culturelle, etc. En revanche, certaines fonctions sont parfois difficilement compatibles entre elles. Par exemple, la fonction de production de bois d'une haie réduit sa fonction d'habitat pour certaines espèces. De même, une haie brise-vent est peu compatible avec la production de bois. Les haies, selon les fonctions qu'elles exercent, sont gérées différemment.

Le rôle hydrologique et géochimique des haies est étudié depuis une dizaine d'années en Bretagne région où les réseaux de haies font partie du paysage rural (Caubel, 2001; Follain, 2005; Ghazavi, 2008; Viaud, 2004). Ces études ont montré que les haies possèdent un effet tampon qui se traduit par un abattement des flux ou des concentrations et / ou par une diminution de la variabilité des flux et des concentrations selon la densité du bocage (Viaud et al., 2001).

### 1.1.4 Les pratiques de gestion des haies.

Thenail et Baudry (2004) distinguent trois types de pratiques agricoles qui sont l'entretien, la production et l'aménagement. Les pratiques d'entretien « ont pour objet de maintenir en l'état les éléments du territoire de l'exploitation ». Pour la haie, elles correspondent par exemple au débroussaillage ou à la taille de branches. Les pratiques de production « sont réalisées pour mettre en place et conduire des cultures, prairies, dans l'objectif de la réalisation d'une ou plusieurs productions », et correspondent à l'émondage pour la production de bois de chauffe ou à la production de fourrage et fruits. Les pratiques d'aménagement « ont pour objet de modifier la structure des éléments pour en modifier les modes de gestion, voire la fonction » et correspondent par exemple à l'arasement ou à la plantation d'une haie sur une parcelle.

Les pratiques agricoles associées aux haies sont nombreuses. Les pratiques qui engendrent les plus grandes modifications de structures des haies et des bocages sont :

- L'arasement et la plantation qui consiste à supprimer ou à former une haie.
- L'émonde consiste à couper les branches latérale des arbres sur toute la longueur du tronc, y compris la tête pour produire du bois de chauffage (type de taille dite en « ragoisse » en Ille et Vilaine). La fréquence de coupe pouvait être de 6 à 9 ans pour le chêne (Bazin et al., 1995), mais aujourd'hui elle est devenu très variable et s'effectue entre 6 et 20 ans (Baudry and Jouin, 2003). Pour les arbres à croissance plus rapide comme le châtaignier la fréquence de

## 1.1 Le bocage et son évolution

coupe est plus forte soit de 3 à 6 ans. Cependant depuis les années 50 cette règle n'est plus vraiment valide car on peut trouver des haies qui n'ont pas été émondées depuis une trentaine d'années et d'autres dont les coupes ont été rapprochées, notamment lorsque les arbres gênent les cultures (Javelle, 2007; Lotfi, 2008).

- La taille en cépée qui consiste à couper l'arbre au ras du sol ou en laissant la souche afin qu'il repousse en formant de nouveaux brins sur celle-ci. En Bretagne ce sont essentiellement le châtaignier et le noisetier qui sont taillés en cépée (Lotfi, 2008). La fréquence de ce type de taille est d'environ 6 ans (Bazin et al., 1995).
- La taille de haut jet qui consiste à couper les branches latérales au ras du tronc jusqu'au houppier de l'arbre afin de produire du bois de qualité (bois d'œuvre). Ce type de traitement est également courant en Bretagne.



Figure 1.1 – Illustration de différents types de pratiques effectuées sur les haies : en haut à gauche, haie d'arbres émondés ; en haut à droite, arbres de haut jet ; au centre à gauche, haie élaguée de manière asymétrique ; au centre à droite, haie de cépée ou de taillis ; en bas, haie nouvellement plantée (Vannier, 2011).

Actuellement les modalités de taille dépendent de l'usage des parcelles : haie dense et continue en bordure de pâture pour la protection des animaux contre le vent et le soleil ou la pluie, haie émondée fréquemment en bordure de culture. Cela peut amener des tailles dissymétriques lorsque l'occupation du sol est différente de part et d'autre de la haie.

## 1.2 Fonctionnement biophysique de l'arbre

### 1.2.1 Le système racinaire

Le système racinaire des arbres est composé de racines principales qui partent du tronc, se ramifient en s'amincissant jusqu'à devenir des radicelles (racines très fines) garnies de poils. C'est par les radicelles que l'eau et les nutriments sont prélevés.

Perret et al (1996) et Alegre et Rao (1996) ont mesuré que la densité racinaire diminue avec la distance à la haie et avec la profondeur. Une étude bibliographique menée par Canadell et al. (1996) a montré que la profondeur maximale de l'enracinement d'arbres en forêt de feuillus se situait entre 2 et 4 m de profondeur selon les espèces. La description du système racinaire d'un chêne pédonculé par Lucot et Bruckert (1992) en condition édaphique non contraignante montre une profondeur d'enracinement jusqu'à plus de 4 m.

Le système racinaire d'un arbre peut cependant avoir des formes variées. Des études expérimentales montrent que la croissance racinaire est influencée par hydrotropisme (Takahashi and Scott, 1993; Takano et al., 1995), c'est-à-dire que la direction de croissance des racines est influencée par la teneur en eau du sol. Plusieurs études ont montré que les plantes situées sur une surface en pente possèdent un système racinaire asymétrique (Chiatante et al., 2001). L'asymétrie du système racinaire est due à l'effet combiné de l'hydrotropisme racinaire et du flux d'eau sur un versant incliné (Tsutsumi et al., 2005). En Bretagne, Ghazavi (2008) a mesuré sur une haie de bas de versant que la densité et la profondeur du système racinaire de chênes pédonculés étaient plus importantes en amont (76 %) qu'en aval (23 %) de la haie avec 63% des racines présentes en surface (10 à 50 cm de profondeur) jusqu'à 8 m en amont de la haie et de 91% à 99% jusqu'à 8 m et plus à l'aval de la haie. Pour cette haie 90% des racines sont présentes dans les cents premiers centimètres. Caubel (2001), qui a également étudié une haie de chênes pédonculés de ceinture de fond de vallée, a observé une structure similaire avec des racines essentiellement développées en amont de la haie à une profondeur de 80 cm et au moins jusqu'à 10 m de la haie. Tsutsumi et al (2005) montrent par modélisation que cette asymétrie est d'autant plus importante que l'arbre se situe en bas de versant.

Imada et al. (2008) montrent que le système racinaire de jeunes peupliers est affecté par la profondeur de la nappe et que le développement de racines fines est inhibé sous le toit de la nappe. A proximité de zone humide, la densité racinaire est très importante en surface (Nambiar and Sands, 1992; Sudmeyer et al., 2004). En bordure de zone humide, la présence de la nappe une grande partie de l'année près de la surface est peu favorable au développement du système racinaire. Pour les haies situées à ce niveau du versant, cela peut également expliquer l'observation d'une dissymétrie du système racinaire (Caubel, 2001).

La résistance mécanique du sol au développement des racines peut également avoir un effet sur la distribution du système racinaire (Tsutsumi et al 2005). Caubel (2001) suggère que la présence d'une discontinuité structurale (horizon compact à faible profondeur) peut également expliquer la présence d'une asymétrie du système racinaire.

### 1.2.2 Evapotranspiration

#### 1.2.2.1 Définition

L'évapotranspiration est un processus qui correspond à l'évaporation de surfaces physiques (sol, eau libre, végétation mouillée) et à la transpiration des plantes (Saugier, 1996). Elle s'exprime généralement en millimètre, correspondant à la hauteur de la lame d'eau.

La transpiration permet de véhiculer l'eau par la sève brute, depuis les racines jusqu'aux parties les plus élevées de l'arbre. 90% de l'eau extraite du sol s'évapore par les stomates, en laissant sur place divers minéraux nécessaires pour le développement de l'arbre. Cette transpiration crée une dépression dans les vaisseaux qui véhiculent la sève, créant ainsi un effet de succion dans les racines. La transpiration est fonction du climat, de la physiologie des plantes et de la teneur en eau du sol. De plus, récemment, dans le cadre des études sur le changement climatique, il a été montré (Brisson, 2010) que la transpiration était sensible à la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. L'arbre transpire moins lorsque la concentration en CO<sub>2</sub> augmente du fait d'une diminution de l'ouverture des stomates. Ce point ne sera pas repris ici.

L'influence des conditions climatiques locales ou « demande climatique » sur la végétation, s'exprime grâce à l'évapotranspiration potentielle (ETP) ou évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>). L'ET<sub>0</sub> correspond à l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration par unité de temps d'une végétation herbacée rase, recouvrant complètement le sol, de hauteur uniforme et bien alimentée en eau (Hillel, 1980). Elle est principalement fonction du rayonnement solaire, de la température, de la vitesse du vent et de l'humidité de l'air. Elle est donnée par l'équation de Penman-Monteith (1965) suivante :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 D}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

Avec

R<sub>n</sub> le rayonnement net à la surface de la végétation (mm.j<sup>-1</sup>)

G la densité de flux de chaleur du sol (MJ.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>)

T la température moyenne à 2 m de hauteur (°C)

U<sub>2</sub> la vitesse du vent à 2 m de hauteur (m.s<sup>-1</sup>)

D le déficit de saturation de l'air (kPa)

Δ la dérivée de la pression de vapeur saturante par rapport à la température (kPa °C<sup>-1</sup>)

γ la constante psychrométrique (kPa.°C<sup>-1</sup>)

L'ET<sub>0</sub> est donc une mesure qui s'applique à un couvert végétal standard.

L'évapotranspiration maximale (ETM) d'une plante est définie à différents stades de son développement végétatif, lorsque l'eau est en quantité suffisante. Elle est égale à K<sub>c</sub> × ET<sub>0</sub>, où K<sub>c</sub> correspond au coefficient cultural de la plante et traduit la résistance spécifique aux échanges d'eau avec l'atmosphère d'un couvert considéré. L'ETM (mm) d'une plante est donc atteinte lorsque sa transpiration n'est pas limitée par la teneur en eau du sol et croît jusqu'à une valeur limite lorsque son LAI<sup>2</sup> est maximal. En effet plus le LAI est important et plus la conductance stomatique augmente

---

<sup>2</sup> "Leaf Area Index" surface des feuilles par unité de surface au sol.

(Granier et al., 2000). C'est d'ailleurs la surface foliaire plus que l'espèce qui détermine la transpiration des couverts végétaux fermés comme les forêts.

Enfin l'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à l'évapotranspiration effective dans les conditions d'humidité réelles du sol (qui sont d'autant plus limitantes que le sol est plus sec). Elle peut empiriquement être estimée par  $K_s \times ETM$ , où  $K_s$  est un coefficient compris entre 0 et 1 qui correspond à l'effet relatif du potentiel hydrique du sol sur son évaporation et sur la transpiration de la plante.

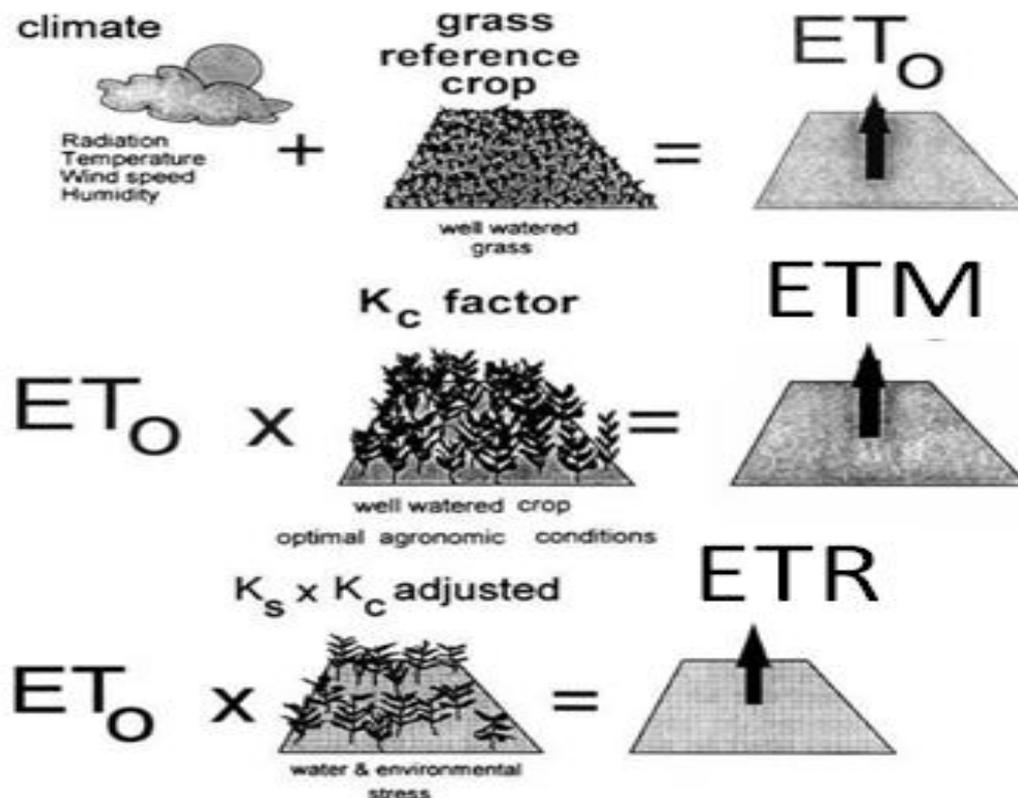


Figure 1.2 – Les différentes notions d'évapotranspiration ([http://www.fao.org/index\\_fr.htm](http://www.fao.org/index_fr.htm))

### 1.2.2.2 La transpiration des arbres

Il est maintenant admis que les arbres transpirent plus que les autres plantes que ce soit dans le contexte forestier (Aussenac and Levy, 1983; Zhang et al., 2001), agroforestier (De Montard et al., 1998; Eastham et al., 1990), dans le cas d'une haie de bas de versant (Ryszkowski and Kedziora, 2007; Thomas et al., 2012) ou dans le cas d'arbres isolés (Pereira et al., 2006). Par exemple Kozłowski et Pallardy (Kozłowski and Pallardy, 1997), estiment que L'ETR de la prairie représente 80 à 90 % de la transpiration d'une forêt en condition humide et 60 à 70 % en condition plus sèche. Ces différences entre forêt et autres couverts sont surtout marquées dans les sols profonds sans horizon pédologique limitant la progression des racines, et dans des climats présentant une période de déficit hydrique (ETM-ETR) et une période pluvieuse permettant la réhumectation des sols et la reconstitution des réserves en eau.

Plusieurs facteurs expliquent la plus grande transpiration des arbres. Premièrement, la relation entre l'ETP et l'ETM est modifiée pour un arbre. En effet il y a une augmentation de la turbulence de l'air

dans la canopée liée à la rugosité de la végétation qui favorise les échanges atmosphériques (Ryszkowski and Kedziora, 1993; Taylor et al., 2001), les arbres possèdent une plus grande exposition à la lumière (Guyot, 1997) et leur albédo est plus faible que celui des couverts herbacés (Cosandey, 2001 dans (Viaud, 2004)). De plus leur enracinement plus développé leur permet d'extraire l'eau du sol à des profondeurs plus importantes (Canadell et al., 1996) et certaines espèces d'arbres possèdent une meilleure résistance au stress en eau (Breda et al., 1993).

En condition d'humidité du sol non limitante, Pereira et al. (2006) ont mesuré que le flux de sève d'un arbre isolé était proportionnel à sa surface foliaire selon l'équation suivante :

$$FS = ET_0 \times LA / 2.88$$

Avec "FS" le flux de sève (L) et "LA" la surface foliaire (m<sup>2</sup>).

La transpiration peut ensuite être exprimée à partir de FS par projection du houppier au sol (Cermak et al., 2000; David et al., 2004). Cependant Crosbie et al. (2007) estiment que cette méthode surestime la transpiration de l'arbre par unité de surface et préfèrent utiliser pour la haie la notion de largeur effective qui prend en compte les racines qui s'étendent au-delà de la canopée. Landsberg (1999) et Sudmeyer (2002) utilisent une fonction exponentielle négative pour représenter l'évolution latérale de la densité des racines (RLD) à partir de l'axe de la haie. Cette fonction est de la forme :

$$RLD_d = a^{-bd}$$

Où "a" et "b" sont des paramètres d'ajustement et "d" la distance à l'axe de la haie.

Crosbie et al (2007) utilisent cette relation et montrent que la largeur effective correspond à :

$$L_{eff} = L_c + 2 / b$$

Où  $L_{eff}$  est la largeur effective et  $L_c$  la largeur de la canopée.

### 1.2.2.3 Rôle de l'humidité du sol

Ghazavi (2008) a mesuré la transpiration d'une haie de bas de versant en Bretagne en utilisant cette dernière méthode. Il trouve que le rapport ETR/ETP (soit  $K_c \times K_s$ ) des arbres de la haie, établie mensuellement, varie en fonction des mois et en fonction de la pluviométrie de l'année hydrologique. Au cours d'une année sèche ce rapport était compris entre 0,07 et 0,56 pour cette étude (soit une ETR mensuelle comprise entre 8 et 75 mm), la transpiration étant toujours inférieure à l'ETP. Durant une année humide il était compris entre 0,28 et 1,72 (soit une ETR mensuelle comprise entre 22 et 135 mm), la transpiration réelle étant supérieure à l'ETP en mai et en juin. L'étude d'un grand nombre de peuplements forestiers en climat tempéré montre que le rapport ETR/ETP varie de 0.67 à 1.28 pendant la période de végétation (Humbert and Najjar, 1992). Cette variabilité est due à plusieurs facteurs mais est fortement liée à la quantité d'eau disponible dans le sol.

La proximité de la nappe, qui peut être assimilée à la position de la haie dans le versant (Annexe 6), a son importance sur la transpiration. L'augmentation de la transpiration peut être favorisée par un prélèvement direct dans la nappe ainsi que par les remontées capillaires (Zencich et al., 2002). En

Australie, Crosbie et al. (2007) ont mesuré la transpiration d'arbres de haies situées en bas et en haut d'un versant. Sur 18 mois de mesure la transpiration de la haie de haut versant était de 538 mm contre 1391 en bas de versant. En haut de versant la transpiration de la haie était équivalente à la transpiration de la prairie, tandis qu'en bas de versant l'évapotranspiration de la haie était équivalente à l'ETP à cause de la présence de la nappe. Dans les bassins versants bretons, pendant la période de végétation la nappe en amont des versants est située à grande profondeur au contraire de la situation de bas de versant où elle est plus accessible aux racines (Viaud, 2004). Par contre, des fluctuations du toit de la nappe dans la zone racinaire peuvent avoir une influence inverse sur la transpiration des arbres. Nicolas et al. (2005) montrent que la transpiration de jeunes abricotiers diminuait après l'engorgement total du système racinaire. Cependant cet effet de l'engorgement du système racinaire sur la transpiration des arbres dépend de l'essence et de leur sensibilité à ce type de stress (Kreuzwieser et al., 2002).

La position de l'arbre dans le versant a un effet variable sur sa transpiration selon la localisation sur le bassin versant. Techer (2009), à partir de l'analyse des variations de la teneur en eau du sol au voisinage de 15 haies situées à différentes positions sur la versant, a mesuré que le dessèchement des sols au voisinage des haies est d'autant plus important que le versant drainé est long et que l'ordre du cours d'eau est faible. Ceci est lié à la dynamique propre de l'humidité des sols en fonction de l'ordre du cours d'eau dans lequel ils se situent comme l'a montré Mourier et al. (2008). Ces auteurs ont montré que l'intégration du paramètre « ordre du cours d'eau » améliorerait grandement la modélisation de la distribution spatiale des sols saturés en eau sur de grandes surfaces.

#### 1.2.2.4 Rôle de la physiologie de l'arbre

L'âge d'un arbre peut également déterminer sa capacité de transpiration. Le flux de sève mesuré par Ghazavi (2008) sur un chêne pédonculé de bas de versant peut atteindre  $50 \text{ L.j}^{-1}$  pour un arbre de 145 cm de diamètre et  $230 \text{ L.j}^{-1}$  pour un arbre de 245 cm. Ces résultats rejoignent ceux de Techer (2009) qui montre une tendance à l'augmentation de la variation de stock d'eau du sol en fonction de la taille du tronc des arbres étudiés, sauf pour les arbres taillés en ragsosse (arbre élancé dont on émonde périodiquement toutes les branches).

L'émondage d'un arbre peut avoir des conséquences importantes sur sa phénologie et sa capacité à prélever l'eau et les nutriments du sol. Namirembe et al. (2009) étudient l'effet de l'émondage d'une haie de *Senna spectabilis* sur la phénologie des feuilles, l'anatomie du bois et la densité de flux de sève. En comparant une rangée d'arbres non émondés et une haie d'arbres émondés 4 fois par an, ils observent des valeurs de surface foliaire plus faibles, une multiplication des rameaux et une diminution de la taille des vaisseaux de xylème (conductivité faible) sur les arbres émondés. La transpiration d'arbres émondés est réduite de manière significative, la densité de flux maximale y est 71% plus basse que pour les arbres non émondés. De nombreux auteurs (Bayala et al., 2004; Jones et al., 1998; Peter and Lehmann, 2000) observent une diminution de la densité racinaire par nécrose après élagage des arbres. Jones et al (1998) soulignent néanmoins que l'effet de l'élagage des arbres sur la compétitivité pour le prélèvement en eau varie en fonction des espèces.

#### 1.2.2.5 Rôle de l'hétérogénéité du paysage

Enfin, contrairement à un couvert forestier continu, l'hétérogénéité du paysage bocager peut augmenter l'énergie disponible pour la transpiration des arbres. En effet, dans les champs cultivés, la

proportion de radiation solaire convertie en chaleur est plus importante qu'au niveau des haies. De plus l'évapotranspiration au niveau de la canopée des arbres entraîne un effet de refroidissement. Ces deux processus provoquent un gradient de température entre la haie et les champs et prairies alentours. L'advection correspond aux flux de chaleurs horizontaux entre les parcelles et la haie. Ryszkowski et Kedziara (2007) ont mesuré que l'advection pouvait apporter jusqu'à 40 % d'énergie en plus pour l'évapotranspiration que les valeurs calculées par le bilan radiatif de la canopée. Les réseaux bocagers seraient donc associés à une évapotranspiration plus forte qu'une forêt à surfaces égales du fait de plus forts gradients de température (gradients latéraux assimilables à un effet d'oasis).

### 1.3 Influence locale de la haie sur l'organisation et le fonctionnement physique et chimique du sol

L'échelle locale est considérée ici par une zone qui s'étend à dix mètres de part et d'autre de la haie.

#### 1.3.1 Effet sur les propriétés physiques et chimiques des sols

La haie entraîne localement une modification des propriétés chimiques (Carnet, 1978; Caubel, 2001) et physiques du sol (Baffet, 1984; Dejong and Kowalchuk, 1995), qui dépend des conditions pédoclimatiques.

En climat tempéré, certains auteurs notent une acidité des sols plus marquée (Dejong and Kowalchuk, 1995), ainsi que des teneurs en éléments majeurs moins fortes sous la haie (Carnet, 1978; Caubel, 2001). Des modifications locales de la dynamique de la matière organique sous l'effet des conditions microclimatiques et des populations de microorganismes spécifiques à la haie, peuvent être invoquées également. La teneur en carbone organique du sol est plus forte sous la haie, due à une augmentation des restitutions carbonées (litière, produits d'élagage) et/ou à l'absence de travail du sol (Walter et al., 2003). Follain (Follain, 2005) a mesuré à proximité de la haie des rapports C/N et des stocks en carbone des sols à différentes profondeurs plus variables et supérieurs à ceux généralement constatés sous prairie. En surface l'intensité du rapport C/N semble être en relation avec la densité d'arbres.

De nombreux auteurs ont montré que la densité apparente diminuait à proximité de la haie (Alegre and Rao, 1996; Dejong and Kowalchuk, 1995; Kiepe, 1995). La densité apparente d'un sol correspond à sa masse sèche par unité de volume ( $\gamma$  compris les pores), rapportée à la masse volumique de l'eau. Cette diminution est entraînée par une augmentation de la macroporosité qui elle-même peut être liée à la présence de racines, à l'incorporation des produits d'élagage ou de litière, et à la présence d'invertébrés ingénieurs du sol (Follain et al., 2007; Perret et al., 1996). Cela entraîne une augmentation de l'infiltration et de la conductivité hydraulique à saturation (Agus et al., 1997; Kiepe, 1995). Cependant Caubel et al. (2003) n'ont pas observé d'effet de la haie sur la conductivité hydraulique à saturation. Agus et al. (1997) ont mesuré une augmentation de la réserve utile (RU) en amont de la haie. Au champ, la RU correspond ici au volume d'eau entre les potentiels de -30 et -1500 mbar (Cassel and Nielsen, 1986) pour différentes profondeurs. Cette augmentation de la RU est, pour les auteurs, liée à la structure du sol qui est plus aérée à l'amont de la haie.

### 1.3.2 Effet sur le bilan hydrique des sols

#### 1.3.2.1 L'interception

L'interception correspond à la partie des précipitations qui est retenue par la végétation et qui s'évapore n'atteignant ainsi jamais le sol. La surface de la végétation peut en effet constituer un réservoir d'eau qui possède une capacité de stockage. Lorsque ce réservoir est plein, l'eau de pluie finit par ruisseler le long des feuilles et du tronc. Pour une même lame d'eau journalière, l'interception sera d'autant plus importante que les précipitations sont courtes et de faible intensité, laissant ainsi le temps au réservoir de se vider par évaporation (Ghazavi et al., 2008). La capacité de ce réservoir dépend du LAI, et de façon moins importante de l'architecture des rameaux du houppier. Pour les espèces feuillues, l'interception est fonction de l'état de la canopée et donc de la saison.

Pour les couverts forestiers en climat tempéré, cette interception a été estimée entre 20 et 40 % des précipitations (Granier, 1996). Ghazavi et al. (2008) ont mesuré l'interception des arbres d'une haie en plaçant des pluviomètres à différentes distances de celle-ci. Ces auteurs ont mesuré que l'interception est d'autant plus importante que l'on est proche de la haie et que les hauteurs d'eau des précipitations sont faibles. L'interception moyennée sur une largeur de 15 m était alors estimée à 28 % par événement pluvieux durant la période avec feuilles et de 12 % pour la période sans feuilles. L'interception est fonction du type d'essence. Dans une étude, elle a été estimée à 15 % pour un poirier de chine contre 27 % pour le chêne liège (Xiao et al., 2000). Cette différence s'explique par l'architecture de la canopée c'est-à-dire la taille et le diamètre du tronc, le LAI, l'orientation des branches, etc.

#### 1.3.2.2 L'humidité des sols

La haie a une influence plus grande sur la teneur en eau à son voisinage que d'autres types de couvert végétal. Caubel et al. (2003) ont observé que les haies de fond de vallée entraînaient des variations saisonnières plus importantes de la teneur en eau du sol et du niveau de la nappe qu'un couvert herbacé. Sur 1,6 m de profondeur ils mesurent un déficit hydrique estival supérieur de 100 mm à proximité de la haie, comparé à un site éloigné de la haie. L'assèchement des sols est plus lent mais plus prononcé. La relative lenteur du phénomène s'explique par l'ombrage créé par la haie, et son intensité par la transpiration des arbres (Carnet, 1978). Les variations de la teneur en eau sont fonction de l'année hydrologique (plus ou moins humide). En effet elles sont plus importantes lors d'années sèches à forte demande climatique.

La répartition du prélèvement en eau du sol dépend en partie de la densité des racines fines. Les arbres utilisent préférentiellement l'eau des horizons superficiels, où la densité racinaire est la plus forte. Les racines des horizons plus profonds jouent un rôle important pendant les périodes de déficit hydrique (Rambal, 1984). En effet Breda et al (1995a) ont montré que la distribution du prélèvement en eau d'un peuplement de chênes varie entre les différents horizons en fonction de leur état hydrique. Plus une année est sèche et plus les prélèvements sont profonds. Pour cette étude, 97 % de la variation de stock en eau à proximité d'une haie de bas de versant était localisé dans les cents premiers centimètres durant une année humide, tandis que les prélèvements dans cette zone chutaient à 73 % durant une année sèche, du fait de prélèvements dans les horizons plus profonds.

La géométrie du système racinaire a également une grande influence sur la distribution du prélèvement en eau. De nombreuses études montrent que l'assèchement du sol se manifeste essentiellement à l'amont de par la dissymétrie du système racinaire (Smucker and Aiken, 1992; Tardieu et al., 1992). L'influence de la haie sur le dessèchement du sol peut s'étendre jusqu'à 20 m à l'amont de la haie et 10 m à l'aval (Ghazavi, 2008). Durant la période de transpiration des arbres, lorsque l'ETR est supérieure aux précipitations nettes (pluie – interception), les remontées capillaires en zone de bas fond tamponnent le dessèchement du sol. Les remontées capillaires augmentent avec la proximité de la haie, à partir de 9 m à l'amont de l'axe de la haie et de 6 m à l'aval. Ghazavi (2008) a calculé que la différence entre la remontée capillaire sous une haie de bas de versant (entre 0 et 4 m à l'amont) et loin de la haie (entre 8 et 16 m à l'amont) atteignait 217 mm dans les conditions de l'étude.

Le dessèchement du sol plus prononcé au voisinage de la haie en période estivale couplé à l'interception, induit un retard à la saturation du sol à l'automne (Caubel, 2001). Sur les versants à sols moyennement différenciés, les sols situés en amont de la haie se réhumectent plus vite que le sol à l'aval car la haie et le talus jouent un rôle de barrage aux apports par ruissellement (Carnet, 1978). Ghazavi (2008) observe un retard à la réhumectation du sol à la fin de l'automne dans la zone où la densité racinaire était la plus importante : le minimum du potentiel total est observé pour les points situés à 1 m et 4 m en amont de la haie, à des profondeurs de 50 et 100 cm. Caubel (2001) a montré que le retard à la saturation des sols en amont d'une haie de bas fond dû à la plus forte transpiration des arbres était d'environ 1 mois et demi pour chacune des deux années étudiées. Lors de la reprise des écoulements, le système racinaire des haies peut aussi jouer le rôle de drains verticaux qui limitent la saturation des sols sous la haie.

Par ailleurs des études ont mis en évidence des redistributions de l'eau des couches de sol à potentiel matriciel différent par l'intermédiaire du système racinaire (Burgess et al., 1998).

### 1.3.3 Effet sur la nappe

En cas de déficit hydrique du sol, la haie peut prélever l'eau de la nappe si elle y a accès ou si les remontées capillaires sont suffisantes (White et al., 2002). La part de l'évapotranspiration des arbres correspondant à l'eau prélevée dans la nappe, dépend de la profondeur de la nappe et de l'ETR qui intègre les conditions climatiques. Cette part augmente lorsque les températures sont plus chaudes et que le niveau de la nappe est superficiel (Ryszkowski and Kedziora, 2007). Lorsque l'ETP est forte le prélèvement dans la nappe d'une haie de bas de versant peut approcher les 50 % de l'évapotranspiration (Crosbie et al., 2007; Ghazavi, 2008).

### 1.3.4 Effet sur le bilan d'azote

Les arbres, comme tous les êtres vivants, ont des besoins pour vivre et se développer. Ils élaborent leur matière et leurs réserves énergétiques à partir d'éléments organo-minéraux et d'eau puisés dans le sol et l'atmosphère. L'azote (sous forme de nitrate et d'ammonium) est absorbé dans le sol par les racelles et transporté dans toutes les parties de l'arbre. A l'automne, lors de la chute des feuilles une partie de l'azote prélevé durant l'année est restituée au sol tandis que l'autre est stockée dans les tissus de l'arbre. Localement, de par le prélèvement et la restitution de l'azote du sol, les arbres ont un impact direct sur le bilan d'azote.

#### **1.3.4.1 Prélèvement de l'azote par les arbres**

Robinson (1986) indique que l'absorption en azote d'une plante en conditions du milieu non limitantes dépend de facteurs endogènes (vitesse d'absorption des nitrates par les racines). Dans les autres conditions, elle dépend aussi de l'azote disponible dans le milieu. Quelques ordres de grandeur de prélèvement de nitrate sont donnés dans la littérature. Peterjohn et Corell (1984) ont évalué le prélèvement net du nitrate de la biomasse d'une forêt riparienne à  $15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ , et Lowrance et al (1984) à  $52 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ . Haynes (1986) estime ce prélèvement à  $70 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  pour une forêt de feuillus, 65 pour une prairie naturelle, 160 pour du maïs et 190 pour du blé. En Bretagne une prairie (ray grass anglais) fertilisée avec  $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  exporte 200 à  $220 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  d'azote (Barré, 2001). Ryszkowski et Kedziora (2007) présumant que si l'absorption de nitrate est proportionnelle aux taux de prélèvement en eau d'une haie, alors les conditions pour les haies limitant le plus les pertes en nitrate d'un bassin versant sont une forte ETP et une nappe superficielle. Cependant pour des arbres sensibles à l'engorgement du système racinaire par la nappe, le prélèvement en nitrate peut être affecté (Kreuzwieser et al., 2002).

#### **1.3.4.2 Restitution de l'azote par les arbres**

Les restitutions concernent à la fois les parties aériennes et les parties souterraines de l'arbre. Mette et Sattelmacher (1994) ont mesuré que la teneur en azote au pied d'une haie bordant un champ cultivé était nettement plus importante que celle mesurée à 10 m, soit  $9 \text{ t N} \cdot \text{ha}^{-1}$  contre  $5 \text{ t N} \cdot \text{ha}^{-1}$  dans l'horizon 0-40 cm. Cette valeur est attribuée à l'effet de la litière de feuilles sous la haie qui apportent jusqu'à  $69 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

#### **1.3.4.3 Décomposition de la matière organique**

La décomposition des résidus de culture est réalisée par un grand nombre de microorganismes, bactéries et champignons. La faune du sol contribue aussi à la fragmentation et à l'hydrolyse de certains composés. La part et l'intensité de ces différents processus de décomposition dépendent de nombreux facteurs dont notamment le rapport C/N de la matière organique, l'humidité et le pH du sol (Haynes, 1986). Pour un rapport C/N élevé la minéralisation de l'azote est plus lente, l'humidité du sol favorise le développement des microorganismes et donc la minéralisation, tandis que les faibles pH la ralentit. L'arbre a une influence sur ces différents paramètres et donc de manière indirecte sur la décomposition des résidus et sur la minéralisation de l'azote. Dans une zone riparienne, Clément (2001) a montré que la décomposition de la litière sous forêt est plus lente que pour une prairie ou une friche : 4,5 % des apports d'azote par la litière sont minéralisés dans l'année pour la forêt contre 15 % pour les deux autres couverts.

#### **1.3.4.4 Bilan de l'azote entre prélèvement et restitution**

Le prélèvement en nutriments par les arbres et la restitution par la litière diminuent les pertes absolues du sol (Ranger et al., 1995), la différence entre les deux flux étant ce qui est immobilisé par les tissus de l'arbre. Par ailleurs le prélèvement a lieu sur une profondeur de sol pouvant être importante alors que la restitution se fait en surface, d'où une redistribution et une remise en circulation de l'azote pour les végétaux.

### 1.3 Influence locale de la haie sur l'organisation et le fonctionnement physique et chimique du sol

En forêt, à l'échelle annuelle, le bilan entre le prélèvement et la restitution est légèrement négatif. La présence d'arbre conduit à un stockage de carbone et d'azote dans la matière organique du sol et à plus long terme dans la biomasse des parties pérennes de la végétation. Ce dernier terme dépend de la croissance potentielle de l'arbre.

Le Tableau 1.1 rassemble diverses observations sur les valeurs d'absorption en azote par la végétation ligneuse en zone tampon riparienne.

Espèces	Age	Prélèvement brut (gN.m <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )	Prélèvement net (gN.m <sup>-2</sup> .an <sup>-1</sup> )	Restitution (%)	Source
Hêtre d'Europe	mature	5,0	1,0	80	(Ducnuigeen et al., 1997)
Hêtre d'Europe	-	4,5	1,6	64	(Ducnuigeen et al., 1997)
Hêtre d'Europe	10	4,5	1	77	(Ducnuigeen et al., 1997)
Hêtre d'Europe	25	4,9	1,75	64	(Ducnuigeen et al., 1997)
Hêtre d'Europe	100	4,1	1	76	(Ducnuigeen et al., 1997)
Chêne angl Hêtre Europe	70-75	9,1	3	77	(Ducnuigeen et al., 1997)
Chêne angl Frêne Europe	115-160	12,3	4,4	63	(Ducnuigeen et al., 1997)
Chênes mélangés	80	7,9	-	-	(Cole and Rapp, 1981)
Forêt riparienne (Bretagne)	-	-	-	40	(Clément, 2001)
Frênaie – chênaie – tillaie alluviale (Europe centrale).	-	22,4	10,75	48	(Penka et al., 1985)

Tableau 1.1 - Absorption et restitution d'azote par des arbres en zone riparienne.

Des mesures de concentrations en azote des feuilles de noyer ont montré des valeurs plus fortes en système agroforestier qu'en parcelle forestière (Dupraz et al., 1999). Cela est attribué à l'apport d'engrais sur les cultures associées qui est en partie lixivié<sup>3</sup> et récupéré par les racines des arbres, plus profondes.

#### 1.3.4.5 Effet sur la dénitrification hétérotrophe

Les interactions biologiques jouent un rôle important dans le potentiel de contrôle de la pollution de l'eau (Ryszkowski and Kedziora, 2007). La dénitrification est la transformation des nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en protoxyde d'azote (NO), oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) et di-azote (N<sub>2</sub>). Cette réaction peut être catalysée par les êtres vivants, on parle alors de dénitrification biologique. La dénitrification hétérotrophe est réalisée par des bactéries hétérotrophes, c'est-à-dire dont le carbone cellulaire est d'origine organique.

<sup>3</sup> Qui est soumis à la lixiviation, processus d'entraînement en profondeur d'ions solubles tels que les nitrates.

L'intensité de la dénitrification hétérotrophe augmente avec la disponibilité en carbone et l'augmentation de la teneur en matière organique peut promouvoir la dénitrification (Addy et al., 1999). La vitesse de dénitrification peut être contrôlée par la vitesse de minéralisation du carbone disponible (Reddy et al., 1982) car c'est la biodisponibilité plus que l'abondance du carbone qui est importante.

La dénitrification ne se réalise que lorsque l'oxygène a été entièrement consommé. Les bactéries dénitrifiantes utilisent alors le nitrate comme accepteur terminal d'électrons, au lieu de l'oxygène. La teneur en eau du sol et son taux de renouvellement a donc une influence sur la dénitrification. La relation entre la dénitrification et la teneur en humidité relative d'un sol est de type exponentiel (Henault and Germon, 2000).

Le pH optimal pour la dénitrification potentielle est compris entre 7 et 8 (Simek and Cooper, 2002). Le pH a un effet direct sur l'activité microbienne, et en particulier sur l'activité dénitrifiante. Son intensité diminue fortement à pH acide (Firestone, 1982).

Les arbres ayant une influence sur la disponibilité du carbone, l'humidité et le pH des sols, ils modulent donc de manière indirecte la dénitrification.

#### *1.3.4.6 Effet sur l'azote de la nappe.*

En forêts ripariennes, Jordan et al (1993) et Sanchez-Perez et al (1999) ont mesuré des abattements de la teneur en nitrate de la nappe de 95 % soit  $140 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ , qu'ils attribuent à la fois au prélèvement par la végétation et à la dénitrification. Haycock et Pinay (1993) ont mesuré un abattement de 99% dans une zone humide avec des peupliers.

Au voisinage d'une haie de bas fond, des teneurs en nitrate proches de zéro ont été mesurées dans la nappe contre  $38 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{ N-NO}_3^-$  dans la parcelle adjacente (Bartoszewicz et Ryszkowski 1989, dans (Ryszkowski et al., 1999)) . Franco et al (1996) mesurent un abattement moyen de 50 % de la concentration en nitrate dans les eaux de nappe et de 80 % dans les eaux de ruissellement. L'abattement présente des variations saisonnières avec un maximum l'été. En Bretagne, Caubel et al. (2003) mesurent l'influence de la haie sur la dynamique du nitrate. Au printemps elle se manifeste par une disparition quasi totale du nitrate dans les cinq mètres bordant la haie en amont. Grimaldi et al. (2012) ont également montré un fort abattement des concentrations en nitrate dans la nappe au voisinage d'une haie de ceinture de fond de vallée. Cet abattement est attribué au prélèvement par les arbres ou à la dénitrification hétérotrophe dans la nappe.

Les parts respectives entre prélèvement et dénitrification dans l'abattement en nitrates sont souvent difficilement quantifiables. Mais en hiver la disparition du nitrate lorsque la nappe rejoint la zone racinaire est essentiellement due à la dénitrification favorisée par une plus grande richesse en carbone organique (Grimaldi et al., 2012). En effet, Smith et Tidje (1979) ont mesuré des vitesses de dénitrification plus importantes dans la rhizosphère des arbres. Cependant, en automne le retard à la saturation des sols à proximité de la haie pourrait avoir une influence sur le taux de dénitrification (Caubel, 2001).

Les haies de bas de versant diminuent la teneur en nitrate de la nappe par prélèvement racinaire mais augmentent la teneur en ammonium dû à la décomposition des résidus (Ryszkowski and Kedziora, 2007). Cependant rapportée à l'azote, l'augmentation des concentrations en ammonium

est plus faible que la diminution des concentrations en nitrate. Les concentrations d'ammonium mesurées par Ryszkowski et Kedziora (2007) dans le sol en comparaison au taux de lixiviation de ce composé indiquent qu'il est consommé par les arbres et microorganismes.

La dénitrification étant dépendante de la présence de nitrate, Robertson et al (2000) ont mesuré que le flux de  $N_2O$  était plus faible sous une culture de peuplier que sous un champ cultivé où une fertilisation était appliquée. L'azote étant plutôt sous forme d'ammonium à proximité des arbres dû à la décomposition des résidus ; cela explique les plus faibles dégagements de  $N_2O$  (Ryszkowski and Kedziora, 2007).

### 1.4 Influence à l'échelle du paysage

#### 1.4.1 Effet sur le bilan hydrique

##### 1.4.1.1 Rôle sur le ruissellement

On distingue deux types de ruissellements. Le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration ou « ruissellement hortonien » (Horton and Hart, 1998) et le ruissellement sur surface saturée en eau (Kirkby and Chorley, 1988) qui se produit essentiellement en bas de versant. Les haies diminuent le ruissellement hortonien car elles jouent un rôle de barrière physique sur les écoulements et favorisent l'infiltration sur leur partie amont. De plus, lorsqu'elles sont situées à l'interface de la zone de fond de vallée et du versant bien drainé, elles jouent un rôle sur le second type de ruissellement en limitant l'extension des zones saturées en eau (Merot and Bruneau, 1993). Dans le bassin versant de Venise, Franco et al. (1996) estiment que les haies plantées selon les courbes de niveau entraînent un abattement de 60 % des quantités d'eau ruisselées et de 75 % du flux de phosphore total ruisselé (dans le cadre de la protection de la lagune de Venise).

Dans des conditions pédoclimatiques extrêmes, le rôle des haies est déterminant : au Pérou, sur des pentes de 15 à 20 %, et sur des sols fragiles Alegre et Rao (1996) ont mesuré qu'un système de haies basses rapprochées (contour farming and hedgerow intercropping) retenait 287 mm d'eau par an, ce qui correspond à 83 % des pertes en eau du ruissellement comparées à une culture sur sol nu.

##### 1.4.1.2 Rôle sur l'évapotranspiration

L'effet d'un réseau bocager sur l'évapotranspiration d'un bassin versant n'est pas clairement établi. Guyot (1997) considère que l'évapotranspiration totale de l'ensemble haie-cultures est globalement réduite de 5 à 7 %. Des études sous les conditions climatiques de l'ouest de l'Europe montrent que l'impact des haies sur le bilan d'évapotranspiration du paysage dans son ensemble est plutôt faible, principalement à cause de l'humidité de l'air élevé qui contrôle ce potentiel (De Parcevaux and Guyot, 1980; Guyot and Seguin, 1975). Cependant, les impacts des haies sur le bilan hydrique d'un bassin versant ont été peu étudiés. Merot (1978), en comparant le bilan hydrique de deux bassins versants avec et sans haies, ne distingue pas de différences significatives d'évapotranspiration annuelle entre les deux bassins. Cependant pour cette étude le bilan hydrologique ne prenait pas en compte la teneur en eau du sol, et le bassin versant sans haie possédait un couvert forestier sur 15 % de sa surface. De manière générale, l'effet de la haie est estimé à l'échelle du versant et non à l'échelle du bassin versant.

### 1.4.1.3 Rôle sur la nappe

Tuteja et al (2003), utilisent des jeux de modèles intégrés afin d'estimer l'impact d'un changement d'occupation du sol sur les bilans d'eau à l'échelle d'un grand bassin versant (1688 km<sup>2</sup>). Dans cette étude la présence d'arbres mène à une augmentation durable de la profondeur de la nappe et une réduction de débits à l'exutoire en condition aride.

Ghazavi (2008) a observé une inversion de gradient de nappe (c'est-à-dire un écoulement dans la nappe, qui s'éloigne de l'axe de la rivière) entre une position à 12 m à l'aval d'une haie de bas de versant et de son axe, lors de la reprise des écoulements en automne. Une inversion de gradient dans une situation analogue a également été observée par Caubel (2001). Cette inversion locale de gradient est attribuée à une recharge plus rapide de la nappe à l'aval au niveau de la zone humide proche du cours d'eau qu'à l'amont où le sol plus sec à proximité de la haie ralentit la réhumectation et donc la recharge de la nappe. Caubel (2001) a estimé que les flux de nappe annuels interceptés par la haie sont de l'ordre de 2 à 6 %.

La haie, en prélevant l'eau de la nappe et en modifiant son gradient hydraulique, a une influence sur les transferts latéraux. En Australie, Crosbie et al (2007) ont mesuré que l'effet de la haie sur les flux latéraux de nappe par rapport à une prairie était d'autant plus fort que la journée était ensoleillée, que les transferts par advection étaient importants et que la pente de la nappe était faible. En effet pour des gradients hydrauliques faibles les écoulements de la nappe sont plus faibles et la part de prélèvement des flux est plus importante. Cette part d'eau prélevée par la haie peut atteindre 68 % des flux latéraux de nappe ayant un gradient hydraulique de 0.01 m.m<sup>-1</sup> (Ryszkowski and Kedziora, 2007).

### 1.4.2 Effet sur le bilan d'azote.

A l'échelle du bassin versant, Pinay et Troccaz (1999) n'ont pas trouvé de relation entre les flux d'azote à l'exutoire et la densité de haies en comparant des bassins présentant un gradient de densité bocagère au nord de l'Ille-et-Vilaine. D'autre part Spruill (2000) et Viaud (2004) ont mesuré des concentrations plus faibles en nitrate et des concentrations plus fortes en carbone organique dissous dans les bassins présentant le plus de zones tampons telles que les haies. A l'échelle du paysage, l'effet des zones tampons ne peut pas être quantifié par simple comparaison entre des entrées et des sorties comme à l'échelle locale compte tenu des interactions complexes entre les différents compartiments des bassins versants et de la méconnaissance des niveaux des entrées (Viaud et al., 2001).

Les flux de nappe sont dans la plupart des cas les processus dominants contrôlant les réponses hydrochimiques à l'exutoire des bassins versants. Sur le bassin versant de Kervidy à Naizin (Bretagne), Molenat (1999) observe que le temps de résidence du nitrate lixivié est contrôlé par le battement de nappe et par la position du toit de la nappe. Il est de l'ordre de quelques années sur l'amont des versants, tandis qu'il n'excède pas une année dans les bas fonds. Le sol et l'aquifère géologique d'un bassin versant peuvent être considérés comme une structure tampon car ils représentent un compartiment majeur de stockage pour l'eau et les nutriments. Des transformations géochimiques peuvent de plus s'y produire. A l'échelle du bassin versant, les structures paysagères comme les haies ne sont pas les facteurs dominant l'hydrologie et l'hydrochimie mais modulent ces caractéristiques par leur effet propre (Viaud et al., 2001).

Viaud (2004), en comparant cinq bassins versants ayant une diversité de réseaux bocagers et de roche-mères, caractérisent les fortes capacités tampons de bassins versants, par une régularisation des flux d'azote. Ces flux se marquent par une diminution des concentrations, une plus faible variabilité, des maxima et minima moins extrêmes et une corrélation temporelle des concentrations plus marquée.

Le pourcentage du flux de nappe prélevé par la haie étant dépendant du gradient hydraulique, la capacité épuratrice de la haie va donc également être fonction du gradient hydraulique de la nappe. De plus la modification des écoulements de subsurface par la haie ralentit les transferts d'eau et de solutés associés (Ryzkowski and Kedziora, 2007). L'impact de la vitesse des écoulements de nappe au voisinage de la haie, qui pourrait entraîner une modification du taux de prélèvement des nitrates, n'a pas été exploré jusqu'à présent.

### 1.4.3 Effet sur l'organisation des sols

L'évolution des sols et celles du paysage sont liées (Hall, 1983). Outre un effet local de modification des propriétés chimiques des sols, la haie induit une modification de l'organisation des sols à l'échelle des versants. Les structures bocagères modifient les redistributions de sol et la forme du paysage en favorisant un stockage en amont, et en limitant les redistributions à l'intérieur des parcelles (Follain et al., 2007). Ce mécanisme permet la préservation des stocks de carbone dans le paysage.

Les sols des agro-paysages armoricains sont soumis à une double érosion, une érosion hydrique souvent forte sur ces sols limoneux acides (Le Bissonnais et al., 2001; Pihan, 1979), et une érosion mécanique due au travail du sol. L'effet le plus systématique de la présence de haies sur les versants est celui d'un épaissement des horizons organo-minéraux et une augmentation de la charge en éléments grossiers et de la taille granulométrique des horizons de surface en amont des haies. Ces épaissements correspondent à un effet antiérosif, observé dans différents contextes (Baffet, 1984; Carnet, 1978; Follain, 2005; Walter et al., 2003) et peuvent être d'intensité variable en fonction de la topographie et de la position de la haie dans le versant (Baffet, 1984). Cependant l'effet du système bocager ne peut se raisonner simplement par la seule prise en compte de la position topographique de la haie (Follain, 2005). L'effet du réseau bocager sur l'organisation des sols diffère nettement entre les horizons de surface et les horizons minéraux profonds. Le réseau bocager n'a pas d'effet marqué sur les horizons profonds, dont l'organisation à l'aval des structures bocagères est en lien direct ou bien dans le prolongement de l'organisation à l'amont. Par contre, la géométrie des horizons organo-minéraux à l'amont est déconnectée de la géométrie à l'aval, en relation avec un talus discordant.

Le rôle de barrière antiérosive de la haie influence également la teneur en carbone du bassin versant. Les stocks sont corrélés à l'épaisseur des horizons A et sont donc localisés dans les zones de bas fond. En effet, les haies ne semblent pas contribuer au pool de carbone sur la zone de plateau (Follain, 2005). A profondeur identique les teneurs en carbone diminuent avec l'éloignement de la haie quelle que soit la profondeur étudiée. Walter et al (2003) mesurent que le stock de carbone à proximité des haies peut-être très variable d'un site à l'autre (15 à 40 %). Ils estiment qu'un réseau de haies de 200 m.ha<sup>-1</sup> contribue en moyenne à 38 % du stock de carbone organique des sols d'un bassin versant. Mais ces études se limitent à des conditions topo-paysagères favorables à l'accumulation des sols, et pour des talus perpendiculaires à la ligne de plus grande pente.

## 1.5 Interaction haie-culture

D'une manière générale, le bocage peut être considéré comme une forme d'agroforesterie. Nair (1990) définit l'agroforesterie comme « l'ensemble des systèmes d'utilisation du territoire qui associent des arbres ou d'autres végétaux ligneux pérennes et des productions animales et/ou végétales sur la même unité de surface ».

Torquebiau (2000) propose une classification en trois grands types :

- L'agrosylviculture : pour les associations de cultures et d'arbres
- Le sylvopastoralisme : pour les arbres, pâturage et animaux,
- L'agrosylvopastoralisme : pour les arbres, cultures, pâturage et animaux

Les parties aériennes et souterraines des arbres d'une haie ont une influence sur les cultures avoisinantes en modifiant les conditions physico-chimiques et microclimatiques.

La haie modifie localement les conditions micro météorologiques telles que la vitesse du vent, le déficit de saturation en eau de l'air, la température, le rayonnement et les précipitations (Missonnier, 1976). Ces modifications entraînent une diminution de l'évapotranspiration des cultures avoisinantes par rapport à des zones plus ouvertes. Ces effets sont plus prononcés dans des climats chauds et secs. Des simulations montrent que pour des paysages recouverts à 20 % par des haies, la diminution de l'évapotranspiration des cultures avoisinante est de 16 mm sous des conditions climatiques chaudes et sèches contre 8 mm sous des conditions froides et humides durant la période de végétation (Ryszkowski and Kedziora, 2007). Cependant la présence des haies à l'échelle du paysage entraînerait une augmentation de l'évapotranspiration de 14 mm sous climat chaud et sec contre 10 mm sous climat froid et humide (Ryszkowski and Kedziora, 1995).

La compétition pour l'eau et l'azote entre arbres et cultures n'est pas négligeable. En effet des études ont montré une augmentation de l'utilisation de l'eau et des nutriments dans les contextes agroforestiers par rapport à des cultures homogènes (De Montard et al., 1998; Eastham et al., 1990; Jackson et al., 2000; Jones et al., 1998). De plus la répartition du système racinaire d'un arbre isolé ou présent dans un système agroforestier est influencée par la compétition avec le couvert voisin (Schroth, 1998; Tuteja et al., 2003). L'enracinement profond des arbres semble accentué en agroforesterie (Schroth, 1998). Techer (2009) mesure des variations d'humidité plus importantes en profondeur, au voisinage des haies, lorsqu'elles sont voisines d'une parcelle cultivée avec du maïs. L'extension du système racinaire des arbres en largeur et en profondeur a une importance. Si le système racinaire est profond, la compétition avec la culture est plus faible (Rowe et al., 1998). La compétition entre la culture et l'arbre est d'autant plus faible que le système racinaire des deux couverts sont complémentaires dans le profil de sol. Dans les systèmes agroforestiers, en climat tropical, les arbres sont notamment utilisés pour leur capacité à mobiliser les nutriments dans les horizons profonds du sol et à les restituer dans les horizons supérieurs, accessibles aux racines des plantes cultivées (Buresh and Tian, 1997). Le système racinaire des arbres peut constituer des « filets de sécurité », situés sous le système racinaire de la culture annuelle et limitant la lixiviation de l'azote vers les horizons plus profonds (van Noordwijk et al., 1996). Au Kenya Lehman et al (1998b) ont comparé les teneurs en azote dans l'eau du sol entre une culture de sorgho et une culture mixte avec de l'acacia. Ils ont mesuré les entrées d'azote (fertilisation et précipitation) et les sorties (exportation par la végétation et lixiviation). Ils montrent que la teneur en azote dans les trente premiers

centimètres de sol est faible dans le cas de la culture mixte : en présence d'arbres les pertes par lixiviation sous l'horizon racinaire du sorgho sont de 53% inférieures aux pertes mesurées en monocultures. Ces observations sont liées à la fois à la densité racinaire plus importante dans le cas d'une culture mixte et à un meilleur rapport perte/prélèvement pour les arbres. Au Costa Rica, Seyfried et Rao (1991) observent une lixiviation d'azote plus faible dans une association maïs-arbres que dans une monoculture de maïs. Au sud des Etats-Unis, Allen et al. (2004) mettent en évidence une diminution de la lixiviation sous une association pacanier-coton, qui pourrait également être selon les auteurs liée à la diminution du drainage de l'eau dû à l'augmentation de la transpiration. Cependant les systèmes racinaires de l'arbre et de la culture voisine sont parfois mélangés, notamment lorsque les ressources en eau et en nutriments sont limitées, lorsque le sol est peu profond et que la nappe est basse (Smith et al., 1999), ce qui induit une augmentation de la compétition pour ces ressources. De plus la distribution du système racinaire des arbres en agroforesterie est fonction de l'essence (Toky and Bisht, 1992).

Les rendements des cultures associées à la haie sont néanmoins modifiés. Des études effectuées sur les bocages bretons montrent que l'influence des haies sur les rendements des cultures se produit selon une double zonation (Missonnier, 1976). En production céréalière (blé et maïs), il a été mesuré que le rendement des cultures diminuait sur une largeur d'environ 2 fois la hauteur des arbres en bordure amont et à l'aval de la haie. Au contraire, au centre de la parcelle, sur une zone comprise entre 2,5 et 6 fois la hauteur de la haie, des gains de rendements assez constant mais variable selon les années étaient observés. Cette augmentation est attribuée à des températures plus chaudes à cette distance de la haie dues aux modifications des conditions micrométéorologiques. Sur un profil orthogonal à l'action maximum des vents, la diminution de la biomasse mesurée peut atteindre 25 à 50 % en bordure de haie, tandis que l'augmentation de production en subpériphérie de parcelle peut atteindre 20 % à l'emplacement le plus favorisé. Au final les rendements des parcelles cultivées tendraient à diminuer de 11 % pour le maïs et de 7 % pour le blé (Missonnier, 1976).

### 1.6 La gestion des haies

La compétition pour la lumière est forte à proximité de la haie. Les arbres ayant une canopée très développée ont un impact local sur la croissance des cultures et peuvent gêner le passage des engins agricoles, d'où la pratique fréquente de l'élagage ou de l'émondage de la haie autour d'une parcelle cultivée, ce qui limite ces inconvénients. Les haies bordant les parcelles de prairies sont quant à elles moins souvent entretenues, notamment lorsqu'elles sont pâturées, car l'ombre des arbres est bénéfique aux animaux. La figure Figure 1.3 illustre le fait que la haie est gérée de manière différente selon l'occupation du sol des parcelles adjacentes. Ici, la haie est bordée à droite par une jeune culture de maïs et à gauche par une prairie. La pratique effectuée sur ces haies est asymétrique : la bordure boisée adjacente au champ de culture a été élaguée, la bordure boisée adjacente à la prairie est laissée dense Vannier (2011).



Figure 1.3 - La gestion des haies diffère en fonction de l'occupation du sol des parcelles adjacentes (Vannier, 2011).

La gestion des haies à l'échelle locale dépend donc de l'occupation du sol des parcelles adjacentes à la haie, mais également de leur évolution temporelle, c'est-à-dire des successions de prairies et cultures (Baudry and Jouin, 2003; Lotfi et al., 2010). Une rotation de prairies et cultures de 2 ou 3 ans peut amener à une pratique de l'émondage ou de l'élagage en début de culture (Thenail and Baudry, 2004; Thenail et al., 2009) et une repousse des branches durant les périodes où la parcelle est en prairie. L'évolution de successions dominées par des prairies vers des successions dominées par des cultures conduit à une pratique de l'émondage, puis de l'arasement de haies si le système de culture persiste. Au contraire, le cas inverse est favorable au maintien ou à la plantation de haies selon l'organisation spatiale de l'occupation des sols des parcelles voisines (Lotfi, 2008; Thenail et al., 2009). La présence de prairies permanentes, favorise donc le maintien d'un bocage dense.

L'organisation des pratiques de gestion effectuées sur les haies dépend également de l'organisation spatiale des îlots de parcelles gérées de façon homogène dans le temps et de leur dynamique d'occupation du sol (Thenail and Baudry, 2004; Thenail and Codet, 2003). Le maintien d'un réseau bocager dense est privilégié dans les îlots parcellaires dominés par des prairies, tandis que l'absence de haie, ou l'arasement, est favorisé à l'intérieur d'îlots de parcelles toujours en culture. C'est la gestion conjointe de l'ensemble des parcelles agricoles à l'intérieur de l'îlot qui amène à pérenniser certains types de pratiques effectuées sur le réseau de haies.

Au niveau de l'exploitation agricole les parcelles sont gérées dans un espace discontinu où les haies sont souvent des objets de limites entre deux parcelles, entre deux propriétés ou sur le bord de routes et de chemins. Ces types de haies sont gérés différemment des autres du fait de leur rôle de limite de territoire (Houet and Hubert-Moy, 2006). On observe que ces espaces sont favorables à la plantation ou au maintien de haies.

Au niveau du territoire agricole, les contraintes physiques liées à la présence de cours d'eau, de forêts, de types de sols, ajoutent un forçage dans le système de l'organisation spatiale des pratiques agricoles (Vannier et al., 2011). On observe ainsi des organisations spatiales spécifiques comme par

exemple les lisières de prairies souvent permanentes le long de cours d'eau qui sont souvent bordées d'un bocage très dense, ou les haies brise-vent, plantées pour leur fonction de régulation climatique.

### 1.7 Les modèles sur le bocage et l'agroforesterie.

Plusieurs modèles ont déjà été utilisés ou construits pour simuler l'effet de l'arbre ou de la haie sur les transferts d'eau ou de solutés ainsi que ses interactions avec les cultures voisines.

En agroforesterie, différents modèles simulent l'effet de la compétition pour l'eau, l'azote et la lumière entre arbre et culture tel que WIMISA (Mayus et al., 1998), WaNuLCAS (Van Noordwijk and Lusiana, 1998), HyPAR (Mobbs et al., 1997), Yield-SAFE (van der Werf et al., 2007). Cependant ces modèles opèrent surtout à l'échelle de l'arbre ou de la parcelle, et ne prennent pas en compte les remontées capillaires ou prélèvements dans la nappe.

La haie en tant que telle a également été modélisée pour son effet sur le ruissellement (Bocher, 2005; Merot and Bruneau, 1993; Viaud, 2004) ou sur la nappe (Thomas et al., 2008; Viaud, 2004).

Mérot et al. (1995) ont modélisé que la présence du réseau de haies modifiait le réseau de drainage superficiel d'un bassin versant en déconnectant certaines branches du réseau et en jouant un rôle de puits ou par une diminution de la pente ce qui allonge les temps de transfert. L'effet des haies dépend non seulement de leur orientation par rapport aux écoulements, mais aussi des relations spatiales avec les autres éléments du réseau. Les haies non perpendiculaires à la pente participent aussi au rôle tampon global du réseau de haies lorsqu'elles sont connectées à d'autres haies.

Viaud et al. (2005) utilisent le modèle hydrologique spatialisé maillé TNT2 (Beaujouan et al., 2002) pour étudier l'impact de différents réseaux de haies sur l'hydrologie d'un petit bassin versant en Bretagne. Les haies sont prises en compte en distinguant des mailles « haie » qui sont modélisées avec une capacité d'évapotranspiration plus importante et une possibilité de prélever de l'eau à des profondeurs plus grandes en augmentant les remontées capillaires. Les simulations suggèrent qu'à l'échelle de la maille « haie » l'effet de la haie dépend de sa position sur le versant et donc de la profondeur de la nappe sous-jacente. A l'échelle du bassin versant, les résultats de simulations montrent une augmentation de l'évapotranspiration de 5 à 30 % avec des réseaux de haies de 30 à 200 m/ha respectivement. Cette augmentation est plus importante les années humides. Cependant la description de la transpiration de la haie dans le modèle reste simple.

De plus, le fait de distinguer des mailles « haies » et « sans haies » entraîne une forte dépendance des résultats à la taille du maillage considéré et entraîne une approximation dans la représentation spatiale des haies. Pour remédier à ce problème Bocher (2005) utilise des MNT à mailles triangulaires (Triangular Irregular Network, TIN) qui permet de modéliser des environnements aux géométries complexes comme les réseaux bocagers. Cependant, l'interaction avec les cultures pour l'eau et la lumière ne peut être prise en compte avec ce type de représentation.

## 1.8 Conclusion de l'étude bibliographique

Les haies en segmentant le paysage, augmentent l'hétérogénéité du milieu. De ce fait, leurs effets sont fonction de nombreux facteurs. Les arbres modifient fortement les conditions physico-chimiques des milieux qui les entourent de manière directe ou indirecte entraînant des modifications dans le cycle de l'eau et de l'azote à différentes échelles.

La haie a localement un impact sur la teneur en eau et en azote du sol. Il peut être direct dû aux prélèvements racinaire, ou indirect de par la modification des conditions physiques et géochimiques du sol. Son effet sur la teneur en eau et en carbone du sol ainsi que sur les populations de macro et microorganismes, influence les processus tels que la minéralisation de la matière organique et la dénitrification. La haie influence également le développement des cultures avoisinantes de par son effet sur les différentes ressources du milieu comme la lumière l'eau et l'azote.

L'influence locale de la haie sur le cycle de l'eau et de l'azote en fonction de la position sur le versant, reste cependant peu étudié. Le rôle de la haie sur son environnement pourrait cependant être variable selon la position dans le versant et la profondeur de la nappe. En effet on peut suspecter que la proximité de la nappe soit favorable à un abattement de sa teneur en nitrate par les prélèvements racinaires, cependant l'effet de la haie sur la teneur en eau du sol pourrait diminuer la dénitrification. Avec l'augmentation de la profondeur de la nappe, l'effet de la haie sur les cycles de l'eau et de l'azote sont probablement modifiés. De même, la disponibilité des ressources a sans doute une influence sur les interactions entre la haie et la culture associée. Enfin, la taille d'entretien des haies a vraisemblablement un effet sur leurs fonctions hydrologiques et pédologiques.

Afin de déterminer comment l'ensemble de ces processus intervient à l'échelle du bassin versant, la thèse s'est articulée dans un premier temps au travers d'un cas d'étude sur le site expérimental de Pleine Fougères au nord de l'Ille et vilaine, qui a eu pour but d'approfondir les connaissances sur l'effet de la haie et le rôle de sa position sur le fonctionnement hydrologique d'un versant. Le nombre important de processus mis en jeu a ensuite nécessité l'utilisation d'outils tels que la modélisation pour l'étude du bassin versant. Les connaissances sur les haies ont donc été intégrées dans le modèle TNT2 (Beaujouan et al. 2002) afin de simuler l'impact d'un réseau bocager et de sa gestion sur les flux d'eau et d'azote d'un petit bassin versant. Le but étant d'obtenir un modèle qui reproduise les processus majeurs attribués à la haie tout en restant simple, permettant d'étudier la variabilité spatiale de l'impact des haies et son rôle sur les bilans d'eau et d'azote du bassin versant.



## 2 Étude expérimentale du fonctionnement hydrique de différentes haies le long d'un versant

### 2.1 Introduction

L'effet de la haie sur les variations d'humidité des sols en Bretagne est déjà bien connue (Caubel 2001 ; Gazavi 2008). Cependant ces études se sont focalisées sur des haies de bas de versant, et le rôle de la distance à la nappe sur les variations d'humidité du sol a très peu été étudié, malgré les études montrant une diminution de la transpiration des haies de haut de versant relativement aux haies de bas de versant (Crosbie et al., 2007; Crosbie et al., 2008).

Nous avons constaté au travers de l'étude bibliographique (chapitre 1.3) que la haie avait une influence locale sur la teneur en eau du sol et sur le niveau du toit de la nappe. Cette modification locale des conditions hydrologiques peut également dans certaines conditions (localisation sur le versant) avoir une influence sur les écoulements de nappe à l'échelle du versant.

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact de la haie sur les variations locales d'humidité du sol en fonction de sa position sur le versant et donc de la distance à la nappe, ainsi que le fonctionnement hydrologique d'un versant comportant plusieurs haies. Pour cela, un site de mesure a été instrumenté au nord de l'Ille et Vilaine (Bretagne). Le site a été suivi durant un an entre septembre 2009 et septembre 2010.

### 2.2 Site expérimental

Le site expérimental est localisé sur la Zone Atelier Armorique au Nord Est de l'Ille et Vilaine (<http://osur.univ-rennes1.fr/zoneatelier-armorique>). Cette Zone Atelier, labélisée par le CNRS, est une zone d'étude mise en place entre 1993 et 2000 et qui couvre un gradient de densités de haie en termes de paysages bocagers.

Le site expérimental se situe près de la commune de Pleine Fougères (figure Figure 2.1). Le climat est de type océanique. La température moyenne annuelle (sur 15 ans) est de 11,8 °C. La pluviométrie moyenne annuelle est de 745 mm et l'ETP moyenne annuelle de 681 mm. Les sols reposent sur des schistes du Briovérien supérieur. Une nappe peu profonde affleure une grande partie de l'année dans la zone humide située en bas de versant. Un cours d'eau d'ordre 3 borde la zone humide. Le site se positionne proche de l'exutoire du sous-bassin versant de Pleine-Fougères (figure Figure 2.2).

Le site est composé de trois haies perpendiculaires au sens de la pente. La première, située en haut de versant (HDV), matérialise la ligne de crête du versant et sépare deux parcelles cultivées en maïs à l'amont et à l'aval. La seconde est située à mi-versant (MDV) et séparée par la culture de maïs en amont et par une prairie faiblement pâturée à l'aval. Enfin, la troisième est localisée en bas de versant (BDV) et séparée par la prairie à l'amont et une zone humide à l'aval. La pente est faible (< 4%) en amont de la haie de mi-versant et devient très forte (17%) au niveau de la haie de bas de versant (figure Figure 2.5). La longueur du versant entre la haie de haut et de bas de versant est de 96 m.

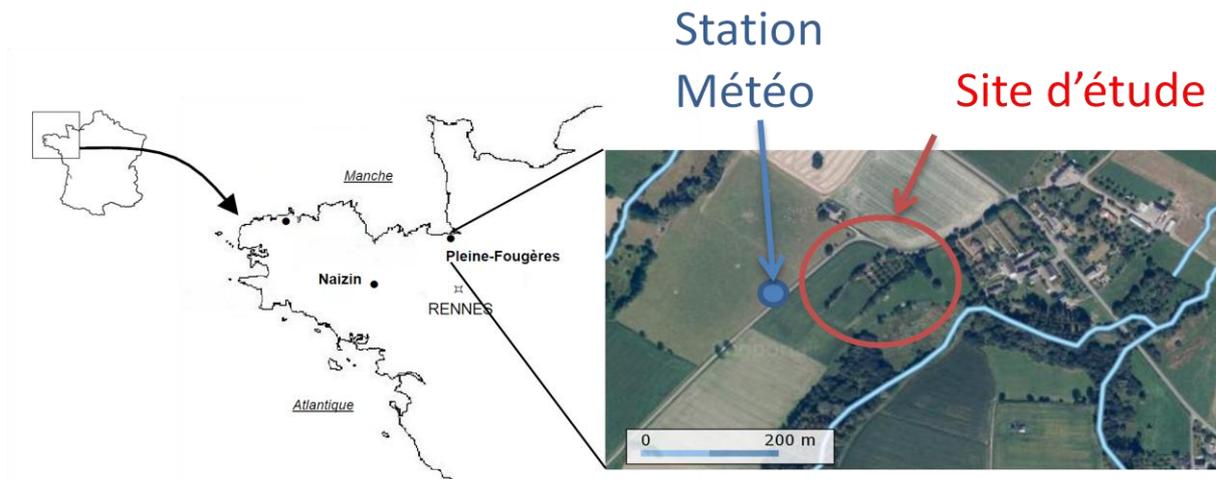


Figure 2.1 – Localisation géographique du site expérimental de Pleine Fougères

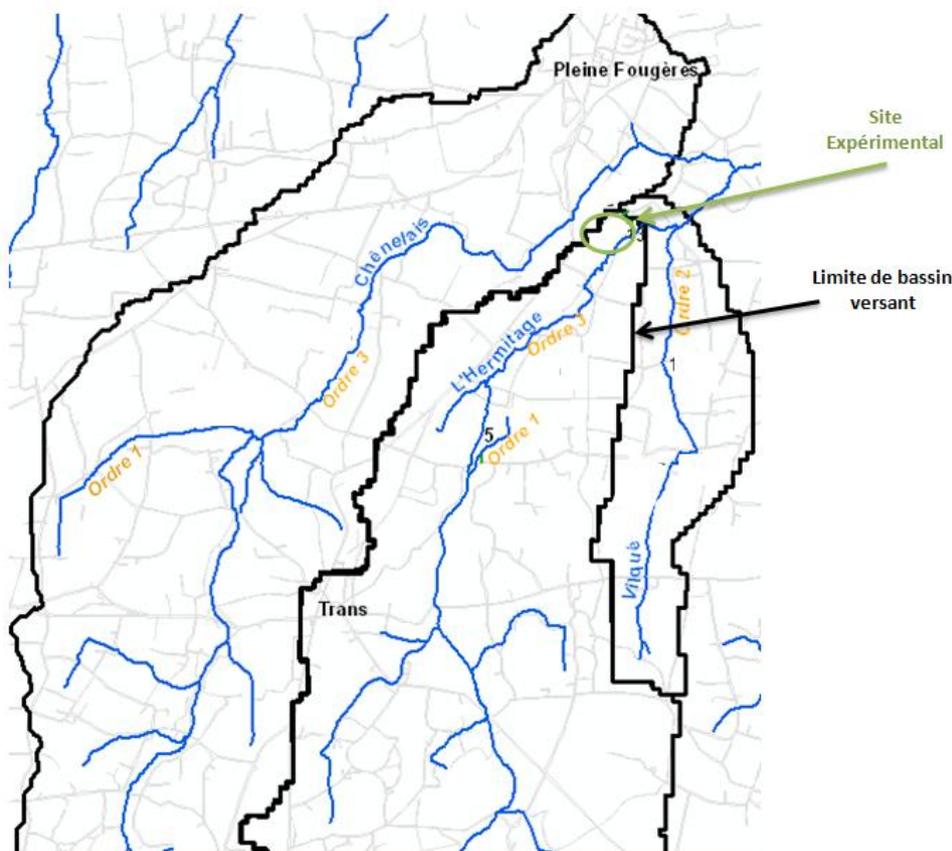


Figure 2.2 – Positionnement du site sur le sous bassin versant de Pleine fougère.

La haie de haut de versant est composée essentiellement de chênes pédonculés (*Quercus robur*) et présente une densité moyenne de 1 arbre par mètre linéaire. La haie de mi-versant est composée de chênes pédonculés, de châtaigniers et de noisetiers, et présente une densité de 1,2 arbres par mètre linéaire. Enfin la haie de bas de versant est composée de chênes pédonculés d'âges divers avec une densité de 1 arbre par mètre linéaire ainsi que de buissons formés principalement de ronces. Cette dernière haie qui borde la zone humide n'est pas totalement continue et est remplacée par une large zone herbacée sur sa partie Ouest. La haie de milieu de versant présente une densité de feuillage

visuellement plus dense que les deux autres. Ces trois haies reposent sur des talus de plus en plus développés avec la proximité de la zone humide.

### 2.3 Instrumentation

Les instruments installés sur le site expérimental ont pour but de mesurer l'impact des haies d'un versant sur la teneur en eau du sol à leur voisinage ainsi que le fonctionnement hydrologique d'un versant comportant des haies.

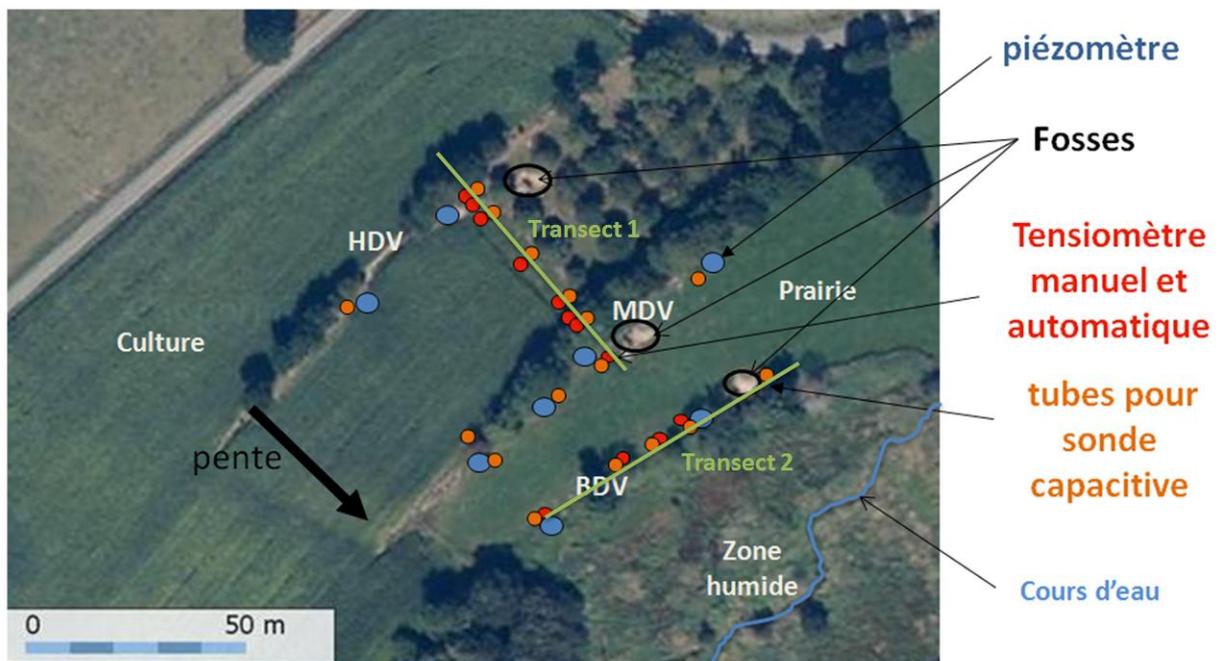


Figure 2.3 – Instrumentation du site expérimental.

#### 2.3.1 Climatologie

Une station météo a été positionnée à l'Ouest du site sur une zone haute et dégagée, afin d'obtenir les différents termes de la demande climatique (figure Figure 2.4). Elle est équipée d'un anémomètre, d'une girouette, d'un hygromètre, d'un thermomètre pour la température de l'air, d'un pluviomètre, et de deux pyranomètres pour la mesure du rayonnement global et réfléchi.



Figure 2.4 – Station météo positionnée à l'Ouest du site expérimental.

Par ailleurs, 8 stations météorologiques sont installées sur le bassin versant, dans le cadre du suivi climatologique de la zone atelier. L'hétérogénéité du paysage et la rugosité de surface (topographie, bocage, etc...) engendrent une forte variabilité spatiotemporelle du climat aux échelles locales et microclimatiques. Ces dispositifs ont permis de mettre en évidence que les unités paysagères montrent d'importantes variations climatiques comme par exemple, 2 à 3 °C de différence, entre un site dégagé sur un plateau et un fond de vallée pourtant distant de quelques dizaines de mètres (Baudry, communication orale 2011).

### 2.3.2 Observations pédologiques

Une étude, menée par Layer (2000) sur ce site, a permis d'obtenir une toposéquence des sols le long du versant étudié (figure Figure 2.5). Cette toposéquence présente en surface un horizon organo-minéral (A) qui s'épaissit depuis l'amont jusqu'aux haies comme cela est souvent constaté sur les versants où les haies ont rôle anti-érosif (Follain, 2005). Cet épaissement est de moindre mesure pour la haie de mi-versant avec une épaisseur de l'horizon A à l'amont de la haie de 0.8 m, tandis qu'elle atteint 2,25 m à l'amont de la haie de bas de versant.

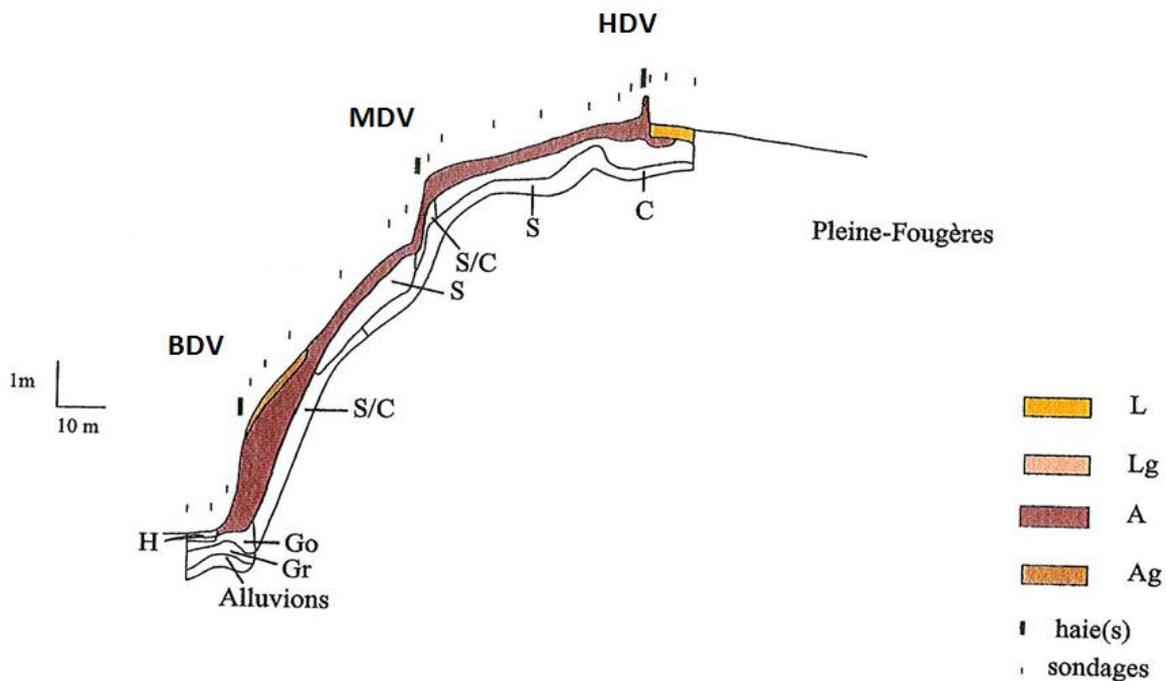


Figure 2.5 – Coupe de sol du site expérimental de Pleine-Fougères (Layer, 2000).

Trois fosses ont été creusées afin de caractériser plus précisément l'organisation spatiale des horizons de sol et d'effectuer des prélèvements de sol pour des analyses de densité et de granulométrie. La première fosse a été creusée à l'aval de la haie de haut de versant, la seconde à l'aval de la haie de mi-versant, enfin, la troisième à l'amont de la haie de bas de versant.

Les trois fosses présentent des profils de sol très différents.

La fosse du haut de versant révèle un brunisol redoxique sur arène de schiste très altéré. L'épaisseur de l'horizon "A" est de 30 cm, celui de l'horizon "Sg1" d'environ 10 cm. Les limites des horizons présents en dessous sont beaucoup moins nettes. En effet la limite entre l'horizon Sg2 et Cg1 n'est pas horizontale mais présente des ondulations d'amplitudes très marquées (figure Figure 2.6).

La deuxième fosse présente un sol peu épais de type rankosol développé sur schiste à forte variabilité de faciès avec le passage d'un schiste gréseux moyennement dur à un schiste tendre en moins d'un mètre. L'épaisseur de l'horizon "A" y est très faible soit 25 cm et celle de l'horizon "C" est de 10 cm.

Enfin, la troisième fosse présente un colluviosol, redoxique en profondeur, dont l'horizon A dépasse la profondeur de la fosse soit plus de 250 cm.

La grande différence entre les trois fosses se situe au niveau de l'épaisseur de l'horizon A, très peu épais dans les deux premières, au dessus d'un horizon S riche en cailloux et graviers, et beaucoup plus épais dans la troisième.

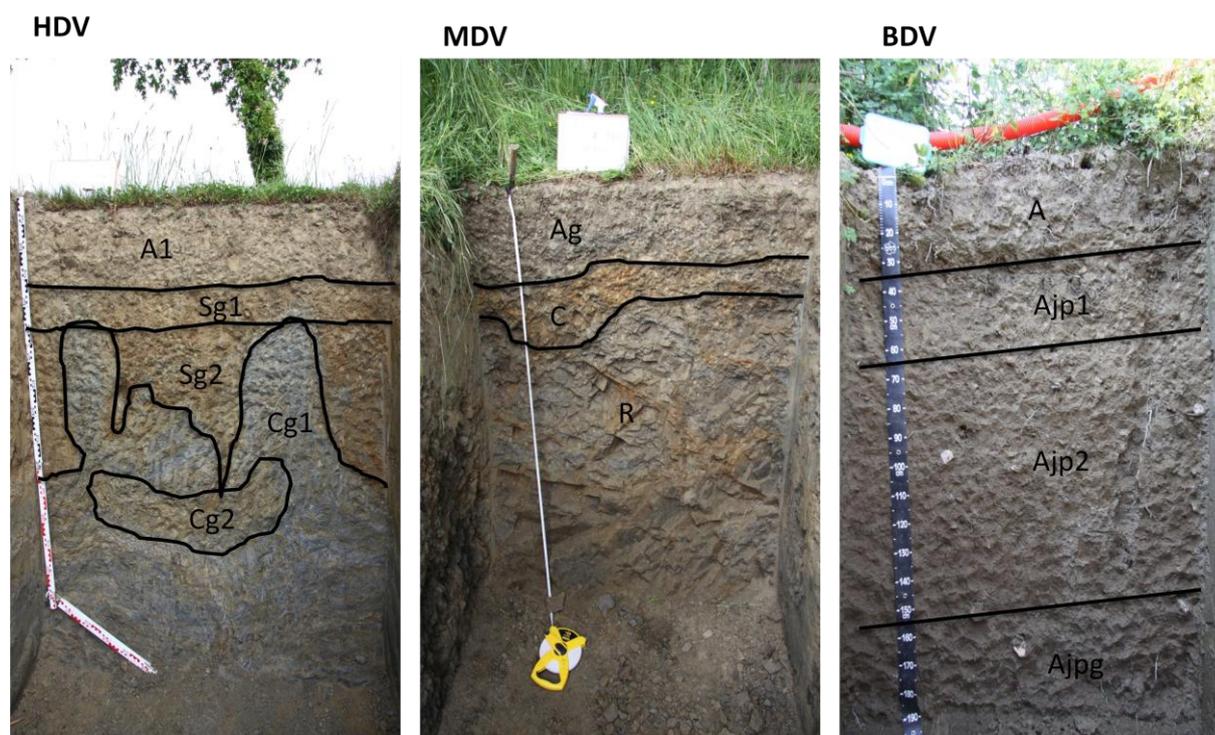


Figure 2.6 – Photographies des coupes de sol des trois fosses. Les lettres désignent le nom des horizons qui sont distingués par des lignes.

### 2.3.3 Mesures hydrologiques

#### 2.3.3.1 Piézométrie

Les variations de la nappe sont mesurées à l'aide de piézomètres positionnés à différents niveaux sur le versant à proximité des haies (figure Figure 2.3). Ils sont enfoncés jusqu'à 15 m de profondeur en haut de versant, 11 m à mi-versant et 9 m en bas de versant et sont crépinés à partir de 3 m sous la surface du sol.

Les piézomètres sont équipés de capteurs « STS<sup>TM</sup> » qui mesurent les variations du toit de la nappe toutes les 15 minutes. Cet appareil est constitué du capteur en lui-même qui est immergé dans l'eau à l'intérieur du piézomètre et qui est relié par un câble à un boîtier d'acquisition placé en surface (figure Figure 2.7). Le capteur positionné à une profondeur connue, mesure la pression hydrostatique de la colonne d'eau au dessus de sa position qui est ensuite convertie en hauteur d'eau.



Figure 2.7 – Photographie d'un piézomètre et de son capteur « STS »

### 2.3.3.2 Tensiométrie

#### 2.3.3.2.1 Principe de fonctionnement

Les tensiomètres servent à mesurer le potentiel hydrique de l'eau du sol ou potentiel de pression. Ce potentiel correspond à la différence d'énergie libre entre l'eau du sol et une eau de référence (eau libre et pure à la pression atmosphérique). Il traduit l'état de liaison de l'eau ou la quantité d'énergie qu'il faudrait fournir pour l'extraire du sol.

Le potentiel de pression total comprend plusieurs composantes, chacune liée à une force agissant sur l'eau qui modifie son énergie par rapport à celle de l'eau libre et pure. Ces champs de force sont dus principalement :

- à la gravité : potentiel gravitationnel
- à la pression de l'eau en milieu saturé : potentiel de submersion
- à l'attraction de l'eau par la matrice solide en milieu non saturé : potentiel matriciel
- à la présence d'ions en solution : potentiel osmotique

Il est fréquent que les forces de gravité, de submersion ou matricielles soient les seules à agir. Dans la zone non saturée, le potentiel total ( $P$ ) peut être exprimé en termes d'énergie par la somme du potentiel gravitationnel ( $Z$ ) et du potentiel matriciel ( $\Psi_m$ ).

$$P = Z + \Psi_m$$

Où " $Z$ " est l'altitude par rapport à un point de référence (figure Figure 2.16). Le potentiel total permet de déterminer le sens d'écoulement de l'eau du sol entre deux positions. L'eau se déplace dans le sens des pressions hydrauliques décroissantes.

Les tensiomètres sont constitués d'une canne creuse en PVC à la base de laquelle on a une céramique poreuse (dite bougie poreuse) en contact avec la matrice du sol, et sur la partie supérieure, un bouchon étanche. La canne est remplie d'eau à l'état initial qui, lorsque le sol s'assèche, va diffuser à travers la bougie poreuse (figure Figure 2.8). Une dépression va alors se créer à l'intérieur du tube.

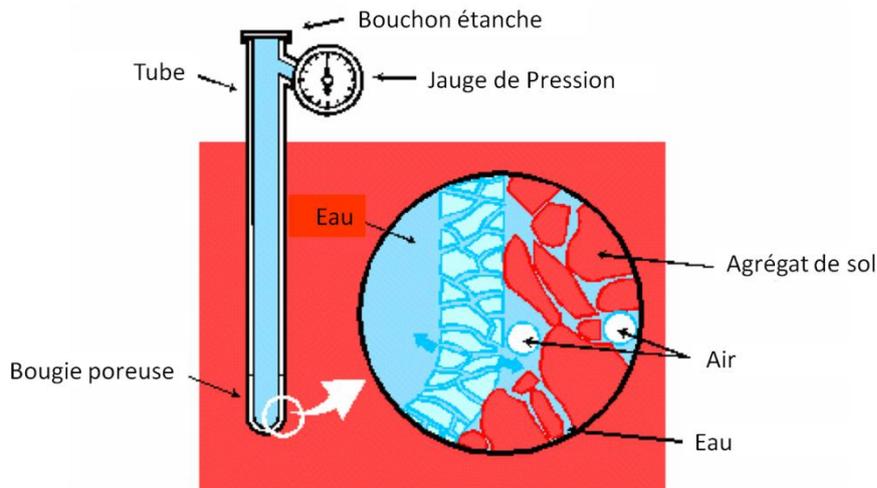


Figure 2.8 – Principe du tensiomètre.

Sur notre site d'étude, cette dépression est ensuite mesurée par des capteurs de pression (SKT 850, SDEC France™) pour les tensiomètres dits « automatiques » et par un tensimètre (SMS 2500S, SDEC France™) pour les tensiomètres dits « manuels ». La tension minimale supportée par les tensiomètres utilisés est environ -800 mbar. Lorsque le potentiel matriciel du sol descend en dessous de -800 mbar on dit que les tensiomètres « décrochent », c'est-à-dire qu'ils se vident de leur eau qui est remplacée par de l'air. Les mesures enregistrées par les capteurs ne sont alors plus significatives.

#### 2.3.3.2.2 Disposition sur le site

Les tensiomètres sont groupés en lots composés de quatre cannes enfoncées à différentes profondeurs qui sont 25, 50, 100 et 150 cm, de façon à pouvoir mesurer un profil de potentiel vertical en chaque zone de mesure. Ces lots ont été disposés sur le versant selon deux transects (figure Figure 2.3, Figure 2.9 et Figure 2.10). Le premier se situe entre les haies de haut et de milieu de versant et perpendiculaire à celles-ci, le second se situe à l'amont de la haie de bas de versant et parallèle à celle-ci.

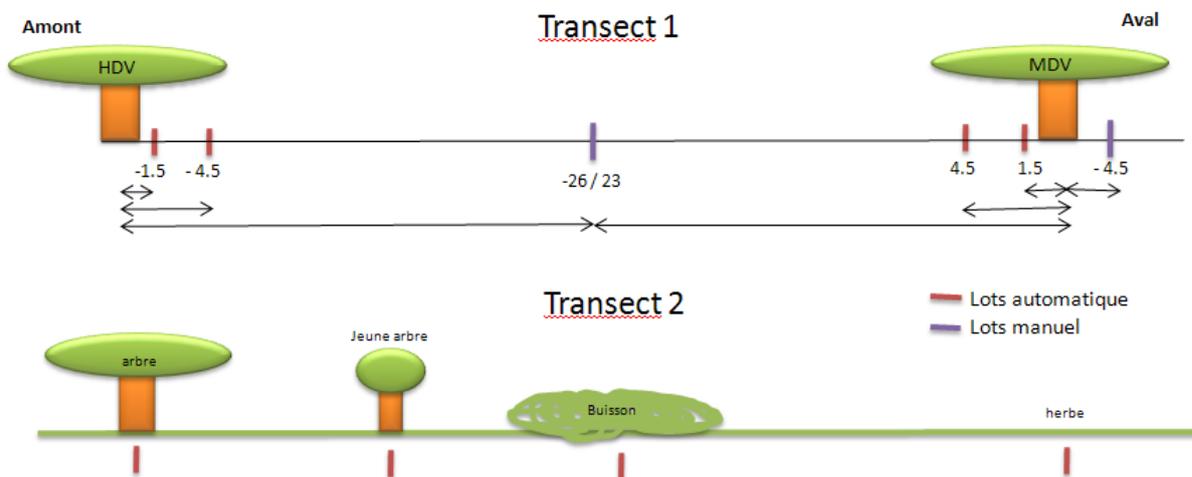


Figure 2.9 – Schéma des deux transects et position des lots de tensiomètres avec en rouge les lots automatiques et en violet les lots manuels. Les chiffres indiquent la distance à l'arbre en mètre, avec en négatif la distance aval et en positif la distance amont.



Figure 2.10 – Photographie de la partie amont du transect 1.

Au total huit lots de tensiomètres automatiques et deux lots de tensiomètres manuels ont été installés sur le versant.

### 2.3.3.3 Sonde capacitive

#### 2.3.3.3.1 Principe de fonctionnement

La sonde capacitive DIVINER2000® (Sentek) a été utilisée pour mesurer la capacitance ou constante diélectrique ( $K_a$ ) d'un mélange sol-eau-air. La constante diélectrique de l'eau libre est beaucoup plus élevée (80) que celles des autres composantes du sol (1 pour l'air ; 4-7 pour la matrice solide). Ainsi, la principale source de variation de la constante diélectrique du sol est son humidité volumique " $\theta_v$ " (Thomas, 1966). Le capteur de la sonde joue le rôle d'un condensateur constitué de deux électrodes ; le sol qui est le milieu prospecté joue le rôle du diélectrique de ce condensateur (figure Figure 2.11).

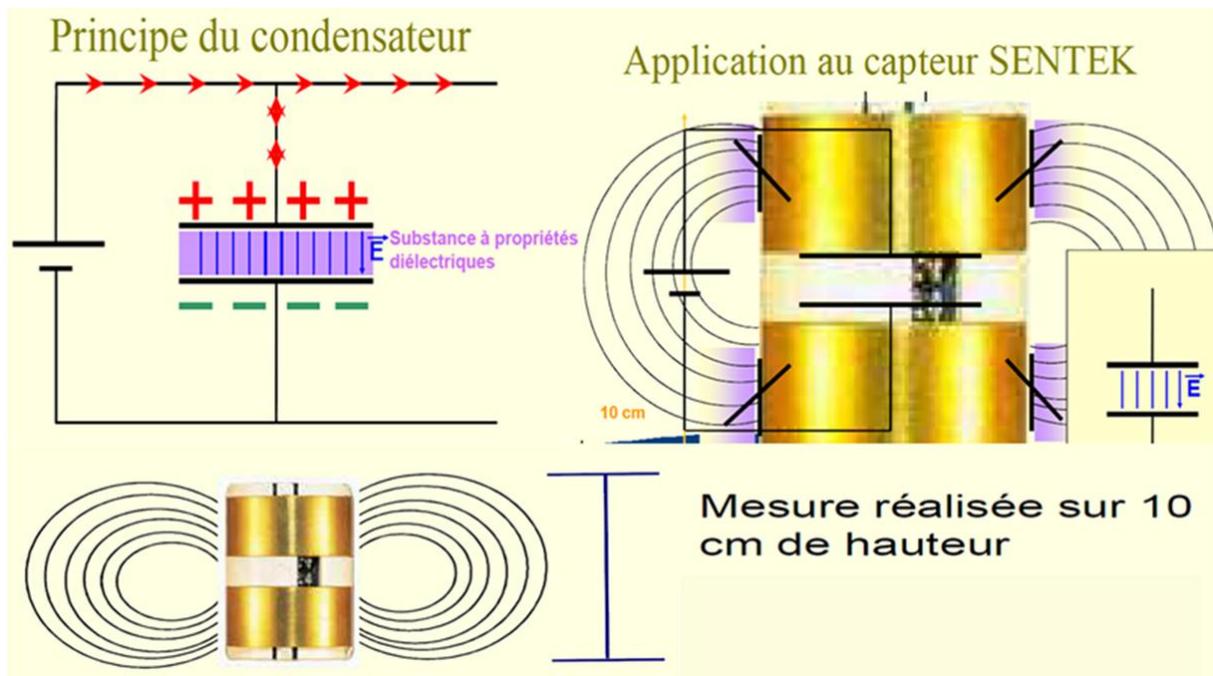


Figure 2.11 – principe de fonctionnement du capteur de la sonde capacitive.

Cet instrument est composé d'une canne de 2 mètres raccordée à un boîtier de mesure à l'extrémité de laquelle se trouve une sonde capacitive. Les mesures sont effectuées manuellement en introduisant la canne dans un tube préalablement enfoncé dans le sol (figure Figure 2.12). La sonde effectue deux mesures tous les dix centimètres jusqu'à 1,50 m de profondeur.



Figure 2.12 – Photo de la sonde capacitive et du tube pvc de mesure placé dans le sol.

#### 2.3.3.2 Disposition sur le site

Les tubes permettant d'effectuer des mesures à l'aide de la sonde capacitive ont été répartis en différentes positions sur le site. Ces positions sont présentées dans la figure Figure 2.13. Les noms des tubes comportent : leur position dans le versant (HDV, MDV, BDV) et leur distance par rapport à la haie la plus proche (positive à l'amont, négative à l'aval). Une lettre (a, b, c, d) est ajoutée pour distinguer différents tubes situés à égale distance de la haie.



Figure 2.13 – Localisation des tubes pour la sonde capacitive pour les mesures (en blanc) et pour la calibration (en rouge). Les distances à la haie sont entre parenthèse, elles sont positives pour à l’amont et négatives à l’aval. Les lettres distinguent des positions différentes par rapport à l’axe de la haie.

## 2.4 Etalonnage des capteurs de mesures

### 2.4.1 Etalonnage des capteurs des tensiomètres

Les tensiomètres automatiques équipés de capteurs situés sur la partie supérieure du tube sont reliés à une centrale d’acquisition qui enregistre la dépression qui s’exerce à l’intérieur du tube au pas de temps du quart d’heure (figure Figure 2.10). Les tensiomètres manuels permettent de recueillir des informations de manière ponctuelle lors du passage hebdomadaire sur le site à l’aide du tensimètre. Le tensimètre possède une aiguille creuse qui passe à travers le bouchon en caoutchouc permettant ainsi d’avoir une mesure de la dépression à l’intérieur du tube.



Figure 2.14 – Photographie de lots de tensiomètres avec (gauche) ou sans (milieu) capteurs automatiques, et mesure avec un tensimètre (droite).

La dépression mesurée doit ensuite être corrigée par rapport à une droite d'étalonnage calculée en laboratoire pour chaque capteur. L'étalonnage a été effectué sur la gamme de potentiel comprise entre 0 et 850 mbar. Pour cela un banc d'étalonnage (figure Figure 2.15) est utilisé. Il est composé d'une pompe reliée à un tuyau PVC sur lequel plusieurs capteurs sont installés. L'étalonnage consiste à appliquer une dépression connue grâce à un étalon de pression (boîtier bleu, figure Figure 2.15) et à établir une relation entre la pression appliquée (mbar) et la tension du capteur (mV). Cette relation est utilisée pour paramétrer les connecteurs reliés à chaque capteur (STK 850) via une interface logiciel (AMR-ALMEMO 3290-8). Les paramètres a et b issus de la régression linéaire entre la pression appliquée et la pression lue par les capteurs permettent de corriger les données tensiométriques enregistrées ( $\Psi_e$ ). Le tensimètre est quant à lui étalonné une fois par an chez le fabricant.

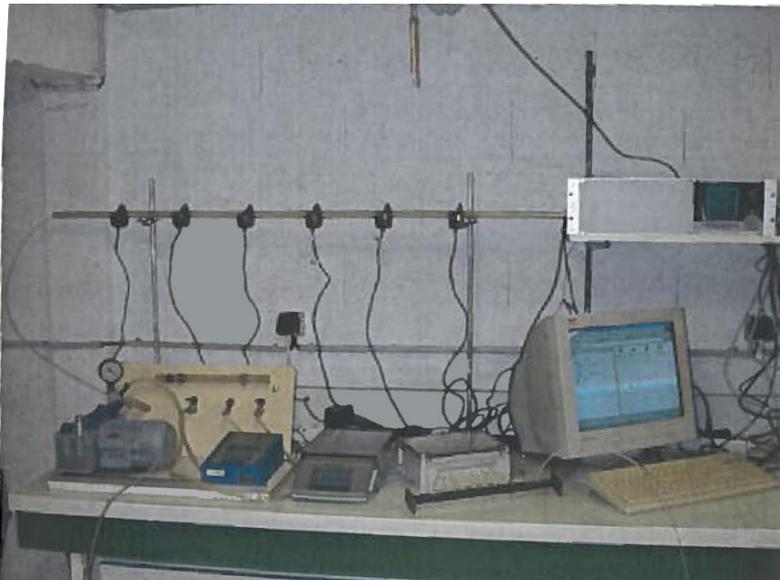


Figure 2.15 – Banc d'étalonnage des capteurs de pression (STK 850)

Le potentiel corrigé à partir de la droite d'étalonnage s'écrit donc :

$$\Psi_c = \frac{\Psi_e - b}{a}$$

La dépression réelle, ou potentiel matriciel ( $\Psi_m$ ), doit ensuite être calculée selon la formule suivante :

- Pour les tensiomètres automatiques

$$\Psi_m = \Psi_c + P + h_c - I$$

- Pour les tensiomètres manuels

$$\Psi_m = \Psi_c + H - h_v$$

Où "P" est la profondeur moyenne de la bougie poreuse par rapport au niveau du sol, "h<sub>c</sub>" la hauteur entre le sol et le point de prise de mesure du capteur au dessus du sol, "I" est la hauteur entre ce capteur et l'extrémité de la canne tensiométrique, H est la hauteur de la canne et h<sub>v</sub> la hauteur d'air (figure Figure 2.16).

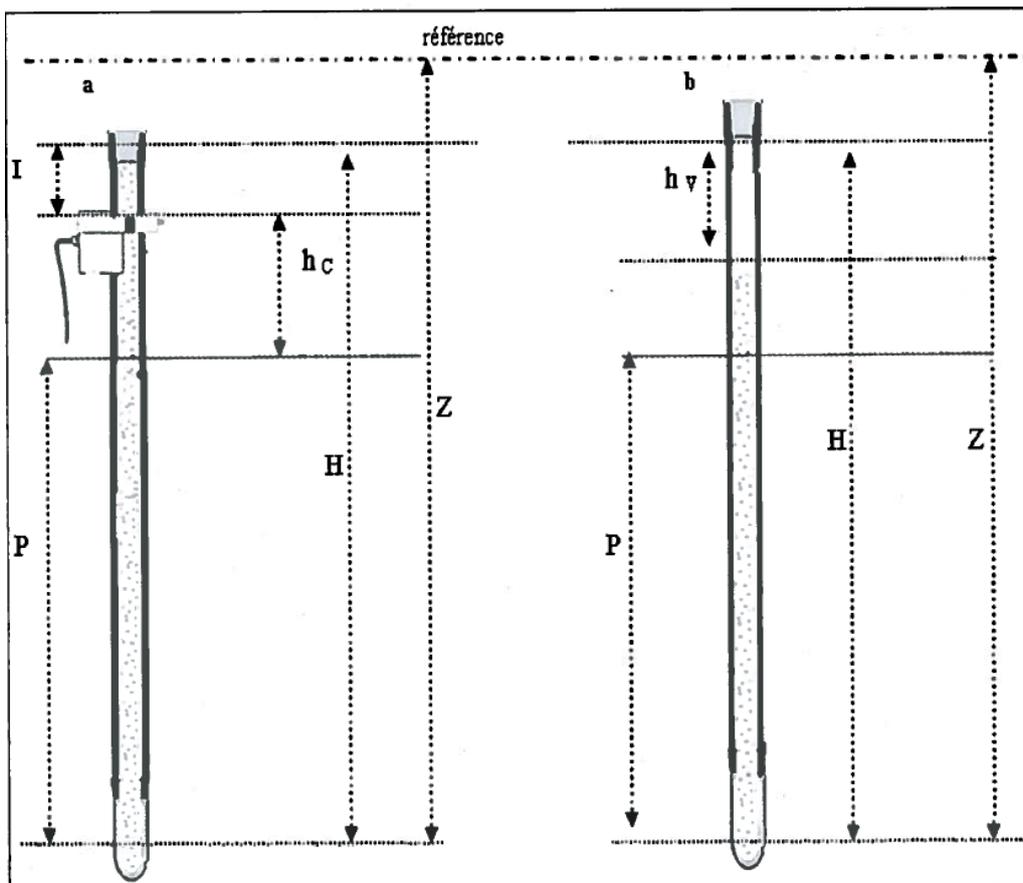


Figure 2.16 – Représentation schématique de tensiomètres automatiques SKT 850 (gauche) et manuels (droite).

Les tensiomètres sont enfoncés dans le sol après la formation, à l'aide d'une gouge, d'un pré-trou d'un diamètre égal à celui du tensiomètre. Une boue à base d'eau et de sol issu du pré-trou est préparée afin d'enduire la bougie poreuse et de combler l'espace éventuel entre le tensiomètre et le

sol. Cette précaution permet de favoriser le contact avec le sol qui évite l'infiltration d'eau en surface le long du tube et permet un bon contact entre la bougie et la matrice du sol.

### 2.4.2 Etalonnage de la sonde capacitive

La sonde doit subir deux types d'étalonnage. Le premier consiste à étalonner la sonde entre deux valeurs seuils qui sont la mesure à l'air libre et la mesure dans l'eau libre à l'aide d'une bassine d'eau correspondant à la saturation totale d'un sol. Le second consiste à étalonner la sonde par rapport aux différents types de sol sur lesquels on va effectuer les mesures. Cet étalonnage consiste à comparer les fréquences lues par la sonde à chaque profondeur avec les valeurs d'humidité volumique d'échantillons prélevés directement à proximité du tube et mesurées en laboratoire.

La société SENTEK fournit une courbe d'étalonnage pour des sols sableux, limoneux et limono-argileux (figure Figure 2.17).

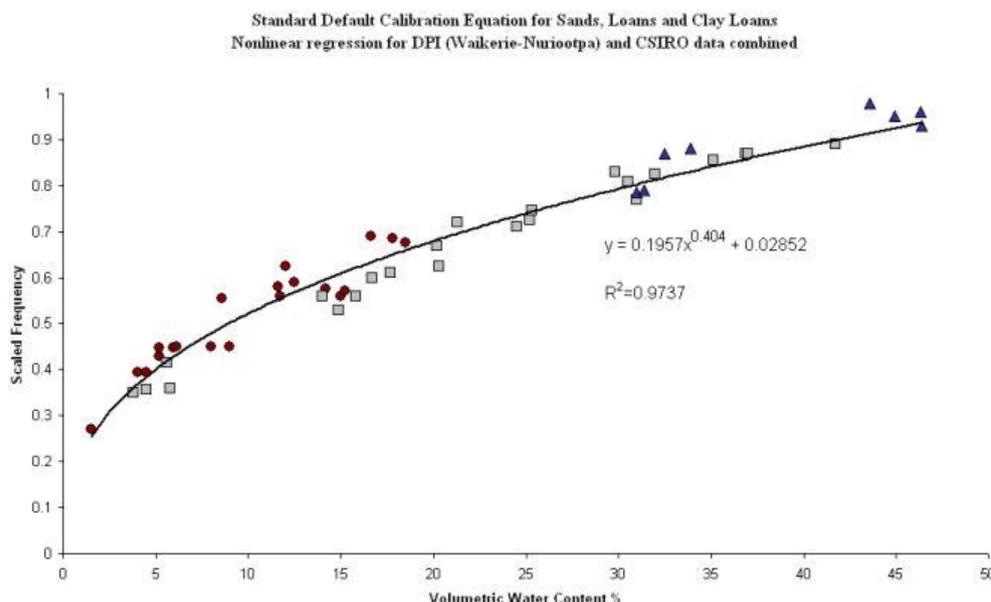


Figure 2.17 – Exemple de calibration de la sonde capacitive sur une large gamme d'humidité fournie par Sentek qui donne l'équation par défaut de l'appareil.

Nous avons choisi d'étalonner la sonde pour les sols du site expérimental. Pour cela, quatre tubes tests ont été préalablement positionnés sur le versant, à l'aval de la haie de haut de versant, à l'amont et à l'aval de la haie de mi-versant et à l'amont de la haie de bas de versant.

Ce protocole possède certaines limites dans la mesure où même si l'on tient compte de l'hétérogénéité des sols à l'échelle du versant (organisation des horizons), on ne peut prendre en compte leur hétérogénéité à l'échelle locale comme la variation du taux de cailloux, de racines, ou de densité apparente. Il aurait fallu pour intégrer cette variabilité locale effectuer plusieurs répétitions à chaque niveau du versant.

Pour l'étalonnage trois échantillons de sol sont prélevés tous les dix centimètres à proximité des tubes tests à l'aide de cylindres de 5 cm de hauteur et de volume connu (figure Figure 2.18). La profondeur de prospection a été dépendante de l'épaisseur de sol et de la charge en cailloux. Cette profondeur a été de 80 cm à l'aval de la haie de haut de versant, de 70 cm à l'amont de la haie de mi-

versant, de 40 cm à l'aval de la haie de mi-versant et enfin de 150 cm à l'amont de la haie de bas de versant.



Figure 2.18 – Prélèvement des échantillons autour d'un des tubes tests à l'aide de cylindres de volume connu.

Ces échantillons sont ensuite analysés en laboratoire afin de déterminer leur densité apparente et leur humidité volumique. Les charges en cailloux des échantillons (principalement des éléments grossiers de schiste et de quartz) ont posé des difficultés pour l'estimation des densités apparentes. Elle a donc été obtenue selon le protocole suivant :

- Pesage des échantillons avant et après séchage à l'étuve à 105°C pendant 48h, pour la mesure de la masse d'eau.
- Tamisage à 2 mm des échantillons afin d'en extraire les éléments grossiers.
- Pesée des éléments grossiers extraits et détermination de leurs volumes par différence de hauteur d'eau dans une éprouvette graduée.
- 

La densité apparente de la matrice de sol hors éléments grossiers est ensuite obtenue selon l'équation suivante :

$$\text{densité apparente} = \frac{(\text{Masse sèche de l'échantillon} - \text{Masse de cailloux})}{(\text{Volume de l'échantillon} - \text{Volume de cailloux}) \times \rho_w}$$

La densité apparente correspond à la masse volumique apparente sur la masse volumique de l'eau ( $\rho_w$ ). Les valeurs de densité apparente pour les quatre tubes sont représentées dans la figure Figure 2.19. Elles varient entre 1,2 et 1,8 et on observe une tendance à l'augmentation avec la profondeur.

En surface (0-60 cm) la densité apparente est assez semblable entre les différents profils, à part pour celui situé en MDV aval pour laquelle la valeur est largement supérieure à partir de 20 cm. Cela peut s'expliquer par la faible épaisseur de l'horizon A et par la transition brutale sur l'altérite qui offre peu d'espace disponible pour le développement du système racinaire de la haie et pour l'activité des organismes du sol. La dissymétrie amont-aval du système racinaire pour cette haie doit donc sûrement être importante.

En profondeur, à partir de 60 cm la densité apparente de la matrice de sol augmente plus rapidement pour les profils de HDV aval, puis pour celui de MDV amont et plus profondément encore pour le profil BDV amont. Les densités apparentes en profondeur sont clairement liées à la structure pédologique du sol. En effet elles augmentent plus rapidement pour des profondeurs de sol plus faibles.

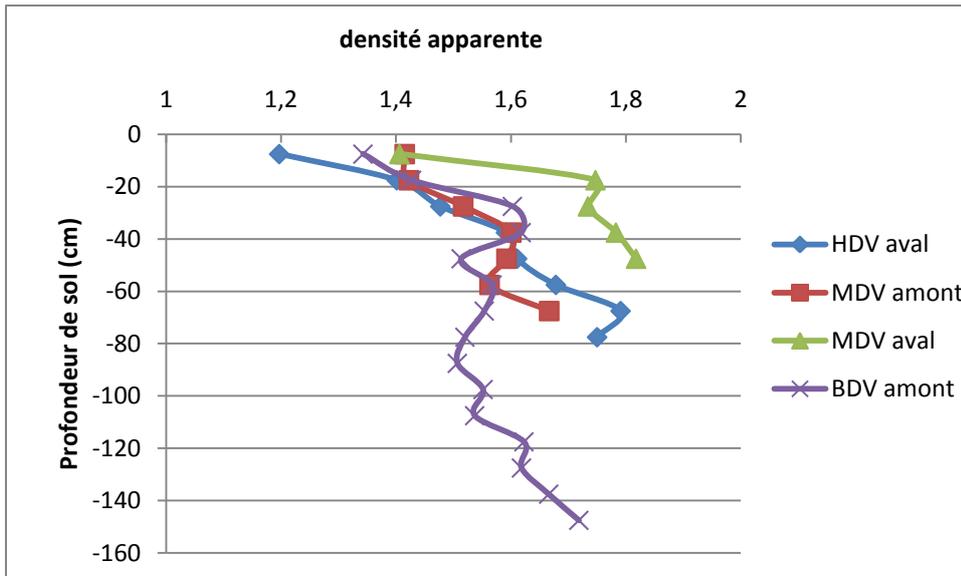


Figure 2.19 – Densité apparente de la matrice de sol en fonction de la profondeur sur les différents profils prélevés.

L'humidité volumique est ensuite déterminée par la formule suivante :

$$\theta_v = \frac{\text{volume d'eau}}{\text{volume de la matrice de sol}} = \frac{\text{masse d'eau} \times \text{densité apparente de la matrice de sol}}{(\text{masse de sol totale} - \text{masse d'éléments grossiers})}$$

Au moment du prélèvement des échantillons une mesure est effectuée à l'aide la sonde capacitive afin de pouvoir relier les mesures d'humidité du sol déterminées au laboratoire aux valeurs de fréquence obtenues par la sonde à chaque profondeur sur le terrain (figure Figure 2.20).

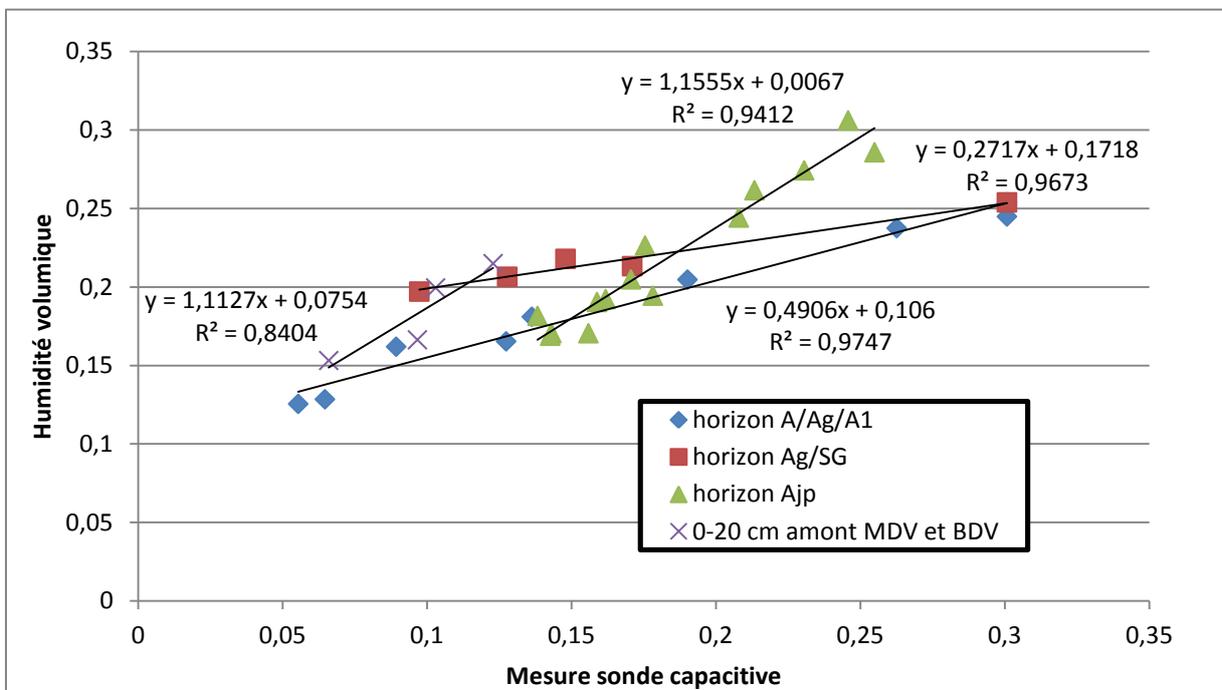


Figure 2.20 – Relations entre la teneur en eau volumique de chaque type de sol déterminées au laboratoire et les mesures effectuées par la sonde capacitive. En violet les horizons de surface (0-20 cm) pour les profils situés en amont de la haie de bas et de mi-versant et en vert les horizons plus profond (>20 cm) des mêmes profils. En bleu les horizons de surface (0-40cm) de l'aval de la haie de haut et de mi-versant et en rouge les horizons profonds à l'aval de la haie de haut de versant correspondant au schiste très altéré.

Les relations entre humidité volumique et mesure à la sonde capacitive présentent de bonnes corrélations pour chaque type d'horizon présent sur le versant (figure Figure 2.20).

La figure Figure 2.17 fournie par la société SENTEK montre que pour une teneur en eau volumique supérieure à 10 % la réponse de la sonde à l'humidité du sol peut être considérée comme linéaire. La gamme de prospection en termes d'humidité volumique étant supérieure à 10 %, les relations linéaires présentées dans la figure Figure 2.20 ont donc été utilisées pour déterminer l'humidité volumique de chaque horizon de sol lors des mesures effectuées par la sonde capacitive.

## 2.5 Résultats

### 2.5.1 Analyse granulométrique

Les analyses granulométriques des différents horizons, ont été effectuées par le Laboratoire INRA d'analyses des sols d'Arras et sont présentées dans la figure Figure 2.21. On constate, malgré une grande diversité de sols le long du versant, granulométrie moyenne assez similaire entre les trois fosses. Cela indique que c'est la densité des sols et leur profondeur plus que la texture qui contribue majoritairement à la réserve en eau pour les végétaux.

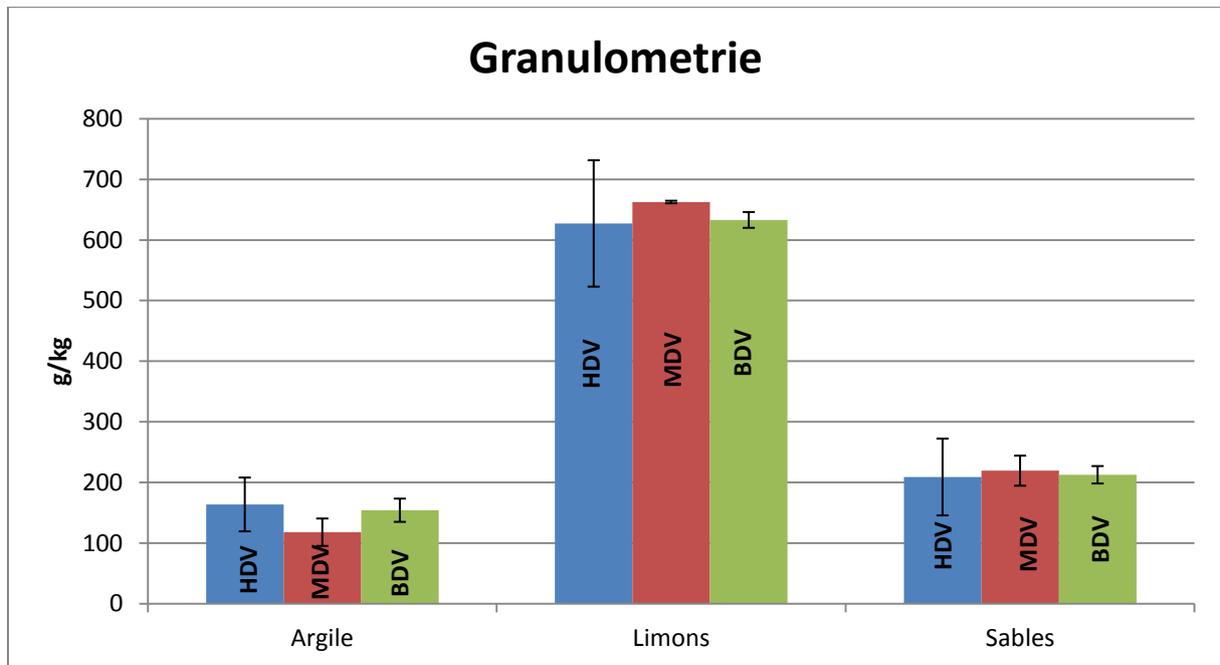


Figure 2.21 – Granulométrie moyenne de la terre fine (<2mm) des sols des trois fosses (HDV, MDV et BDV, respectivement Haut, Milieu et Bas De Versant) du site expérimental avec écart-type sur les profondeurs.

### 2.5.2 Données météorologiques

Durant la période d'étude comprise entre septembre 2009 et septembre 2010 les précipitations sur le site ont été de 644 mm. Soit en dessous de la moyenne annuelle qui est de 745 mm. Cette année a été marquée par une reprise des écoulements tardive, qui commença aux alentours du 27 octobre 2009. De plus la pluviométrie de l'année précédente déterminée à l'aide de cinq stations météo présentes sur le bassin versant était encore plus faible soit 572.6 mm. Avant la reprise des écoulements les sols étaient très secs et le niveau de la nappe très bas.

L'ETP durant la période d'étude a été de 713 mm soit supérieure à la moyenne annuelle de 681 mm.

### 2.5.3 Humidité du sol

#### 2.5.3.1 Potentiel matriciel et charge hydraulique

Le potentiel matriciel a été mesuré entre septembre 2009 et septembre 2010. Durant cette période et notamment durant la saison estivale le dessèchement des sols a entraîné une diminution du potentiel matriciel passant en dessous des -800 mbar, valeur de décrochement pour les tensiomètres. Cela a entraîné une absence de mesures sur tous les profils durant cette période. De plus la comparaison des potentiels matriciels à différentes positions sur le versant a été délicate par manque de données disponibles en différents points. En effet lorsque la bougie des tensiomètres se trouve dans l'altérite ces derniers ont tendance à « décrocher » plus facilement. De plus, en haut de versant et pour les tensiomètres très proches de la haie (1,5 m), la période de mesure a été très courte, surtout en profondeur, car l'année hydrologique plutôt sèche, n'a pas permis une réhumectation de l'ensemble du sol à ces distances de la haie. Du fait d'un manque trop important de données, les lots de tensiomètres positionnés à 1,5 m des haies de haut et de mi-versant n'ont donc pas été discutés ici, mais les données sont présentées en annexe 1.

Les potentiels matriciels à 4,5 m à l'amont de la haie de bas de versant et de mi-versant ont été comparés entre eux afin d'étudier l'effet de la distance à la nappe sur la teneur en eau du sol à proximité de la haie. Ces lots de tensiomètres ont été choisis car la profondeur du sol y est importante et qu'à cette distance de la haie l'ensemble des horizons de sol prospectés par les tensiomètres ont été réhumectés. Des mesures effectuées à des distances plus éloignées des haies ont également été utilisées comme témoins afin de pouvoir identifier l'influence de la haie sur l'humidité du sol. Ces positions correspondent au lot de tensiomètres situé exactement entre la haie de haut et de mi-versant ainsi qu'à celui situé au niveau de l'axe de la haie de bas de versant sur la portion sans haie. Les variations du potentiel matriciel de ces positions entre septembre 2009 et 2010 sont présentées dans la figure Figure 2.22.

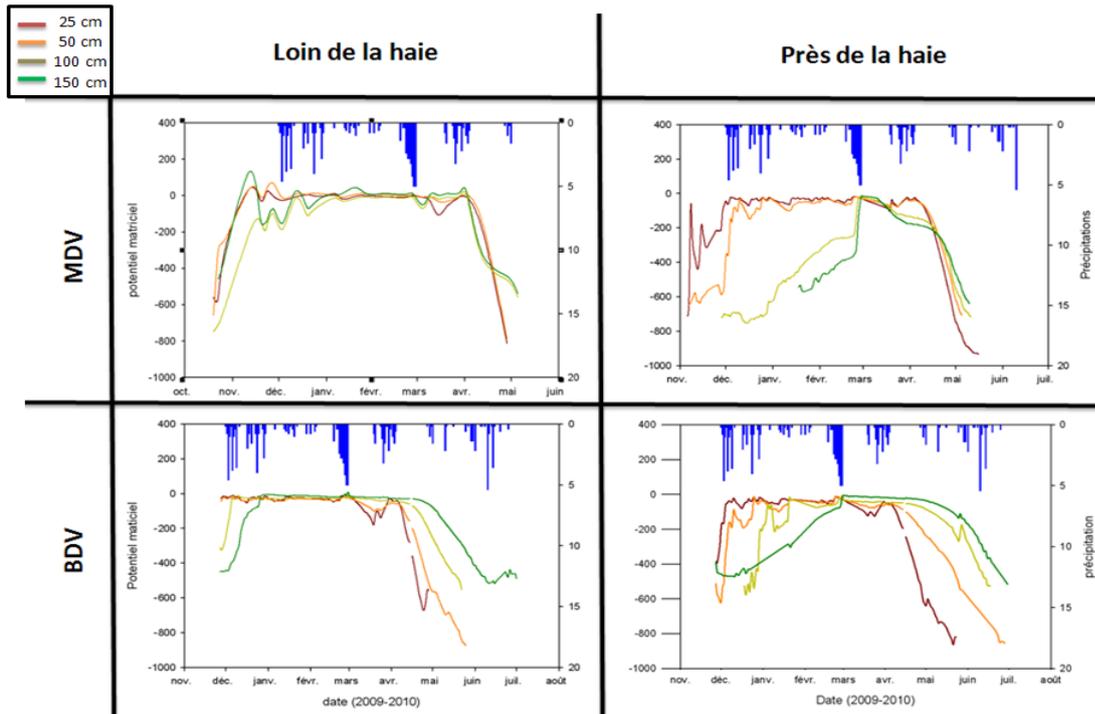


Figure 2.22 – Variations des potentiels matriciels (mm) durant l'année de mesure (sept. 2009 ; sept. 2010) en bas et à mi-versant pour des tensiomètres près de la haie (4.5 m à l'amont) et des tensiomètres loin de la haie (ou section sans haie). Les mesures ont débuté mi-septembre pour les lots dans la partie supérieure du versant et mi-novembre pour les lots dans la partie inférieure du versant. La pluviométrie (en mm) au pas de temps journalier n'a été disponible qu'à partir de début décembre.

Lors de la reprise des écoulements qui débuta mi-octobre, on note un effet de la proximité de la haie sur la réhumectation des sols. En effet pour les configurations loin de la haie, l'ensemble des profondeurs (0-150 cm) sont totalement réhumectées fin décembre soit deux mois et demi après la reprise des écoulements. Pour les configurations plus proches des haies la réhumectation totale est plus lente surtout en profondeur (> 1m). L'ensemble des couches ne sont totalement réhumectées qu'à partir de mars pour ces deux positions.

Lors de la période de dessèchement, on note également un effet de la proximité de la haie sur les horizons de surface. On constate en effet que la diminution du potentiel matriciel à 25 cm débute dans les quatre configurations aux environs de mi-avril. Cependant les diminutions du potentiel matriciel sont plus rapides loin des haies qu'à proximité, que ce soit en milieu ou en bas de versant. En effet les -800 mbar sont atteints deux semaines après le début du dessèchement, soit fin avril, loin des haies alors qu'à proximité des haies ce potentiel est atteint aux environs de mi-mai. La différence observée à cette profondeur est sans doute liée à l'ombrage engendré par les haies sur la végétation de surface (herbe) et sur les sols car l'amont des haies sur le versant correspond au côté Nord. Ces observations rejoignent celles de Caubel et al. (2003).

Durant la période de dessèchement on note également un effet de la position sur le versant. En effet, à mi-versant, le dessèchement des couches de sol se fait de manière homogène sur toutes les profondeurs que l'on soit proche ou loin de la haie, tandis qu'en bas de versant le dessèchement des couches de sol débute tout d'abord en surface puis s'étend progressivement en profondeur. On observe alors un retard au dessèchement du sol aux profondeurs de 100 et 150 cm pour la haie de bas de versant comparée à la haie de mi-versant. En effet, à proximité de la haie de mi-versant la

saturation totale à ces profondeurs, ne dure qu'environ deux semaines, alors qu'à proximité de la haie de bas de versant cette saturation se maintient entre deux mois (100 cm) et deux mois et demi (150 cm). Ces observations sont sans doute liées à la proximité de la nappe qui tamponne le dessèchement en profondeur, maintenant ainsi ces horizons humides. Lorsque l'on compare les potentiels totaux en bas de versant (figure Figure 2.23), on note qu'il y a une inversion (passage de potentiels décroissants à croissants) entre les couches les plus profondes et les couches de surface ce qui implique un mouvement d'eau des couches les plus profondes vers la surface qui correspond aux remontés capillaires de la nappe.

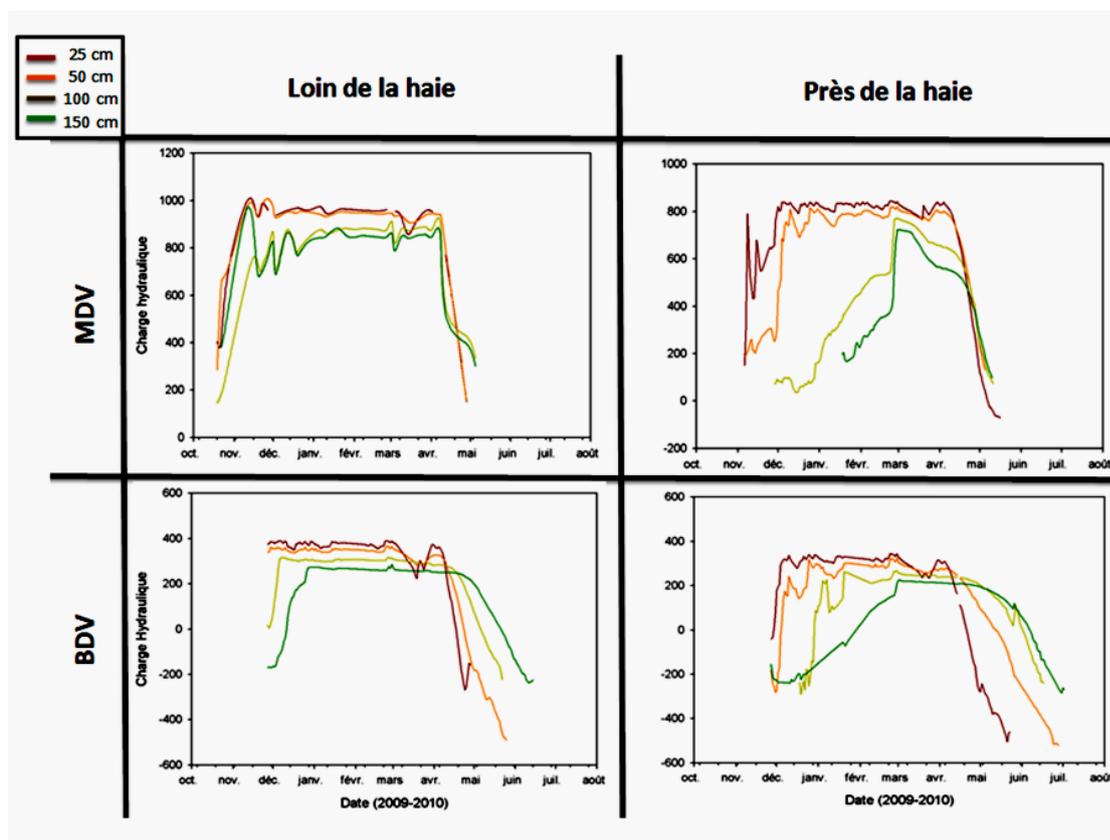


Figure 2.23- Variations des potentiels totaux durant l'année de mesure (sept. 2009 ; sept. 2010) en bas et à mi-versant pour des tensiomètres loin de la haie (ou section sans haie) et des tensiomètres près de la haie (4.5 m à l'amont). Les mesures ont débuté mi-septembre pour les lots dans la partie supérieure du versant et mi-novembre pour les lots dans la partie inférieure du versant.

Les différences de dynamique au cours de l'année du potentiel matriciel entre le milieu et le bas de versant peuvent également être liées à d'autres facteurs :

- Une densité apparente du sol plus faible en bas de versant qui révèle une réserve utile en eau plus importante (Agus et al., 1997). En effet pour une même quantité d'eau prélevée les variations du potentiel matriciel en bas de versant seront plus faibles qu'à mi-versant.
- Un système racinaire moins profond en bas de versant qu'à mi-versant dû à la proximité de la nappe et qui limite son développement.
- Une demande climatique moins importante en bas de versant, lié à un confinement de l'air autour de la haie plus important entraînant une diminution du vent, ainsi qu'à une humidité locale de l'air plus forte due à la proximité de la zone humide.

### 2.5.3.2 Humidité volumique du sol

#### 2.5.3.2.1 Variations d'humidité volumique.

Les valeurs d'humidité volumique du sol ont été suivies à l'aide de la sonde capacitive durant la même année de mesures. A chaque profondeur la différence entre la valeur d'humidité volumique la plus sèche et la plus humide a été calculée. La figure Figure 2.24 présente les variations d'humidités volumiques maximales en fonction de la profondeur de mesure pour les différents profils étudiés.

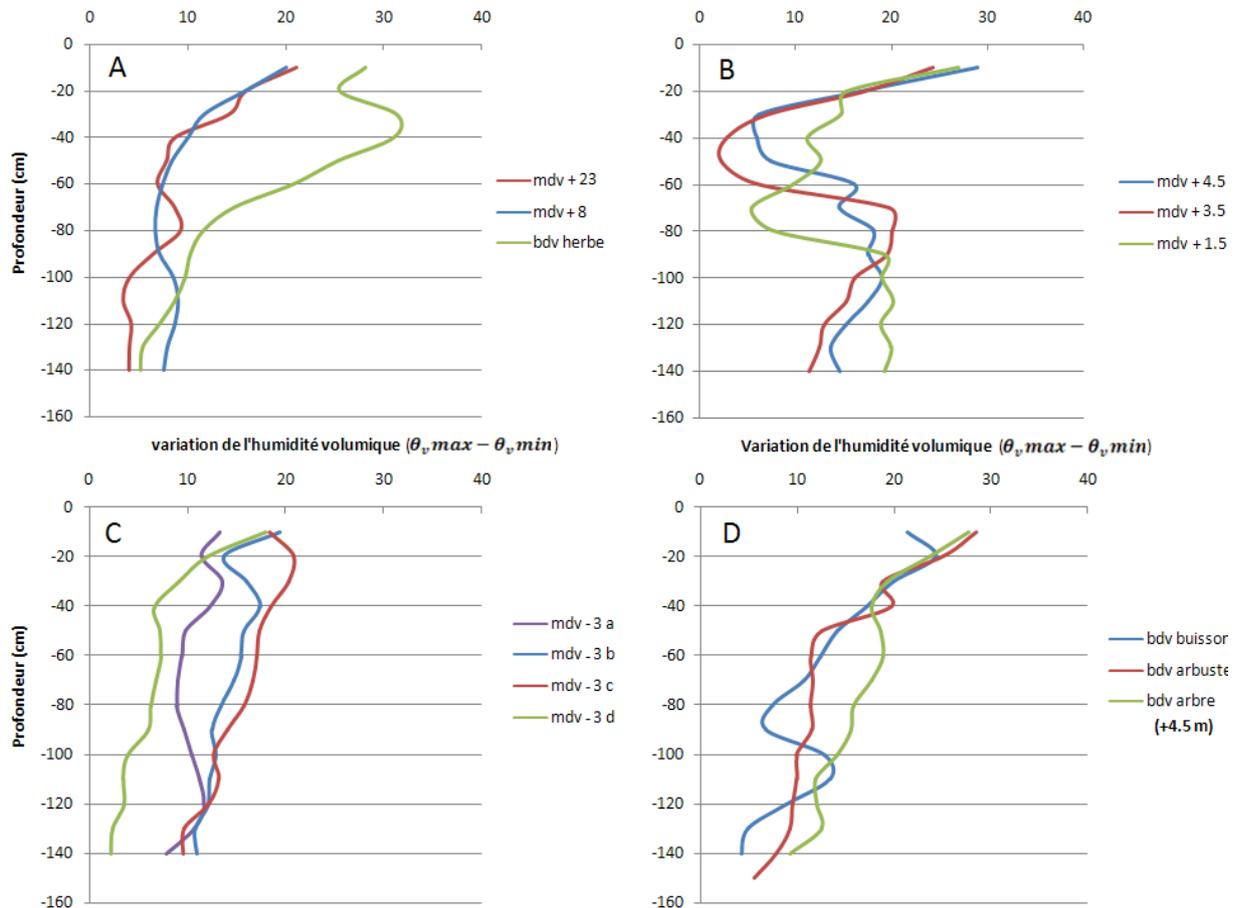


Figure 2.24- variation maximale de l'humidité volumique ( $\theta_{v,max} - \theta_{v,min}$ ) durant l'année de mesure 2009-2010 en fonction des profondeurs de mesure pour l'ensemble des tubes, avec en A les profils sans haie ou loin de la haie, en B la zone amont de la haie de milieu de versant, en C la zone aval de la haie de mi-versant et en D la zone amont de la haie de bas de versant en fonction du type de végétation.

Pour les profils sans haie ou loin de la haie (figure Figure 2.24-A), les variations d'humidité volumique sont d'une manière générale plus importantes en surface et diminuent progressivement avec la profondeur. En surface sur les 40 premiers centimètres, les variations d'humidité volumique sont plus importantes en bas de versant avec des variations de 30 unités, contrairement aux variations de 10-20 unités en milieu de versant à ces mêmes profondeurs. Les variations sont globalement identiques en profondeur (> 80cm).

Pour les profils situés à l'amont de la haie de mi-versant (figure Figure 2.24-B), les variations d'humidité volumique les plus importantes sont situées en surface soit 25 unités, puis diminuent globalement entre les profondeurs de 30 et 70 cm avant de retrouver des valeurs plus importantes en profondeur (légèrement inférieures à celles mesurées en surface) soit environ 20 unités.

Pour les profils situés à l'aval de la haie de milieu de versant (figure Figure 2.24-C), les variations d'humidité volumique pour les quatre tubes de mesure ont une allure semblable avec une légère tendance à la baisse en fonction de la profondeur. Les gammes de variation entre ces tubes montrent néanmoins des différences pouvant aller jusqu'à 10 unités.

Pour les profils de bas de versant amont avec différents types de végétations (figure Figure 2.24-D), on observe des variations globalement plus importantes en surface qu'en profondeur. En surface (>40 cm) les valeurs sont identiques pour les trois types de végétation avec des valeurs entre 20 et 30 unités. Au-delà des 40 cm les variations sont globalement plus importantes de 5 unités à proximité de l'arbre.

L'ensemble de ces mesures permettent donc de distinguer un effet des arbres. Les variations absolues d'humidité volumique sont en effet plus importantes en profondeur lorsque l'on se trouve à proximité d'un arbre. Ces variations sont plus importantes à l'amont qu'à l'aval pour la haie de mi-versant. Cela montre l'effet de la dissymétrie du système racinaire ou du sol.

On constate également un effet de la position de la haie sur le versant, où les variations d'humidité volumique avec la profondeur diminuent de façon plus importante en bas de versant qu'à mi-versant où elles ont tendance à être plus homogènes entre 80 et 140 cm. Les différences observées à proximité des haies entre ces deux positions peuvent être dues à la répartition du système racinaire, au type de sol ainsi qu'à la proximité de la nappe. La position sur le versant a également un effet sur les variations d'humidité volumique en absence de haie avec des variations en surface plus importantes en bas qu'à mi-versant.

Les variations d'humidité volumique maximales intégrées sur la totalité du profil du tube (0-140 cm) ont ensuite été calculées et sont présentées dans la figure Figure 2.25.

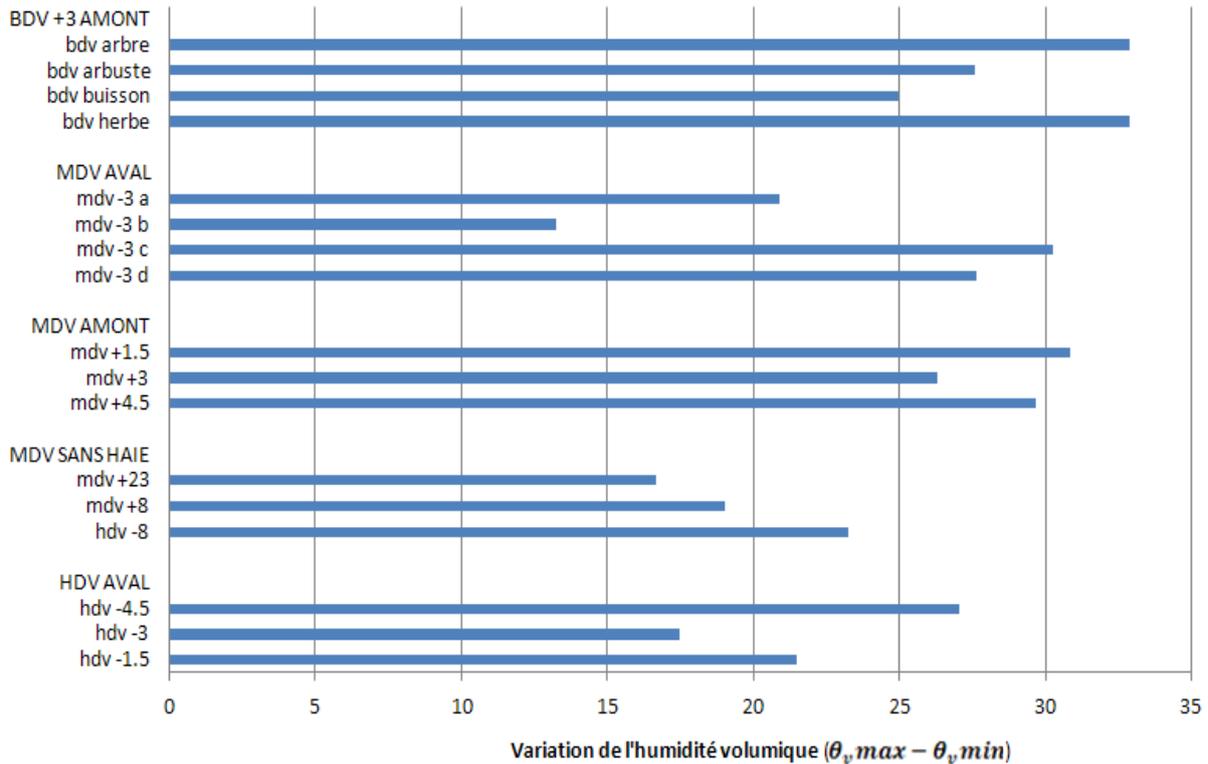


Figure 2.25 – Variations d'humidité volumique ( $\theta_{v,max} - \theta_{v,min}$ ) mesurée par la sonde capacitive intégrée sur l'ensemble du profil des tubes durant l'année de mesure (2009-2010).

Les variations d'humidité volumique montre qu'il y a une tendance à l'augmentation lorsque l'on se rapproche de la rivière soit lorsque la distance à la nappe diminue. En BDV, les variations au niveau de la zone enherbée et de la haie sont équivalentes, ces variations sont également équivalentes à celles mesurées à l'amont de la haie de MDV. Par contre les variations entre l'amont de la haie MDV et la zone sans haie présentent des différences plus importantes. En effet sur cette partie du versant les variations d'humidité volumique sont plus importantes à proximité de la haie. Les variations à l'aval de la haie de HDV sont faibles et équivalentes à la zone sans haie de MDV. A l'aval de la haie de MDV les variations sont par contre aléatoires en fonction de la position.

Les valeurs d'humidité volumique sur un transect allant du haut au bas de versant sont présentées à différentes dates sur une carte d'isovaleurs. Pour réaliser ces cartes, les données ont été interpolées par krigeage à l'aide du logiciel « Surfer » (figure Figure 2.26). Un variogramme linéaire obtenu à partir des données expérimentales a été utilisé.

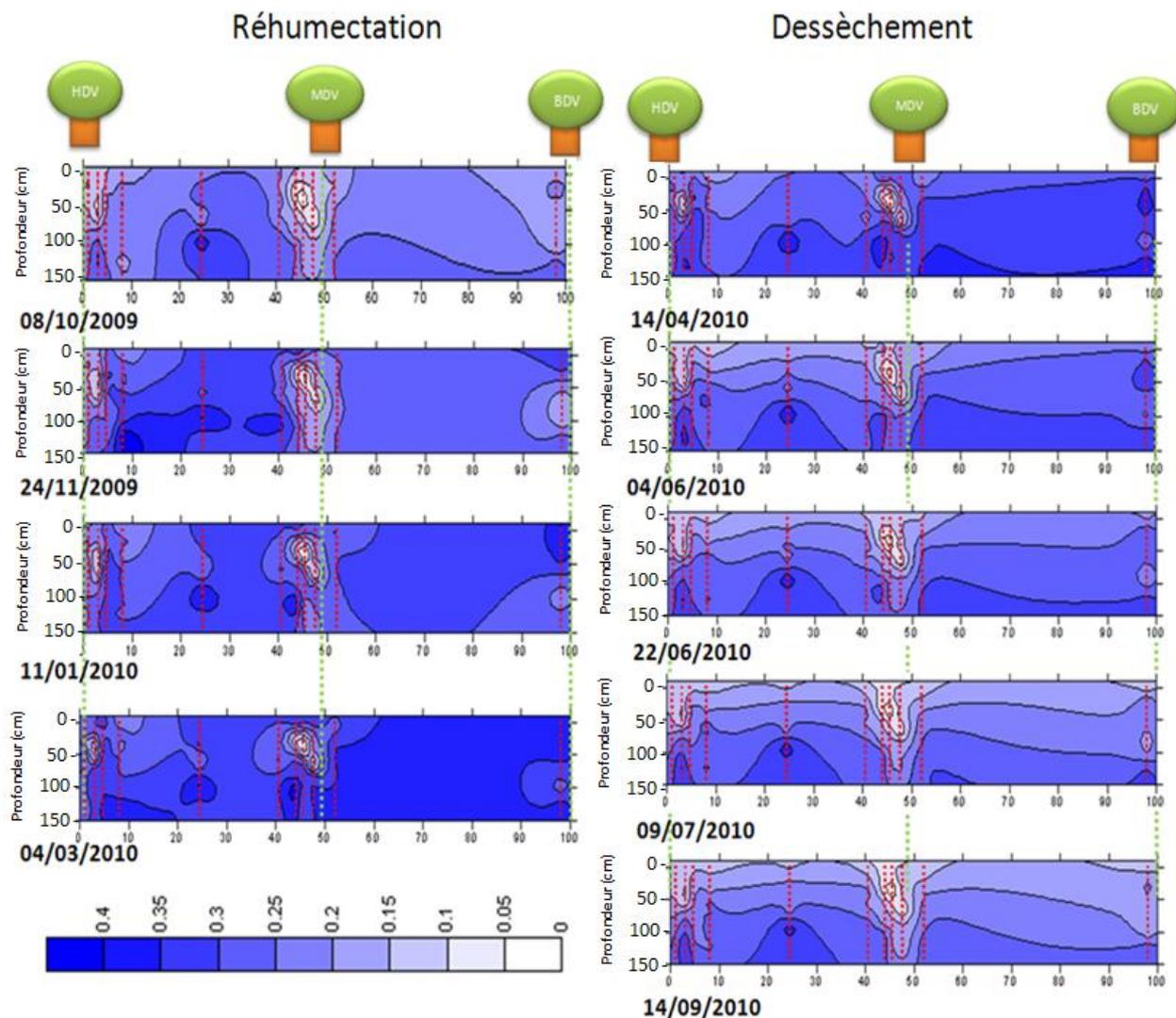


Figure 2.26 Cartes des isovaleurs de l'humidité volumique mesuré par la sonde capacitive à différentes dates sur un transect allant du haut de versant au bas de versant. Les profils et profondeurs de mesures sont représentés par des pointillés.

Sur ces cartes d'isovaleurs on distingue bien l'effet de la haie de haut et de mi-versant sur les valeurs d'humidité volumique du sol en profondeur lors de la période de dessèchement par rapport à la position entre ces deux haies. De plus les humidités volumiques à proximité des haies de haut et de mi-versant sont globalement plus faibles que celles mesurées à proximité de la haie de bas de versant. Sur ces cartes on distingue également des zones à faibles variations d'humidité volumique, notamment sous les haies de haut et de mi-versant, comme précédemment observé sur la figure Figure 2.24-B. La figure Figure 2.27 montre un exemple de variation de l'humidité volumique sur tout un profil de mesure, 3 mètres à l'amont de la haie de mi-versant, durant la période de réhumectation ainsi que durant la période de dessèchement.

## 2.5 Résultats

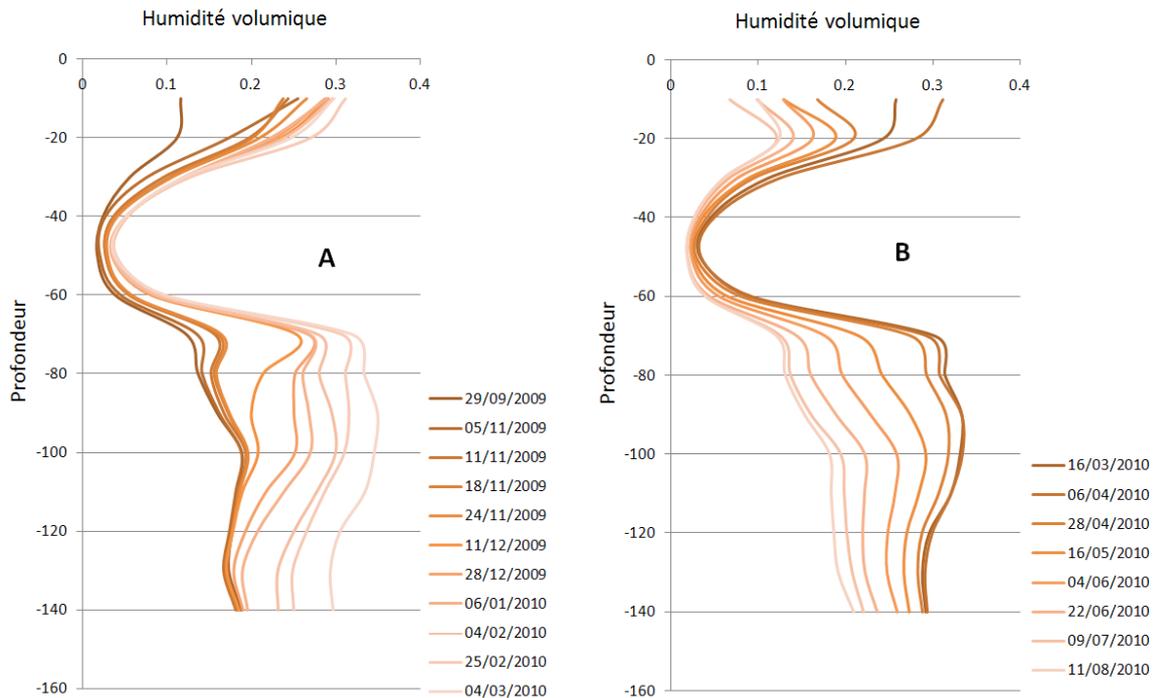


Figure 2.27 – valeurs d’humidité volumique en fonction de la profondeur à trois mètres à l’amont de la haie de mi-versant et pour différentes dates. La figure A correspond à la période de reprise des écoulements et la figure B à la période de dessèchement.

On observe qu’entre la profondeur de 40 et 60 cm l’humidité volumique est très faible et varie très peu tout au long de l’année. Cette faible variation de l’humidité volumique à ces profondeurs est observée au niveau de plusieurs tubes à l’amont de la haie de mi-versant et à l’aval de la haie de haut de versant. Les humidités volumiques mesurées correspondent à un espace soit totalement vide soit à faible porosité. Cela pourrait être lié à la présence d’éléments grossiers dense à ce niveau et donc à un faible volume de sol qui tamponne le dessèchement et la réhumectation par des écoulements préférentiels.

### 2.5.3.2.2 Effet de la haie sur les dynamiques d’humidité volumique du sol

Contrairement aux tensiomètres la sonde capacitive a permis d’obtenir des valeurs d’humidité volumique lorsque le sol était très sec. Les variations d’humidité volumique aux mêmes positions que les mesures tensiométriques du chapitre précédent sont présentées sur la figure Figure 2.28.

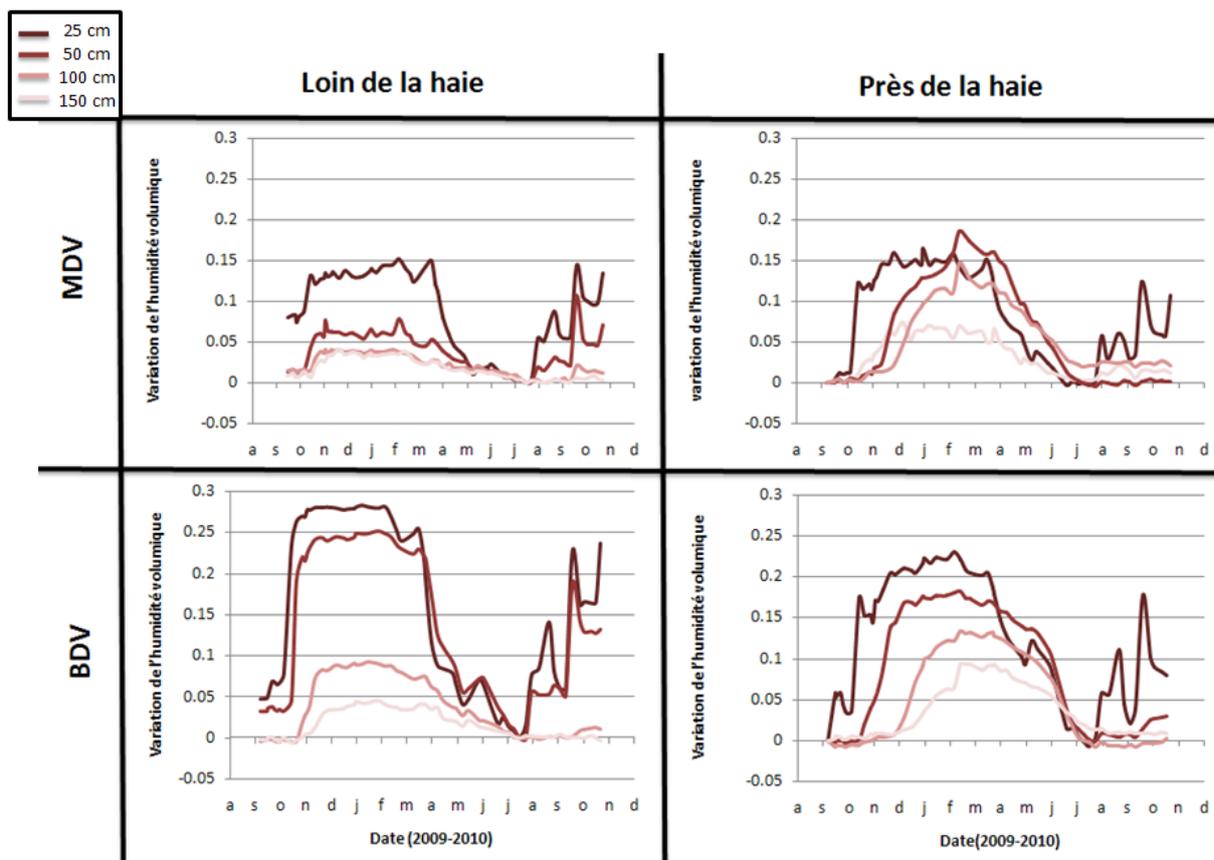


Figure 2.28 – Variation relative de l'humidité volumique par rapport à une date de référence (20/07/2010) à différentes profondeurs, pour des tubes placés loin de la haie ou à 4.5 m à l'amont en bas et à mi-versant.

A la reprise des écoulements, comme observé avec les tensiomètres, on distingue un effet haie. A partir de 50 cm, l'humidité volumique varie plus lentement à proximité de la haie par rapport à des positions sans haie que ce soit en bas ou à mi-versant. Ces observations rejoignent celles de Caubel et al. (2003). Pour l'ensemble des profondeurs considérées les variations d'humidité volumique atteignent des paliers entre début et mi-novembre dans le cas sans haie tandis qu'à proximité des haies l'humidité volumique continue à augmenter à ces profondeurs jusqu'en Février.

La période de dessèchement du sol a lieu entre Mars et Août. Sur l'ensemble des profils et pour toutes les profondeurs, l'amplitude de variation d'humidité volumique durant cette période est globalement égale à celle observée durant la période de réhumectation des sols. On retrouve alors à la fin de la période de dessèchement une humidité volumique équivalente à celle de l'année précédente à la même période. L'effet des remontées capillaires près de la haie est perceptible en bas de versant où l'amplitude de variation de l'humidité volumique décroît progressivement avec la profondeur, tandis que pour le haut de versant ces amplitudes sont assez proches pour les 100 premiers centimètres.

### 2.5.3.2.3 Effet du type de végétation de la haie sur les dynamiques d'humidité volumique du sol.

Les variations d'humidité volumique ont ensuite été comparées pour différents type de végétation en bas de versant. Soit un arbre mature, un jeune arbre, une zone de buisson et une zone enherbée sans haie (figure Figure 2.29).

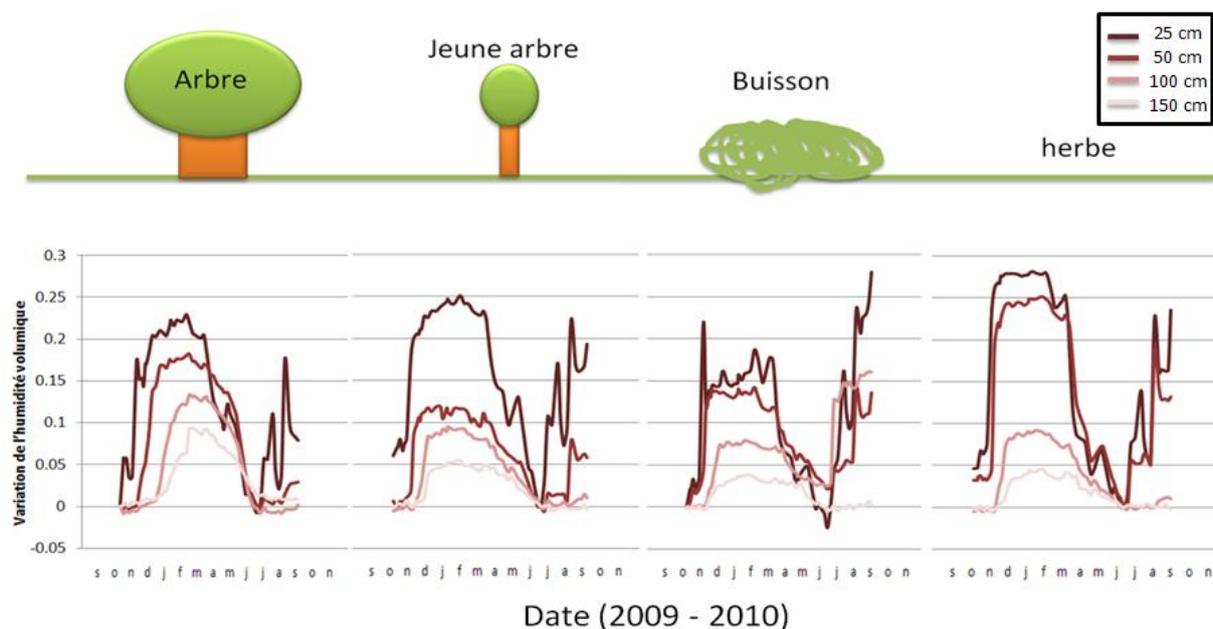


Figure 2.29 – Variation de l'humidité volumique par rapport à une date de référence (20/07/2010) à différentes profondeurs, pour des tubes placés à 4,5 m à l'amont de la haie de bas de versant présentant différents types de végétation.

On observe en fonction du type de végétation de la haie que les variations d'humidité volumique sont différentes. A proximité d'un arbre mature les variations d'humidité volumique sont plus importantes en profondeur par rapport aux autres types de végétations. Les variations les plus faibles en surface ont été observées à proximité du buisson sans doute liées à l'ombrage et à la plus faible demande en eau de ce type de végétation. La zone herbagée a présenté une forte et rapide variation dans les premiers 50 cm par rapport au autre type de végétation. L'exposition directe au soleil de cette zone a pu provoquer cette différence de variation en surface par rapport aux autres types de végétation. Les mesures effectuées en face du jeune arbre présentent des fortes variations en surface à 25 cm, mais plus faibles plus en profondeur à la différence des variations observées à proximité de l'arbre mature. On distingue donc ici la capacité de l'arbre mature à prélever l'eau à des profondeurs plus importantes que les autres types de végétation.

#### 2.5.3.2.4 Effet de l'élagage.

Au cours du mois de janvier 2010 les haies accolées à des cultures ont été élaguées sur l'ensemble de leur partie basse. Un tube de mesure d'humidité volumique avait été placé à l'aval de la haie de haut de versant à proximité d'un arbre qui a été élagué. D'autre part les arbres présents en face des autres tubes n'ont eux pas été élagués. Cela a permis d'effectuer une comparaison sur l'évolution de l'humidité volumique du sol à proximité de ces deux arbres.

La figure Figure 2.30 montre donc les variations d'humidité volumique à 3 mètres à l'aval de l'arbre qui a été élagué et à 4,5 mètres à l'aval d'un arbre non élagué de la haie de haut de versant.

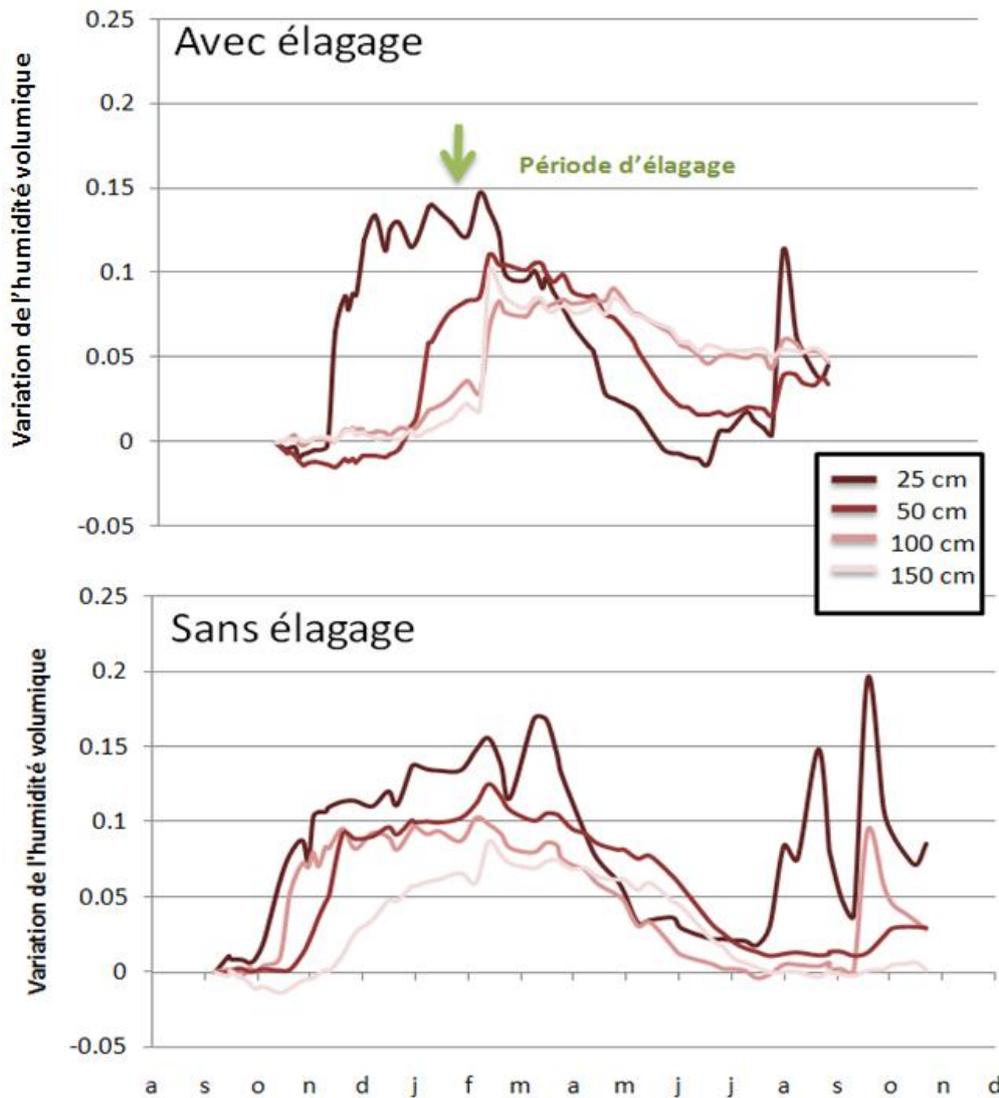


Figure 2.30 Représentation des Variations de l'humidité volumique par rapport à une date de référence (03/09/2009), à proximité (3 m aval) de deux arbres de la haie de haut de versant, dont un, a été élagué en hiver.

A proximité de l'arbre élagué les variations d'humidité volumique en profondeur (>1m) sont plus faibles durant la période de dessèchement (entre Avril et Septembre après élagage) que celles observées à proximité de l'arbre non élagué. Cette différence de variation liée à la transpiration de l'arbre pourrait être la conséquence d'une diminution de la demande climatique entre ces deux années. Cependant l'ensemble des autres profils à proximité des arbres (non élagués) du versant présentent des variations d'humidité volumique durant la période de dessèchement qui sont équivalentes aux variations d'humidité durant la période de reprise des écoulements. Ce qui implique que l'impact de la demande climatique sur la transpiration et le prélèvement en eau de ces horizons a été similaire entre les deux années. On peut donc conclure que la taille de cet arbre a entraîné une diminution de sa transpiration, ce qui est en accord avec les résultats de Namirembe et al. (2009). Cette diminution de transpiration s'est traduit par un déficit de prélèvement racinaire dans les couches profondes du sol. L'effet d'un arbre mature sur les prélèvements d'eau en profondeur est donc ici mis en avant.

### 2.5.3.3 Relation entre humidité volumique et potentiel matriciel

La figure Figure 2.31 montre les valeurs d'humidité volumique mesurées par la sonde capacitive en fonction des potentiels matriciels mesurés par les tensiomètres aux profondeurs de 25, 50, 100 et 150 cm, pour l'ensemble des profils de sols étudiés.

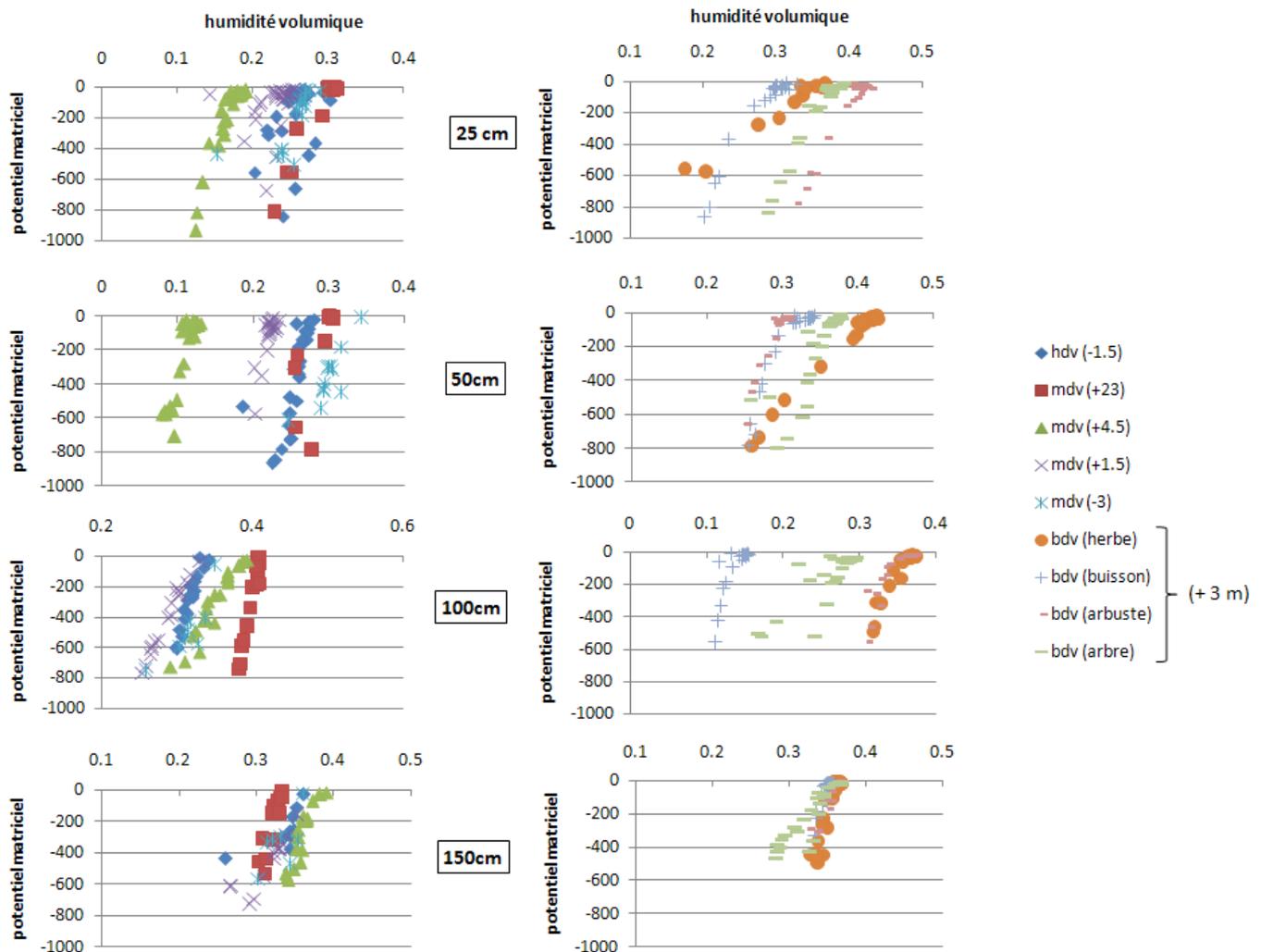


Figure 2.31 – Relation entre l'humidité volumique (%) mesurée grâce à la sonde capacitive et le du potentiel matriciel (mbar) mesuré grâce aux tensiomètres pour les profondeurs de 25, 50, 100 et 150 cm de différents profils de sols étudiés. Les graphiques de gauche correspondent aux mesures effectuées sur la partie supérieure du versant et les graphiques de droite aux mesures effectuées sur la partie inférieure du versant.

Les courbes d'humidité volumique en fonction du potentiel matriciel sont caractéristiques de la texture et de la densité apparente d'un sol. Jusqu'à 100 cm de profondeur, les gammes d'humidité volumique de chaque profil sont très variées en valeurs entre les différentes zones de mesure. La texture du sol étant similaire le long du versant (figure Figure 2.21), ces dispersions peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs :

- La présence d'éléments grossiers en proportions variées
- Des densités racinaires différentes qui peuvent provoquer le même effet que les cailloux
- Des densités apparentes de sol différentes qui vont modifier les gammes d'humidité volumique pour deux positions semblables dans le versant.

Au contraire les mesures effectuées à 150 cm présentent des humidités volumiques équivalentes, ce qui montre la plus grande homogénéité de cet horizon.

Ces différents facteurs montrent bien la difficulté de comparaison des mesures liée à l'hétérogénéité locale des sols (surtout en surface), et fausse sans doute en partie les gammes réelles d'humidité volumique des profils observés dans la figure Figure 2.25. Pour la courbe de la zone enherbée de bas de versant (sans haie) on constate une amplitude de variation plus forte que pour la haie sur les 50 premiers centimètres. Cela signifie qu'entre ces deux zones la densité apparente du sol et / ou la présence d'éléments grossiers est différente. Les variations d'humidité volumique pour la zone enherbée de bas de versant, calculé avec la même courbe de calibration que la haie, a donc sans doute été surestimé en surface.

#### 2.5.4 Variation du toit de la nappe

Le site expérimental de Pleine Fougères possède une nappe superficielle, dont le toit varie entre 1,8 et 4,1 m de profondeur sous la surface du sol en bas de versant et entre 6 et 11 m en haut de versant.

La figure Figure 2.32 présente la carte piézométrique relative à un point de référence situé au sommet du versant étudié (près de la haie de haut de versant). A la fin de la période sèche qui correspond à fin octobre en 2009 le gradient de nappe est inverse par rapport à la pente du versant. Dans cette configuration la nappe peut être alimentée par la rivière

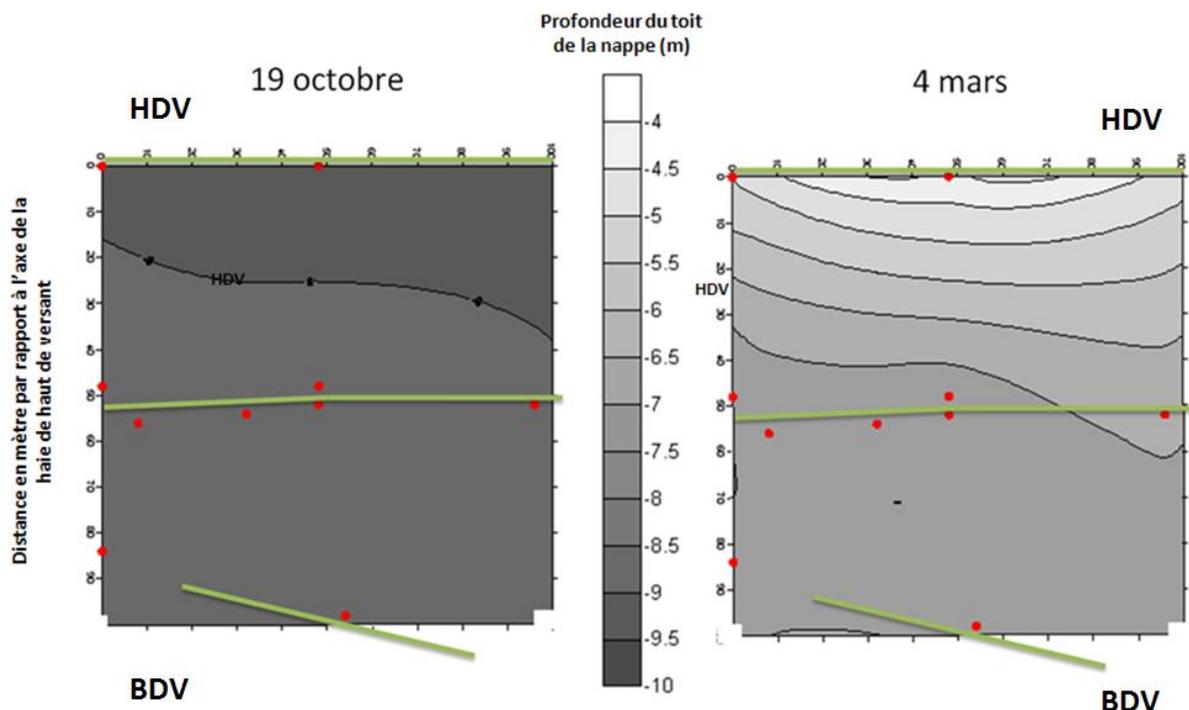


Figure 2.32 – Carte piézométrique relative à un point de référence situé au sommet du versant pour les dates du 19 octobre 2009 et du 4 mars 2010. Les traits représentent les haies et les points les piézomètres.

Après la reprise des écoulements la nappe retrouve un gradient hydraulique dans le même sens que la topographie et c'est donc la nappe qui peut alimenter la rivière. La figure Figure 2.32 montre que le gradient de nappe situé entre la haie de milieu de versant et de bas de versant est très faible et ce durant toute l'année. Au contraire sur la partie supérieure du versant la nappe possède un faible

gradient à la fin de la période sèche qui s'accroît fortement après la période de reprise des écoulements en fin d'hiver. Deux hypothèses peuvent être émises sur le comportement piézométrique de la nappe :

- Sur la partie amont du versant on peut penser que la conductivité hydraulique est plus faible que pour la partie aval, ou qu'au niveau de la haie de mi-versant les écoulements sont ralentis du fait de l'assèchement local, comme cela a déjà été discuté par Caubel (2001).

Ou bien

- Sur la partie amont du versant, le drainage vertical vers la nappe est plus important que sur la partie aval dont la pente est plus forte, produisant plus de ruissellement. La nappe se rechargeant plus vite à l'amont, le gradient de nappe serait plus élevé.

Une troisième hypothèse serait la conjonction des deux précédentes où l'on aurait un drainage plus rapide à l'amont du versant et donc des écoulements de nappe plus importants qui seraient ralentis au niveau de la haie de mi-versant du fait de l'assèchement local. Les écoulements en provenance de la zone humide du fait de l'augmentation du débit de la rivière peuvent également être ralentis au niveau de la haie de bas de versant. La zone située entre la haie de mi-versant et de bas de versant serait donc peu influencée par les conditions aux limites entraînant ainsi des variations quasiment homogènes.

La figure Figure 2.33 montre, pour différentes dates, les profondeurs du toit de la nappe le long du versant. L'échelle horizontale est plus petite que l'échelle verticale afin de bien visualiser les gradients. Après une pluie le 6 décembre, le toit de la nappe s'élève dans les parties amont et aval du versant, à l'exception de l'amont de la haie de mi-versant entraînant ainsi un gradient de nappe négatif à ce niveau. Le 9 décembre le toit de la nappe continue à s'élever plus vite sur la partie amont du versant au niveau de la haie de haut de versant, tandis que sur la partie aval du versant le toit de la nappe s'élève de manière uniforme. Le gradient de nappe négatif au niveau de la haie de bas de versant finit par s'annuler entre le 21 et le 22 décembre tandis que le gradient de nappe sur la partie haute du versant atteint  $0,02 \text{ m.m}^{-1}$ .

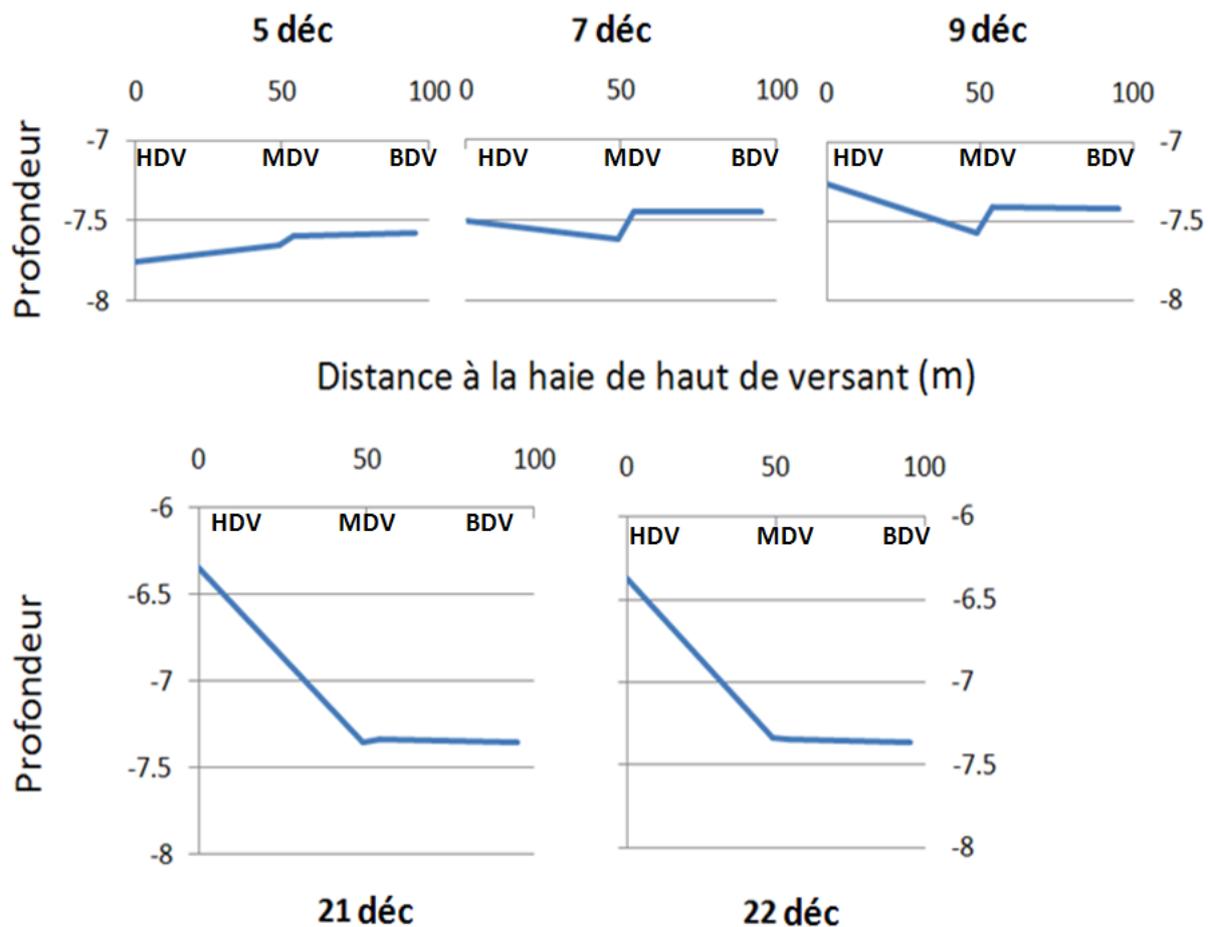


Figure 2.33- Profondeurs de la nappe, relative à un point de référence situé au sommet du versant, le long d'une ligne parallèle à la pente et passant par les piézomètres à l'aval de la haie de HDV, à l'amont et à l'aval de la haie de MDV et à l'amont de la haie de BDV à différentes dates durant la reprise des écoulements. La haie de haut de versant est symbolisée par la position 0 sur l'axe des abscisses, la haie de mi-versant est située à environ 46 m et la haie de bas de versant à 96 m.

### 2.6 Discussion et conclusion

Les résultats de ce suivi de site montrent donc que le fonctionnement hydrique du sol varie en fonction de la proximité de la haie, de sa composition, de son entretien et de sa position sur le versant.

Les arbres de la haie se différencient des autres types de végétation, par un prélèvement plus important en profondeur. L'entretien des haies semble d'ailleurs affecter les prélèvements de la haie qui se traduit par une diminution des variations de stock en profondeur. A proximité des arbres de la haie la réhumectation et le dessèchement du sol qui sont plus lents et parfois plus intenses qu'à proximité d'autres types de végétation, notamment en profondeur. Le retard de réhumectation à la reprise des écoulements est la conséquence d'un dessèchement local plus important des sols en été et de l'interception d'une partie des précipitations par le houppier de l'arbre. Le dessèchement plus lent s'explique lui par une reprise d'activité des arbres plus tardive qu'un couvert herbacé et par un effet d'ombrage.

La position de la haie sur le versant joue également un rôle important sur la dynamique hydrique du sol à proximité de la haie. Cette influence est premièrement liée à l'épaisseur variable des horizons de sol en fonction de la position amont-aval de la haie. On note par exemple une profondeur de sol de 0,8 à 1 m à l'amont de la haie de mi-versant contre moins de 0,3 m à l'aval. Sur notre site, l'épaisseur de sol à l'amont de la haie est de plus en plus importante avec la proximité du bas de versant. Cette configuration est d'ailleurs assez fréquente (Follain, 2005). Cela entraîne une augmentation de la réserve utile des sols en bas de versant autorisant donc de plus fortes variations de la teneur en eau. De plus, la proximité de la nappe en bas de versant tamponne le dessèchement du sol en profondeur qui est moins important que pour les deux autres haies positionnées plus haut dans le versant. Cette proximité de la nappe, qui favorise les remontés capillaires à travers le sol jusqu'aux horizons de surface, fournit à la haie une réserve d'eau supplémentaire. On peut ainsi supposer que la haie de bas de versant a un effet plus important sur les écoulements de subsurface de par ces prélèvements dans la nappe.

Le suivi piézométrique de ce site nous incite à conclure à un effet des haies sur la dynamique de recharge de la nappe. Cet effet des haies a déjà été mis en avant dans la littérature, notamment au niveau de haie de bas de versant (Caubel 2001, Gazavi 2008). Dans le cas d'un effet des haies plus en amont dans le versant sur les dynamiques de recharge de la nappe, comme le laisserait suggérer les observations du site, on pourrait se questionner sur l'effet conjugué de plusieurs haies sur un versant. Cependant, il paraît difficile de distinguer quelle est la part de la haie dans cette dynamique et comment la structure géologique du versant intervient.

L'ensemble de ces résultats sont donc encore à consolider du fait des variabilités pédologiques, climatiques et paysagères du site suivi, qui rendent les interprétations difficiles. De plus le manque de répliques à chaque niveau du versant ainsi que l'étude d'une seule année de mesure, ne permettent pas de généraliser les observations effectuées.

Nous avons cependant observé ici l'influence locale de différentes haies sur la dynamique de l'eau dans le sol et montré leur variabilité en fonction de différents facteurs. Cet impact local, ainsi que l'effet cumulé d'un réseau de haies sur un versant et sur un bassin versant, pourrait avoir des conséquences sur la dynamique spatiale et temporelle du bilan hydrogéochimique à l'échelle du

bassin versant. Afin d'étudier les conséquences de la présence d'un réseau bocager sur un bassin versant, les connaissances acquises à travers la bibliographie et durant l'étude de ce site expérimental ont par la suite été introduites dans le modèle agro-hydrologique TNT2.



### 3 Développement d'un module haie dans le modèle spatialisé TNT2

La haie présente une transpiration plus importante qu'un couvert agricole et joue un rôle dans le stockage et le recyclage de l'azote du sol. Son impact sur les bilans d'eau et d'azote d'un bassin versant est donc à considérer. Ce chapitre présente l'introduction d'un nouveau module de fonctionnement de la haie dans le modèle spatialisé TNT2, qui a permis de prendre en compte le réseau bocager d'un bassin versant et ses interactions avec les cultures pour modéliser les flux d'eau et d'azote.

#### 3.1 Le Modèle TNT2

##### 3.1.1 Brève description de TNT2

TNT2, pour « Topography-based Nitrogen Transfer and Transformation » est un modèle conceptuel à base physique développé pour l'étude des flux d'azote dans les petits bassins versants. Le modèle est entièrement décrit dans Beaujouan et al. (2002). Les calculs sont distribués spatialement selon des mailles carrées découpées à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT), et s'effectuent au pas de temps journalier.

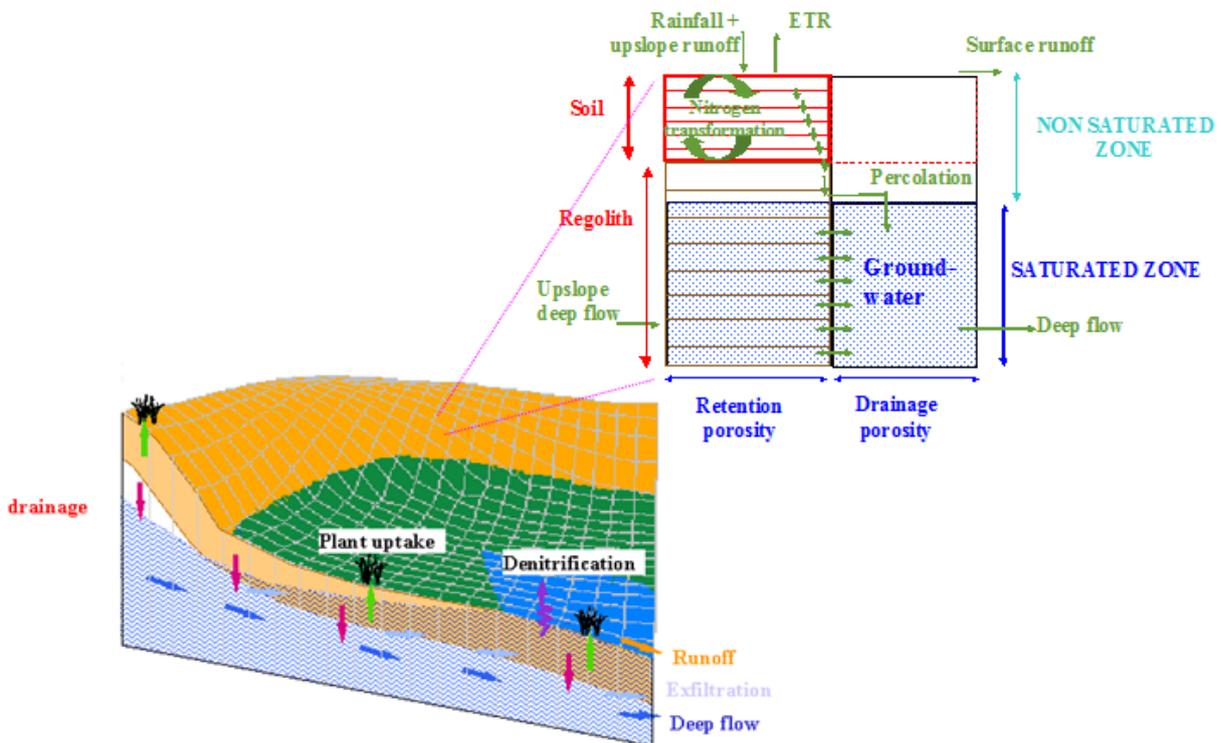


Figure 3.1- Représentation schématique du fonctionnement du modèle TNT2 (Beaujouan et al., 2002)

C'est un modèle qui associe un module de transfert de l'eau et des nitrates pseudo 3D dans le bassin versant et un modèle agronomique et biogéochimique 1D.

Le module hydrologique de TNT2 reprend les hypothèses principales du modèle TOPMODEL (Beven et al., 1984), à savoir un gradient hydraulique constant égal à la pente topographique par rapport à la rivière, et une décroissance exponentielle de la conductivité hydraulique avec la profondeur.

La modélisation de la transformation de l'azote et de la croissance des cultures est directement adaptée du modèle STICS (Brisson et al., 2003) qui simule l'évolution du système sol-culture en fonction des variables climatiques et des ressources du sol en eau et azote.

Le module de dénitrification est adapté du modèle NEMIS (Henault and Germon, 2000) qui simule la dénitrification hétérotrophe dans les sols en fonction de leur teneur en eau, de leur teneur en nitrate et de la température. Dans TNT2, un contrôle supplémentaire a été introduit, le temps de résidence moyen de l'eau dans le sol superficiel, afin de prendre en compte les conditions circulantes de l'eau dans les zones humides de bas de versant, qui limitent l'anoxie et influencent la dénitrification (Oehler et al., 2009).

#### 3.1.2 Calcul du bilan d'eau et interactions entre zones saturée et non saturée

Une spécificité de TNT2 est de simuler la remontée de la nappe superficielle dans les sols, notamment en bas de versant, et les échanges qu'elle entraîne. Verticalement chaque maille est divisée en trois réservoirs correspondant au sol superficiel "S" d'épaisseur "SD", au sol profond "I" d'épaisseur "ID" et à l'altérite "R" d'épaisseur "RD".

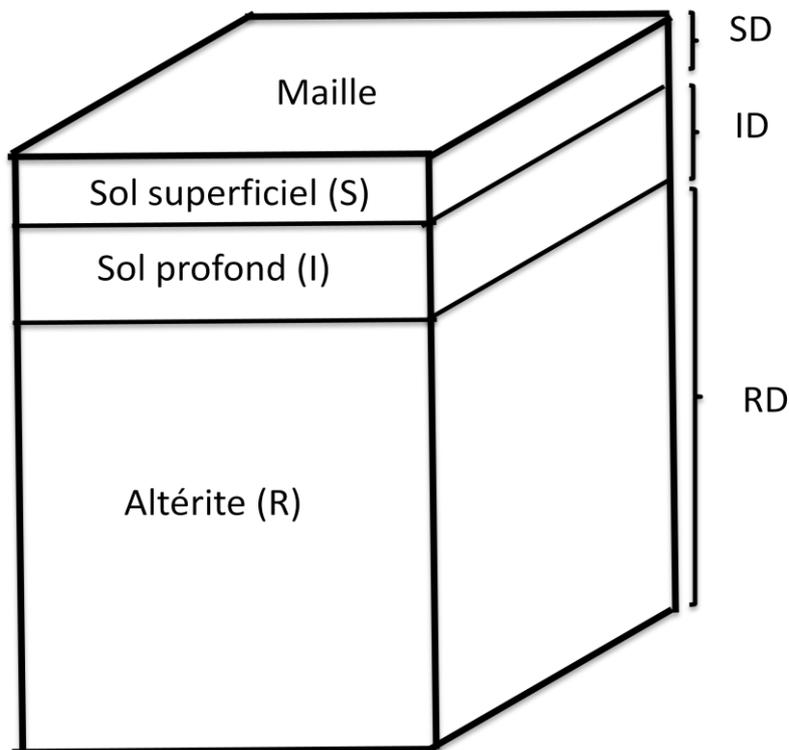


Figure 3.2 – Représentation schématique d'une maille et de ses réservoirs. SD, ID, et RD sont respectivement les épaisseurs des réservoirs S, I et R

Les épaisseurs de ces réservoirs sont des paramètres du modèle. Par ailleurs chaque réservoir est discrétisé en couches élémentaires permettant d'affiner les calculs. L'épaisseur de ces couches élémentaires est une entrée du modèle et a été fixée à 0.1 m.

La notation utilisée ici pour la description du modèle est la même que celle proposée par Beaujouan et al. (2002). La porosité ( $\eta$ ) est divisée en porosité de rétention ( $\eta^r$ ) et de drainage ( $\eta^d$ ). Les valeurs de porosités sont des paramètres du modèle avec respectivement  $\eta_s^r$  et  $\eta_s^d$  les porosités de rétention et de drainage pour le sol superficiel,  $\eta_i^r$  et  $\eta_i^d$  les porosités de rétention et de drainage pour le sol

profond, et  $\eta_R^r$  et  $\eta_R^d$  les porosités de rétention et de drainage pour l'altérite. L'épaisseur et la porosité déterminent la capacité de chaque réservoir. La quantité d'eau dans la porosité de drainage permet de distinguer la zone saturée et non saturée. L'eau disponible pour les plantes dans la maille ( $ASW_m$ ) est l'eau contenue dans la porosité de rétention pour les sols superficiel et profond. La quantité maximale d'eau du sol disponible pour les plantes est donc :

$$Max\_ASW_m = SD \eta_s^r + ID \eta_i^r$$

Le réseau de drainage dans le bassin est calculé à partir des altitudes des différentes mailles. Les paramètres permettant de calculer les écoulements de la nappe sont la transmissivité hydraulique ( $T_0$ ) et le facteur de décroissance exponentielle de la conductivité hydraulique avec la profondeur ( $m$ ).

A chaque pas de temps le bilan en eau dans chaque maille est estimé en calculant successivement :

- (1) les entrées d'eau en surface et les écoulements profonds en provenance des mailles situées topographiquement en amont.
- (2) les écoulements d'eau de la nappe vers les mailles situées topographiquement en aval selon la loi de Darcy, dont la pente est fonction de la topographie entre la maille et la rivière. Si les entrées sont supérieures au flux d'eau maximum de la maille, le surplus est exfiltré sous forme de ruissellement vers la ou les mailles aval.
- (3) l'équilibre en eau des deux porosités de rétention et de drainage avec la nouvelle position de la nappe. La profondeur de la nappe détermine quelles couches doivent avoir une porosité de rétention à saturation. Pour les couches où la porosité de rétention n'est pas saturée, l'eau nécessaire pour atteindre la saturation est prélevée dans la porosité de drainage.
- (4) l'évapotranspiration et la remontée capillaire.
- (5) le transfert vers la zone non saturée et la percolation qui correspond au drainage de l'eau infiltrée à travers la porosité de rétention au dessus de la nappe. S'il y a suffisamment d'eau pour remplir la porosité de rétention, l'eau en excès atteindra la nappe par percolation au cours du pas de temps suivant.

### 3.1.3 Croissance des cultures et interaction avec les ressources.

La croissance des cultures et leurs interactions avec les ressources d'une maille sont adaptées du modèle STICS. Nous reprenons ici les principaux éléments de présentation du modèle STICS (Brisson and Mary, 2002).

C'est un modèle de fonctionnement des cultures à pas de temps journalier. Ses variables d'entrées sont relatives au climat (ETP, rayonnement, températures minimales et maximales, précipitations), au sol et au système de culture. STICS simule le bilan d'eau, de carbone et d'azote au niveau du système sol-plante-atmosphère et permet de calculer à la fois des variables agricoles (rendement, consommations d'intrants) et des variables environnementales (pertes d'eau et de nitrate) dans diverses situations agricoles. La culture est appréhendée globalement par sa biomasse aérienne, sa teneur en azote et son indice foliaire. Le sol est assimilé à une succession de couches horizontales, chacune de ces couches étant caractérisée par sa réserve en eau, en azote minéral et en azote organique. Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par les racines, celles-ci étant définies par une distribution de densité racinaire dans le profil de sol. La croissance de la culture est pilotée par le bilan de carbone : interception du rayonnement solaire par le feuillage puis

transformation en biomasse aérienne qui est orientée vers les organes de récolte pendant la phase finale du cycle de croissance. Le bilan azoté de la culture est simulé parallèlement au bilan de carbone, dont il dépend en partie. Selon le type de plante, le développement de la culture est piloté soit par un indice thermique (degrés-jours), soit par un indice photothermique ou vernalo-photothermique. Le modèle de développement est utilisé pour faire évoluer l'indice foliaire et définir la phase de remplissage des organes récoltés. L'existence éventuelle de stress (déficits hydrique ou azoté, températures gélives ou échaudantes, excès d'eau) est prise en compte au travers d'indices qui peuvent réduire la croissance végétative et celle des organes de stockage. Ces indices sont calculés dans les bilans hydrique, azoté ou énergétique.

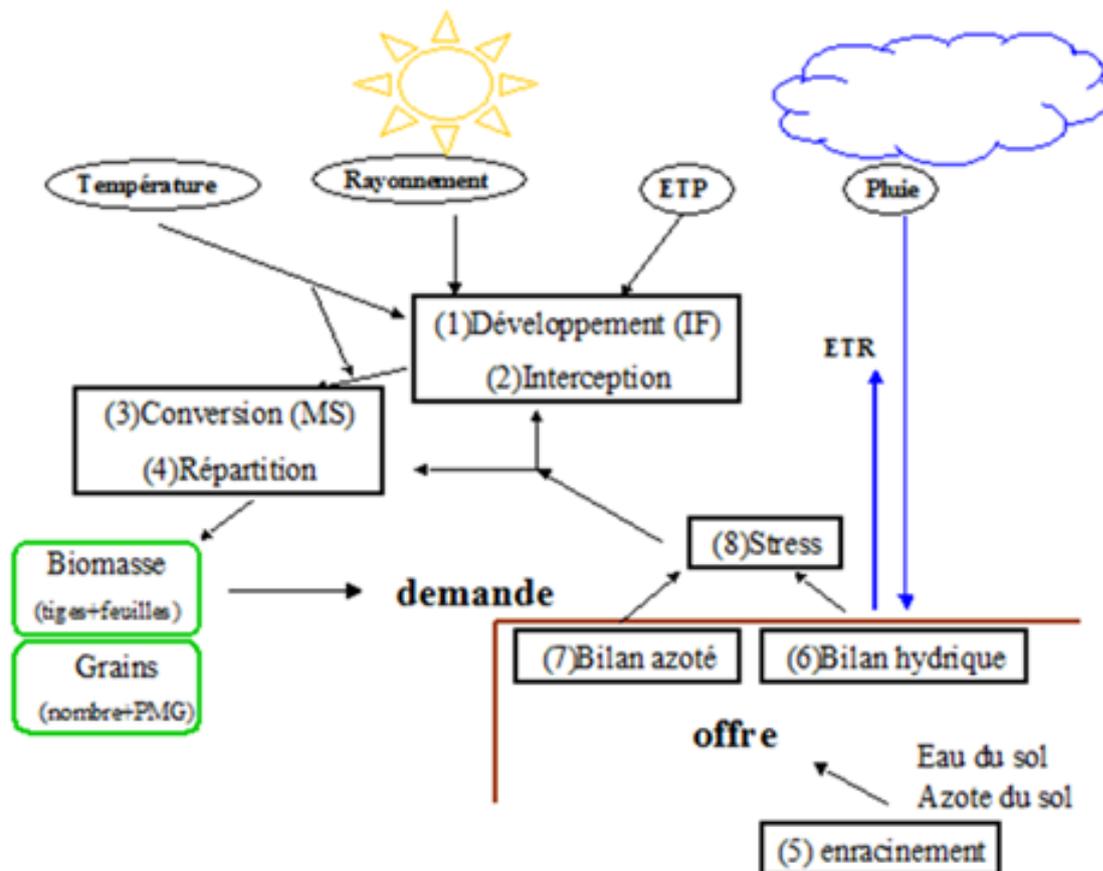


Figure 3.3 – Schéma de fonctionnement du modèle STICS.

Les indices de stress sont des valeurs comprises entre 0 et 1 qui interviennent dans les calculs sous forme multiplicative et qui réduisent les fonctions vitales de la plante. Ces indices sont calculés en fonction des variables de stress suivantes (seuls les indices influencés par la haie sont détaillés ici) :

- La teneur en eau de la réserve utile (teneur en eau au dessus du point de flétrissement) influence l'indice de confort hydrique de la plante qui est défini par le rapport  $ETR/ETM$
- L'offre en nitrate du sol influence l'indice de satisfaction des besoins en azote qui est défini par le rapport entre la concentration en azote dans la plante et la concentration critique. Cette concentration critique prend en compte les modulations introduites par la demande des organes de stockage. Cet indice admet une valeur seuil de 0,3.

- L'excès d'eau influence l'indice d'anoxie du système racinaire qui correspond à la proportion de racines ennoyées.

L'effet des techniques culturales (fertilisation, fauche, etc.) sur le fonctionnement du système sol-culture-climat est pris en compte, sachant que la spécificité des cultures repose à la fois sur leur fonctionnement écophysologique mais aussi sur les itinéraires techniques qui leur sont appliqués.

## 3.2 Modification apportée au modèle TNT2 sur les gradients d'écoulement.

### 3.2.1 Position du problème

Dans TNT2 les écoulements dans la nappe s'effectuent toujours des mailles situées topographiquement à l'amont vers les mailles situées topographiquement à l'aval. Or il a été montré que des gradients de nappe inverses (c.à.d. inverses par rapport au schéma précédent) peuvent se créer localement du fait de la présence d'une haie. Ceci est dû à l'interception des précipitations par la canopée et aux prélèvements racinaires, qui diminuent la recharge de la nappe sous la haie (Caubel 2003, Ghazavi 2008). Dans TNT2 la prise en compte des gradients inversés (d'une maille aval vers une maille amont) est incompatible avec la structure du modèle, car le schéma de drainage est calculé une seule fois en début de simulation uniquement en fonction de la topographie. Afin de prendre en compte ces inversions de gradient une modification de la modélisation des écoulements dans TNT2 a été réalisée.

### 3.2.2 Prise en compte d'un gradient nul ou négatif.

Nous avons introduit un formalisme qui annule les écoulements profonds vers l'aval en cas d'inversion de gradient de nappe. Dans TNT2 les écoulements sont multidirectionnels, c'est-à-dire qu'il y a une distribution de l'écoulement profond d'une maille vers les mailles topographiquement situées en aval selon des proportions calculées par un algorithme type D8 (Ocallaghan and Mark, 1984).

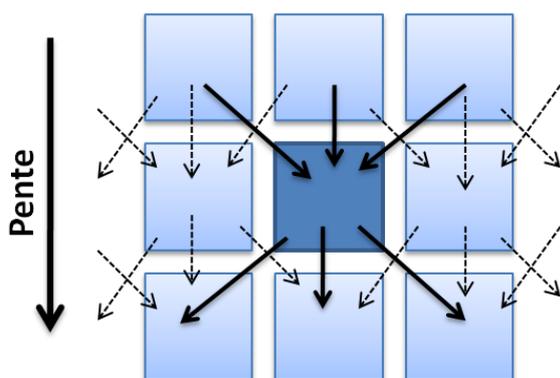


Figure 3.4 – Représentation des écoulements multidirectionnels de la nappe d'une maille (au centre) en fonction de la topographie

Lorsque le niveau de la surface piézométrique de la nappe dans une maille, par rapport à un point de référence, est inférieur ou égal au niveau de la surface piézométrique d'une (ou plusieurs mailles) à

### 3.3 Description de la maille « double couvert »

l'aval, l'écoulement (ou les écoulements) profond entre ces mailles est fixé à zéro. Dans les autres cas on conserve le schéma classique des écoulements.

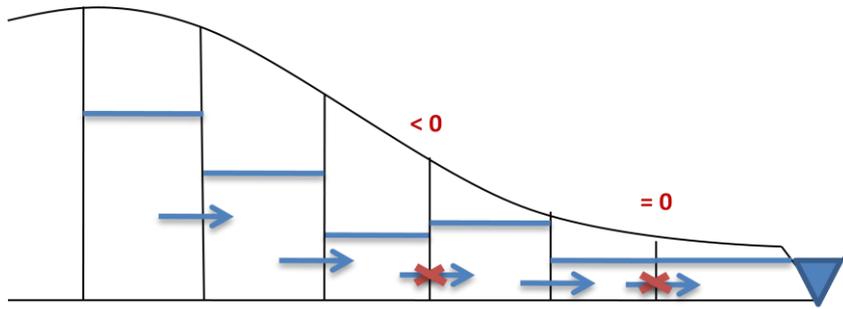


Figure 3.5 – Principe de la modification des écoulements de nappes dans TNT2.

Ce formalisme ne permet donc pas de générer des écoulements dans le sens inverse à la pente, mais prend en compte les inversions de gradient en stoppant les écoulements.

### 3.3 Description de la maille « double couvert »

Les mécanismes modélisés pour la haie sont en partie adaptés du fonctionnement du modèle STICS présent dans TNT2

#### 3.3.1 Position du problème

Dans la version initiale du modèle, chaque maille possède un seul couvert et un certain nombre d'attributs (teneur en eau, évapotranspiration, etc), dont chacun a une valeur unique à un instant donné. La présence d'une haie dans une maille (à savoir une structure linéaire boisée d'une largeur inférieure à la taille de la maille) a amené à considérer un double couvert (culture et arbres, prairie et arbres). Chaque type de végétation va se comporter différemment, notamment en termes de profondeur racinaire, d'évapotranspiration et d'absorption et de nutriments, à chaque pas de temps. On affectera ensuite à la maille dite « double couvert » la moyenne des valeurs d'humidité pondérée en fonction du rapport de surface des deux couverts.

#### 3.3.2 Proportion des couverts dans la maille

Les mailles double couvert correspondent aux mailles où sont présentes une surface de culture et une haie. Ces deux couverts ne sont pas spatialisés mais il est possible de calculer les ratios des surfaces qui leur sont associées et qui permettent de pondérer les calculs qui leur sont affectés. Ces ratios sont déterminés à partir de la superposition d'une carte des linéaires de haies d'un bassin versant et de la grille des mailles du modèle (Figure Figure 3.6).

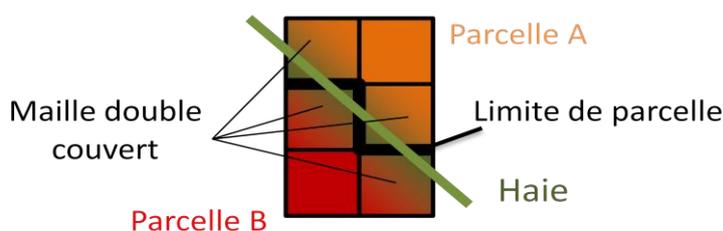


Figure 3.6 – Formation de mailles double couvert situées entre deux parcelles cultivées A et B.

Lorsqu'un linéaire de haie coupe une maille, la longueur de ce linéaire dans la maille ( $L_h$ ) est convertie en surface en multipliant cette longueur par la largeur théorique de la canopée ( $L_{max}$ ) qui

est une entrée du modèle. On obtient ainsi un ratio de haie dans la maille en divisant cette surface par la surface de la maille ( $A_m$ ). La surface occupée par la haie est ensuite répartie en deux sous ratios correspondant à une zone de haie seule et à une zone en interaction avec la culture. Cette zone d'interaction correspond à la zone de culture recouverte par la canopée et de superposition du système racinaire haie-culture. Ces deux zones sont déterminées à partir de la largeur de la zone de haie seule ( $H_{sol}$ ) qui est également un paramètre d'entrée.

On distingue donc au total trois zones (Figure Figure 3.7):

- (1) Une zone de haie seule correspondant à l'intervalle entre deux champs ou à la surface qu'occupe la haie au sol, de ratio  $R_h$ .
- (2) Une zone de culture recouverte par la canopée de la haie, et où l'on a superposition des systèmes racinaires des deux couverts qui occupent une surface de ratio  $R_{ch}$ .
- (3) Une zone de culture seule qui occupe une surface de ratio  $R_c$ .

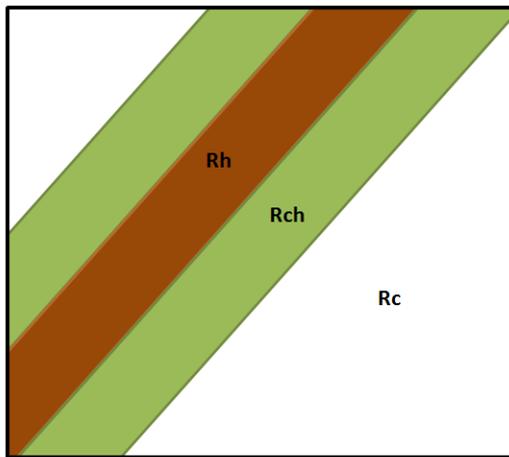


Figure 3.7 - Représentation schématique d'une maille double couvert, avec le ratio de surface avec la haie seule ( $R_h$ ) qui correspond à l'intervalle entre deux champs (bois), le ratio de surface avec la culture sous canopée de la haie ( $R_{ch}$ ) et le ratio de surface avec la culture seule ( $R_c$ ).

Les trois ratios de la maille double couvert peuvent donc s'exprimer par les formules suivantes :

- $R_h = L_h \times H_{sol} / A_m$
- $R_{ch} = (L_h \times L_{max} - R_h) / A_m$
- $R_c = (A_m - (R_h + R_{ch})) / A_m$

Les différents ratios permettent de pondérer les calculs sur la haie et la culture, mais le développement de la culture est uniforme, c'est-à-dire que les variables de développement (comme le LAI) ou de prélèvement en ressource sont globales pour la culture. Il n'y a pas de distinction entre la zone  $R_{ch}$  et la zone  $R_c$ .

Cette méthode permet de s'affranchir des contraintes de la géométrie du réseau bocager par rapport au découpage raster des mailles du modèle évoqué par Bocher (2005), ainsi que de s'affranchir de la résolution des mailles car le ratio s'adapte à la taille de la maille.

Selon l'enquête TerUti-LUCAS (2008), effectuée par la DRAAF et traitée par le SCEES, près de la moitié du linéaire de haie breton présente une largeur de canopée comprise entre 4 et 8 m, la largeur moyenne de la canopée des haies étant de 7 m. Lotfi (2008), estime cette largeur à 8 m au

cours d'une étude moins vaste mais plus précise. La valeur moyenne de 8 m pour la largeur de la canopée de la haie a donc été retenue.

### 3.4 Processus ou fonctions associées aux haies

La compétition pour la lumière, l'eau et l'azote va être fonction du ratio de haie présent dans chaque maille double couvert et des caractéristiques de la haie, telles que le développement de la canopée, le développement du système racinaire et la croissance en biomasse. Ces caractéristiques variant avec l'entretien des haies, les fonctions permettant de les décrire ont été formalisées et intégrées dans le modèle afin de prendre en compte cette gestion.

#### 3.4.1 Développement de la canopée

La caractérisation de la canopée de la haie dans le modèle se fait à partir de sa largeur et du LAI. Le LAI varie tous les ans à partir du débourrement qui est fonction de la somme des degrés jour, de 0 (absence de feuilles) à une valeur annuelle ( $LAI_a$ ). L'entretien des haies va avoir un effet sur cette valeur annuelle ainsi que sur la largeur de la canopée (figure Figure 3.8).

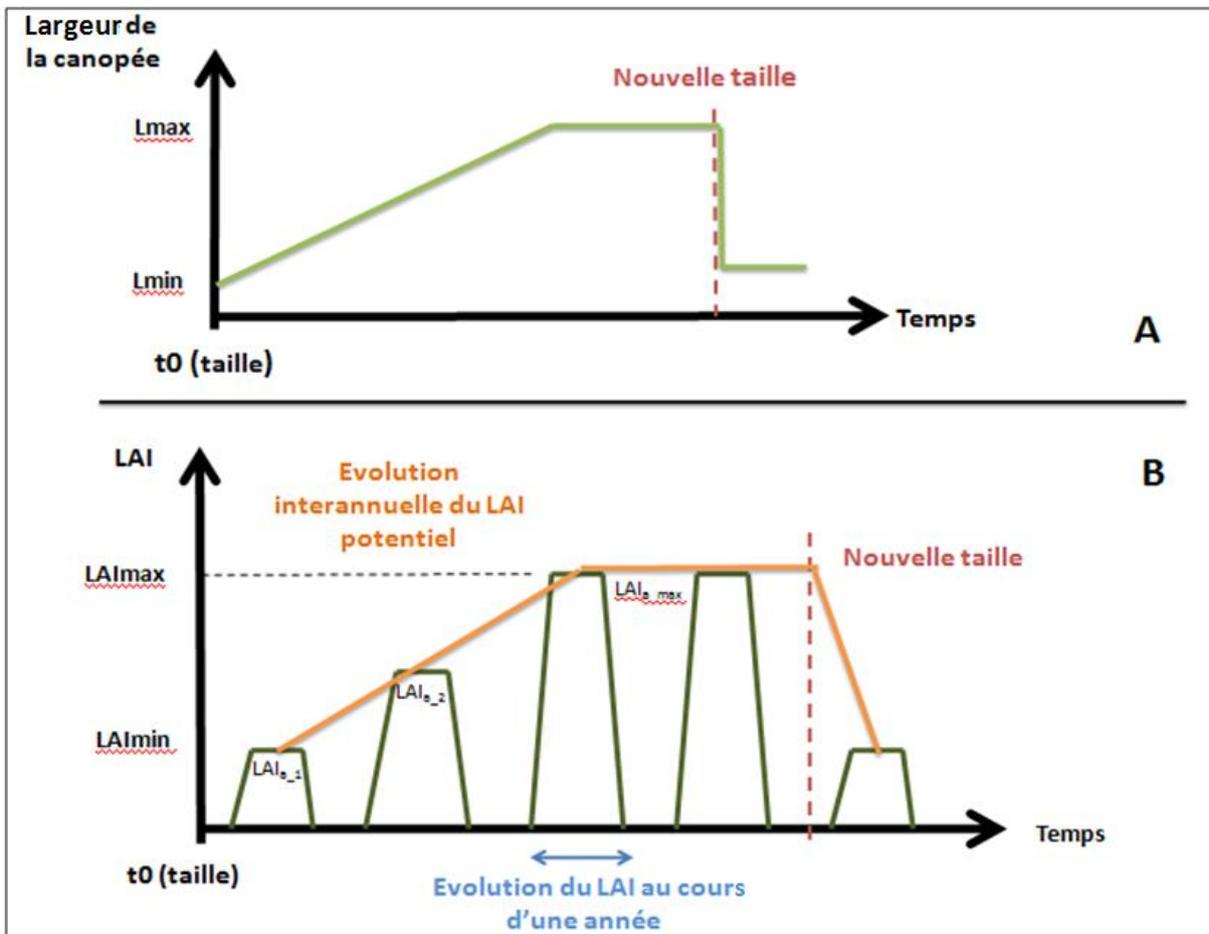


Figure 3.8 – Représentation schématique de la variation interannuelle de la largeur de la canopée (A) et, inter et intra annuelle du LAI (B) entre deux tailles.

Il n'existe aucune référence bibliographique connue sur le développement de la canopée d'une haie mature en termes de développement du LAI et de la largeur de la canopée après élagage. Les seules informations dont on dispose concernent la fréquence d'élagage à partir de documents historiques et le temps nécessaire pour que la canopée retrouve sa dimension initiale. Bien que la vitesse de

croissance de la canopée d'un jeune arbre après élagage ait déjà été étudiée (Chandrashekara, 2007), ces vitesses sont très variables en fonction de l'intensité et du type de taille, de l'âge de l'arbre et de l'essence. Pour les simulations où l'entretien des haies sera pris en compte, nous avons donc considéré un accroissement linéaire de la surface de la canopée et du LAI entre la date de la taille et la date à laquelle la haie retrouve son extension d'origine. Ceci constitue une première approche permettant d'estimer les effets d'une diminution de l'extension de la canopée et du LAI engendrée par la taille.

L'évolution interannuelle de la largeur de la canopée ( $L$ ) et de son LAI annuel, va donc être une fonction du temps écoulé depuis la dernière taille ( $t_t$ ). Ces variations sont simulées par les équations suivantes.

- Si  $t_t < Y$

$$L = L_{min} + t_t (L_{max} - L_{min})/Y$$

$$LAI_a = LAI_{min} + t_t (LAI_{max} - LAI_{min})/Y$$

- Si  $t_t > Y$

$$L = L_{max}$$

$$LAI_p = LAI_{max}$$

Où  $Y$  est le nombre d'années nécessaire pour que la haie retrouve l'extension de la canopée d'avant taille,  $L_{min}$  et  $LAI_{min}$  sont respectivement la largeur de la canopée et le LAI annuel après élagage;  $L_{max}$  et  $LAI_{max}$  sont respectivement la largeur de la canopée et le LAI annuel maximal. La fréquence de taille ( $ft$ ) est un paramètre de la haie.

Les variations du LAI et de la largeur de la canopée vont avoir une incidence sur la part de l'interception du rayonnement global de la maille. Les variations de la largeur de la canopée n'ont pas d'incidence sur les ratios de la maille, car ils dépendent plutôt de la projection du système racinaire qui est fixe.

### 3.4.2 Interception lumineuse

La haie étant la strate végétale supérieure, elle va intercepter une partie du rayonnement solaire de la maille qui ne sera plus disponible pour le couvert agricole sous-jacent. La quantité de rayonnement disponible pour le couvert agricole après interception de la haie ( $I_c$ ) est calculées selon l'équation suivante inspirée de van der Werf et al. (2007):

$$I_c = I[R_c + R_{ch}(1 - e^{-extin \times LAI_t})]$$

L'interception lumineuse de la haie est fonction de la taille, pour les simulations où l'entretien des haies sera pris en compte.

### 3.4.3 Variation de biomasse

Les variations en biomasse de la haie ( $dB_t/dt$ ) dans une maille sont calculées selon l'équation suivante inspirée de van der Werf et al. (2007):

$$\frac{dB_t}{dt} = I(1 - e^{-extin \times LAI_t}) \varepsilon_t W_t A_c$$

Où  $I$  est le rayonnement global ( $MJ.m^{-2}.j^{-1}$ );  $extin$  est le coefficient d'extinction;  $LAI_t$  est le LAI actuel;  $\varepsilon_t$  (g de matière sèche par MJ de radiation interceptée) est le coefficient de conversion de l'énergie solaire en matière sèche;  $A_c$  la surface de la canopée;  $W_t$  exprime l'effet relatif du potentiel hydrique du sol et de la demande climatique sur la croissance de l'arbre, il correspond au rapport de la transpiration réelle sur la transpiration maximale.

### 3.4.4 Système racinaire

Par hypothèse on considère que le système racinaire de la haie s'étend latéralement sur la même surface que le développement maximal de la canopée. La densité racinaire de la haie (RLD) est fonction de la profondeur ( $Z$ ) et est définie par les équations suivantes inspirées de Braud (1995b).

Pour  $0 < Z < Z_{opt}$

$$RLD(Z) = M_{rd} \times Z / Z_{opt}$$

Pour  $Z_{opt} < Z < Z_{pmr}$

$$RLD(Z) = M_{rd} \left[ 1 - (1 - p_{mr}) \frac{(Z - Z_{opt})}{(Z_{pmr} - Z_{opt})} \right]$$

Pour  $Z_{pmr} < Z < Z_{max}$

$$RLD(Z) = \frac{M_{rd} \times p_{mr} (Z_{max} - Z)}{2(Z_{max} - Z_{pmr})}$$

Pour  $Z > Z_{max}$

$$RLD(Z) = 0$$

Où  $M_{rd}$  est la densité racinaire maximum,  $Z_{opt}$  est la profondeur à laquelle la densité racinaire est maximale,  $Z_{pmr}$  est la profondeur pour laquelle la densité racinaire est  $P_{mr} \times M_{rd}$  (avec  $P_{mr}$  un ratio compris entre 0 et 1), et  $Z_{max}$  la profondeur maximale du système racinaire.

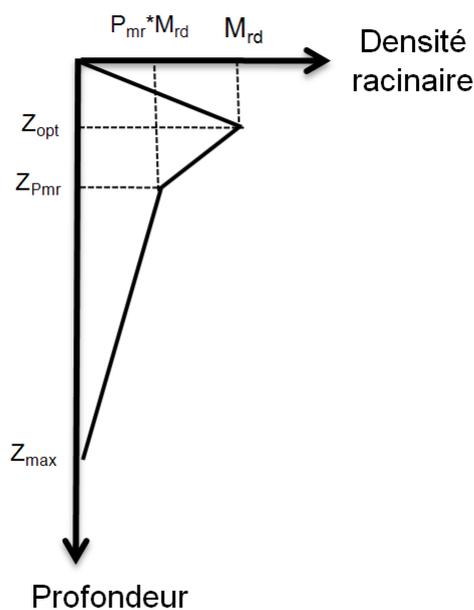


Figure 3.9 - Représentation schématique de la densité racinaire avec la profondeur inspirée de Braud (1995b).

Dans TNT2 la végétation ne peut prélever que dans le sol et pas dans l'altérite. La longueur racinaire efficace totale ( $RLD_e$ ) capable de prélever de l'eau et l'azote dans le sol est donc :

$$RLD_e = \int_0^{(SD+ID)} RLD(Z). dz$$

Les paramètres utilisés pour la représentation du système racinaire (pour le chêne) sont donnés dans le tableau Tableau 3.1.

Paramètres	Valeurs	Référence
$Z_{opt}(m)$	0,25	(Lucot and Bruckert, 1992)
$Z_{pmr}(m)$	2,00	
Prm	0,50	
$Z_{max}(m)$	4,00	(Canadell et al., 1996; Lucot and Bruckert, 1992)
$Mrd (m.m^{-3})$	0,25	

Tableau 3.1 – Paramètres utilisés pour le système racinaire

De nombreux auteurs (Bayala et al., 2004; Jackson et al., 2000; Jones et al., 1998; Peter and Lehmann, 2000) ont constaté une diminution de la densité du système racinaire des arbres par nécrose après leur élagage. Pour les simulations où l'entretien des haies sera pris en compte, la densité du système racinaire va également être réduite, le système racinaire est ensuite reconstitué au cours du temps, de manière linéaire et durant la même durée que pour la reconstitution de la canopée. Par hypothèse la zone d'influence racinaire reste la même ( $R_{ch} + R_r$ ), c'est la densité racinaire qui évolue selon les équations suivantes.

- Si  $t_t < Y$

$$Mrd = Mrd_{min} + t_t (Mrd_{max} - Mrd_{min})/Y$$

- Si  $t_t > Y$

$$Mrd = Mrd_{max}$$

Les quantités de carbone et d'azote correspondant à la nécrose n'ont pas été prises en compte dans les restitutions

### 3.4.5 Prélèvement en eau

On considère un ordre de priorité entre la haie et la culture dans la maille double couvert pour le prélèvement en eau. A chaque pas de temps la haie va prélever ce dont elle a besoin en fonction de sa zone d'influence dans le sol et des disponibilités en eau. C'est ensuite la culture qui se sert en fonction du ratio de sa surface au sol et de la disponibilité en eau.

Afin de déterminer le prélèvement potentiel en eau de la haie on considère que la haie est plus proche d'une configuration d'arbre isolé que d'une forêt. Selon Pereira et al (2006) la transpiration d'un arbre isolé sans contrainte hydrique est :

$$PP_h = (ET_0 \times LAI_t)/2.88$$

On calcule ensuite un facteur (TESTOMATE) tel qu'il est intégré dans STICS (Brisson et al., 1998). Ce facteur est fonction de la demande climatique ( $ET_0$ ) et du potentiel critique de fermeture stomatique ( $Psisto$ ).

$$TESTOMATE = \frac{1}{40} \ln \left[ \frac{PP_h}{2\pi RLD_e Psisto \times 10^{-3}} \times \ln \left( \frac{1}{Rayon \sqrt{\pi \frac{RLD_e}{(SD + ID)}}} \right) \right]$$

Ce facteur correspond au seuil de teneur en eau ( $\theta$ ) à partir duquel l'ETR est inférieure à l'ETM. Lorsque la teneur en eau du sol devient inférieure à TESTOMATE, le rapport ETR/ETM varie de 1 à 0.

Le prélèvement potentiel est ensuite comparé à l'eau disponible pour la haie ( $ASW_h$ ), ce qui correspond à :

$$ASW_h = ASW_m \times \frac{A_c}{A_m}$$

Le prélèvement dans chaque couche de sol s'effectue proportionnellement à la densité racinaire de la couche ( $RLD(Z)$ ) par rapport à la densité racinaire effective totale ( $RLD_e$ ). Dans le cas où la demande en eau globale de la haie peut être satisfaite, mais que la teneur en eau d'une couche est inférieure à la demande dans cette couche, on répartit le prélèvement dans les autres couches. Cela permet de reproduire les observations de Breda et al (1995) qui ont montré que la distribution du prélèvement en eau d'un peuplement de chêne varie entre les différents horizons en fonction de leur état hydrique.

Année	Moyenne	Minimum	Maximum	ETP	Moyenne/ETP
1994	977	459	923	572	1,71
1995	831	334	992	613	1,36
1996	731	284	911	563	1,30
1997	752	267	911	580	1,30
1998	870	443	948	578	1,51
1999	848	396	975	605	1,40
2000	817	361	909	558	1,47
2001	876	374	982	603	1,45
2002	895	362	1019	631	1,42
2003	757	201	1072	686	1,10
2004	866	380	965	599	1,44
2005	735	232	1036	640	1,15
2006	753	292	937	586	1,28
2007	924	462	964	606	1,52
2008	908	505	953	586	1,55
2009	753	330	832	586	1,29
Moyenne	831	355	958	599	1,39

Tableau 3.2 – Valeurs moyennes, minimales et maximales (en  $mm.an^{-1}$ ) de transpiration de la haie simulées en fonction de l'année de simulation.

Avec ces formalismes, la transpiration moyenne de la haie (par projection de la canopée) simulée sur la période 1994-2009 est de 831 mm, soit environ 1,4 fois l'ETP moyen (Tableau 3.2). Cette valeur est en accord avec les observations (Ghazavi, 2008).

### 3.4.6 Remontées capillaires

La distance à la nappe est prise en compte par l'intermédiaire des remontées capillaires. En effet, les remontées capillaires (CR) sont simulées dans la TNT2 par la formule empirique de Hillel (1980)

$$CR = \min[ETR, (kRC/Z_{nappe}^s)]$$

Où « kRC » et « s » sont des paramètres dépendants de la texture du sol. Ils sont respectivement fixés à 0.001 et 2.5 pour les sols limoneux bretons.

Les remontées capillaires, pour chaque couche de sol de la maille double couvert, correspondent au minimum entre la somme des prélèvements réels d'une couche (Evaporation du sol "EC<sub>s</sub>", prélèvement de la culture "PC<sub>s</sub>" et de la haie "PC<sub>h</sub>") et la quantité d'eau disponible pour la remontée qui est fonction de la profondeur de la nappe.

$$CR = \min[(EC_s + PC_c + PC_h), (kRC/Z_{nappe}^s)]$$

Dans TNT2 la profondeur du sol contrôle la profondeur d'eau extractible par la végétation. Afin de conserver une épaisseur de sol identique pour l'ensemble de la maille et de simuler une capacité des arbres à extraire de l'eau des horizons plus profonds, les remontées capillaires sont augmentées pour la haie (Viaud et al., 2005). Les paramètres "kRC" et "s" ont donc respectivement été fixés à 0.004 et 2. La quantité d'eau supplémentaire apportée par remontée capillaire est proportionnelle à la surface "(Rh + Rch) × Am". Cette quantité est considérée comme un réservoir supplémentaire uniquement disponible pour la haie. La quantité d'azote de l'eau capillaire, qui est fonction de la concentration de la nappe, peut-être utilisée par la haie en fonction des besoins.

### 3.4.7 Prélèvement en azote

Comme pour l'eau on considère pour l'azote une priorité de la haie sur la culture dans la maille double couvert. La demande potentielle en azote de la haie est fonction de sa croissance en biomasse.

$$PN = K_n \times \frac{dB_t}{dt}$$

Le prélèvement potentiel est ensuite comparé à ce qui est disponible pour la haie (ASN<sub>h</sub>).

$$ASN_h = ASN_m \times \frac{A_c}{A_m}$$

Le même formalisme que STICS est utilisé pour calculer l'offre en azote de la maille (ASN<sub>m</sub>).

$$ASN_m = \min(\text{fluxsoil}, \text{fluxroot})$$

**Fluxsoil** est le flux de nitrate de nitrate transféré d'un point du sol vers la racine la plus proche, par convection et diffusion. Dans chaque couche élémentaire, le flux de convection est le produit du flux d'eau de transpiration de la haie ( $ETRC_h$ ) et de la concentration en nitrate de la couche. Ce flux est nul lorsque la transpiration est nulle (par absence de racines ou fort stress hydrique). Le flux de diffusion est le produit du coefficient de diffusion apparente du nitrate (modulé par la teneur en eau du sol) par le gradient de concentration en nitrate. Ce dernier est calculé en supposant que les racines sont verticales et équidistantes et que la concentration nitrique décroît linéairement jusqu'à la surface de la racine où elle devient nulle.

**Fluxroot** est le flux d'azote absorbé par la racine, processus physiologique actif de la plante. Ce flux dépend de la capacité intrinsèque d'absorption des racines, de la densité racinaire et de la concentration en nitrate dans le milieu extérieur.

L'absorption spécifique augmente avec la concentration en nitrate selon une double cinétique de Michaëlis-Menten qui correspond à deux systèmes de transport, un système à forte affinité ( $V_{MAX1}$  et  $KM1$  faibles) et un système à faible affinité ( $V_{MAX2}$  et  $KM2$  élevés).

Le paramètre  $K_n$  est calibré pour obtenir la gamme de variation du prélèvement brut d'azote décrite dans le Tableau 1.1 du chapitre 1.3.4.4. Pour  $K_n$  égal à 0.005 le prélèvement moyen en azote varie de 3.7 à 20.8  $gN.m^{-2}.an^{-1}$  (tableau Tableau 3.3), en fonction de la disponibilité en azote, ce qui correspond à la gamme des observations.

Année	Moyenne	Minimum	Maximum
1994-1995	15,736	5,906	20,7
1995-1996	14,368	3,101	20,2
1996-1997	13,905	4,17	18,8
1997-1998	13,824	2,249	19
1998-1999	16,44	4,066	20,4
1999-2000	16,047	4,253	20,8
2000-2001	15,326	3,298	19,7
2001-2002	15,483	3,263	22,1
2002-2003	16,462	4,385	22,6
2003-2004	12,586	1,656	20,9
2004-2005	15,474	3,892	22,0
2005-2006	12,489	2,642	21,8
2006-2007	13,443	3,704	20
2007-2008	17,431	3,935	22,1
2008-2009	17,24	4,572	21,4
Moyenne	15,08	3,67	20,8

Tableau 3.3 – Valeurs moyennes, minimales et maximales (en  $gN.m^{-2}.an^{-1}$ ) de prélèvement d'azote par la haie simulées en fonction de l'année de simulation.

#### 3.4.8 Restitution d'azote par la chute des feuilles, décomposition des résidus et minéralisation

D'après les mesures présentées dans le Tableau 1.1 du chapitre 1.3.4.4, il y a entre 40 et 80 % de l'azote prélevé par les arbres qui est restitué lors de la chute des feuilles. Dans le modèle nous avons

choisi comme hypothèse que 60 % de l'azote total prélevé par la haie pendant la saison de végétation est restitué au sol sous forme de résidus. Cette restitution est effectuée lorsque le LAI retombe à zéro en fin d'année.

La décomposition des résidus organiques et leur humification sous l'action de la biomasse microbienne sont modélisées par le module de STICS (Nicolardot et al., 2001). Les résidus de la haie sont considérés comme des résidus de cultures avec des paramètres spécifiques présentés dans le tableau Tableau 3.4.

Paramètre des résidus	Valeurs
Résidu C:N ratio	$R = 55$
C résidu ( $t \cdot ha^{-1}$ )	$C_{res} = (R \times N_{res} / 0,42) * 0,01$
C:N ratio de la biomasse microbienne	$R_b = 16,1 - 123 / R$ $R_b = 7,8$ quand $R < 14,8$
Taux de décomposition des résidus ( $njour^{-1}$ )	$k = 0,07 + 1,94 / R$
Taux d'humification de la biomasse microbienne	$h = 1 - 0,69R / (11,2 + R)$
Taux de décomposition de la biomasse microbienne	$\lambda = 0,01$
Rendement d'assimilation des résidus carbonés par la biomasse microbienne	$Y = 0,62$

Tableau 3.4 - Paramètres pour les résidus de culture (Nicolardot et al., 2001) attribués à la haie avec  $N_{res}$  l'azote restitué par la haie. "njour" correspond au jour normalisé, soit une température de 15°C et une teneur en azote optimale.

La vitesse de décomposition des résidus organiques est notamment fonction de leur nature (définie par leur origine et par leur rapport C/N) et de l'humidité du sol (selon une loi linéaire).

Dans STICS, c'est la minéralisation nette qui est prise en compte. Elle correspond à la somme de 2 composantes :

**La minéralisation de l'humus**, qui résulte de la décomposition de la matière organique humifiée du sol. C'est un processus permanent, ayant une valeur toujours positive.

**La minéralisation des résidus**, qui résulte de la décomposition des résidus de culture ou des amendements organiques apportés au sol. C'est un processus d'intensité variable, lié au rythme des apports organiques.

Suite à l'incorporation de résidus, la minéralisation nette est en général d'abord négative (organisation de l'azote minéral du sol) puis positive (reminéralisation de l'azote microbien, originaire soit du résidu soit du sol). La vitesse de minéralisation est également fonction de l'humidité du sol selon la même loi que pour la décomposition des résidus

### 3.4.9 Valeurs des autres paramètres utilisés pour la haie dans TNT2

Les valeurs des autres paramètres utilisés pour la haie sont données dans le tableau Tableau 3.5.

<b>Paramètres existant</b>	
Coefficient d'extinction	Extin = 0,7
Potentiel critique de fermeture stomatique (bars)	Psisto = 13
Vitesse initiale maximale de l'équation de Michaelis-Menten ( $\mu\text{mole.cm}^{-1}.\text{h}^{-1}$ )	Vmax1 = 0,0018 ; Vmax2 = 0,01
Constante de l'équation de Michaelis-Menten ( $\mu\text{mole.cm}^{-1}$ de racine)	KM1 = 50 ; KM2 = 25000
Moyenne du rayon des racines (cm)	Radius = 0,02
<b>Paramètres implémentés</b>	
Valeur maximale du LAI annuel	LAI <sub>max</sub> = 5
Valeur maximale de la largeur de la canopée (m)	L <sub>max</sub> = 8
Temps de reformation de la canopée après élagage (an)	Y = 5
Largeur pour le ratio de haie seul (m)	H <sub>sol</sub> = 3
Fréquence d'élagage (année)	ft = 10
Rendement d'utilisation du rayonnement solaire par les arbres (g de matière sèche par MJ de rayonnement intercepté)	et = 1,4

Tableau 3.5 – Valeur des autres paramètres utilisés pour la haie dans TNT2

## 4 Application du modèle au bassin versant de Kervidy-Naizin

### 4.1 Site d'étude

Le bassin versant de Kervidy-Naizin se situe dans le département du Morbihan en Bretagne. Ce bassin versant de 4.9 km<sup>2</sup> est un site d'observation long terme (ORE Agrhys - [http://www.inra.fr/ore\\_agrhys](http://www.inra.fr/ore_agrhys)) faisant l'objet de suivis hydro-biogéochimiques détaillés depuis 1993. Cet ORE fait partie du SOERE RBV. C'est un bassin d'ordre 2 qui possède des altitudes comprises entre 98 et 138 m. Il est caractérisé par des pentes faibles de moins de 5 % notamment sur la partie nord qui est relativement plate.

#### 4.1.1 Climat

Les données météo utilisées sont obtenues à partir d'une station automatique positionnée sur le bassin. La région est soumise à un climat océanique doux et humide, avec une moyenne des températures annuelles de 10,3°C. La moyenne annuelle des précipitations (1993-2010) est de 759 mm avec des variations de 375 à 1073 mm. La moyenne annuelle de l'évapotranspiration de référence, ETo (ou encore évapotranspiration potentielle), est de 709 mm avec des variations observées de 637 à 857 mm. Les écoulements annuels sont en moyenne de 346 mm et varient de 83 à 569 mm. De nombreuses études détaillées en hydrologie, géomorphologie et sciences du sol ont été réalisées sur ce site. Une première synthèse a été réalisée en 1998 (Cheverry, 1998).

#### 4.1.2 Les sols

Les sols reposent sur un socle rocheux constitué de schiste Briovérien. Les sols sont surtout composés de limons issus de l'altération du substrat rocheux et des dépôts éoliens du quaternaire. Ils se différencient en deux domaines contrastés, correspondant d'une part à des sols naturellement bien drainants en position de haut de versant et d'autre part à des sols hydromorphes en position de bas de versant qui occupent 15% de la surface du bassin. Les sols hydromorphes se distinguent des sols drainants par un niveau du toit de la nappe qui se situe près de la surface durant 3 à 6 mois de l'année, d'octobre à mars (Molenat et al., 2005). L'altérite du schiste a une épaisseur très variable, allant de 1 à plus de 30 m et renferme une nappe superficielle.

Trois types de sols sont représentés dans TNT2 pour le bassin versant dont un correspondant à des sols hydromorphes, un à des sols bien drainants et un à des sols intermédiaires (figure Figure 4.1). Cette distinction en trois types de sol s'est faite à partir du regroupement de 13 grands groupes de sol identifié par Walter et Curmi (1998).

## 4.1 Site d'étude

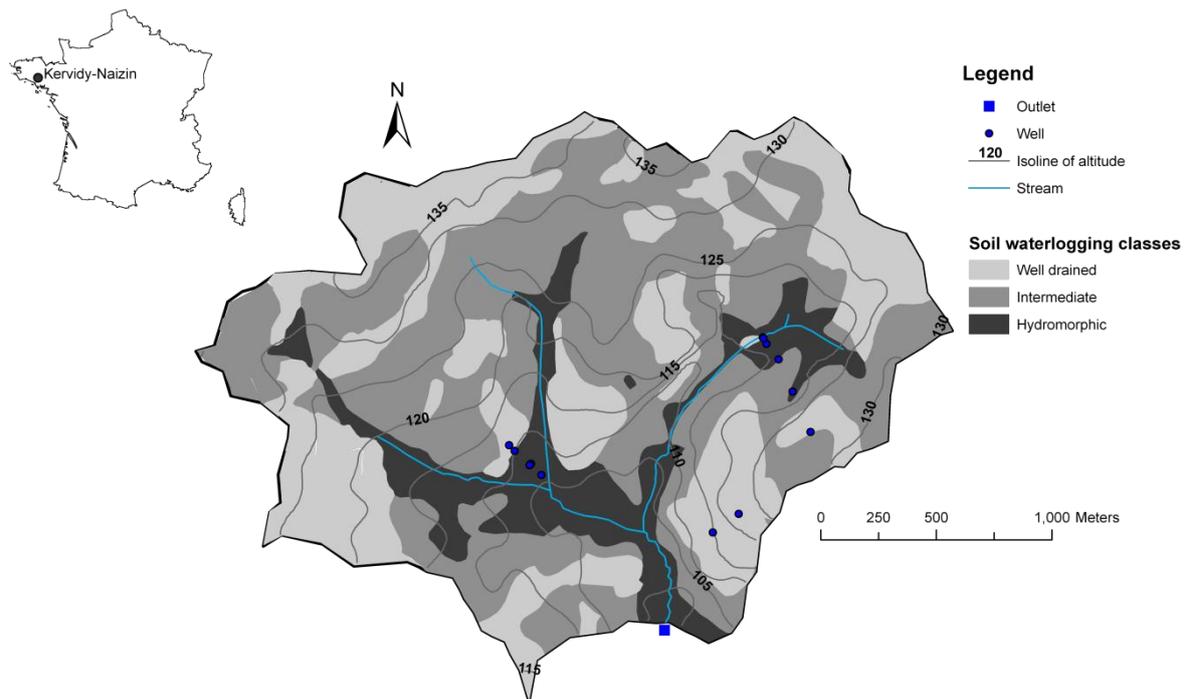


Figure 4.1 - représentation spatiale des trois types de sol modélisés pour le bassin versant de Kervidy-Naizin, du réseau hydrographique, de la topographie, de la position de l'exutoire et des piézomètres installés (Salmon-Monviola et al., 2012).

Les valeurs des épaisseurs de couches et porosités utilisées pour les sols et le socle rocheux associé sont données dans le tableau Tableau 4.1.

Paramètres	Sols drainants	Sols intermédiaires	Sols hydromorphes
SD (m)	0,3	0,3	0,3
ID (m)	0,8	0,8	0,8
RD (m)	25	25	12
$\eta_s^r$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,23	0,21	0,21
$\eta_s^d$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,22	0,20	0,20
$\eta_i^r$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,21	0,19	0,18
$\eta_i^d$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,2	0,18	0,15
$\eta_R^r$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,05	0,05	0,05
$\eta_R^i$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,05	0,05	0,05

Tableau 4.1 - Valeurs des épaisseurs de sol et de porosité de chaque type de sol du modèle pour le bassin versant de Kervidy-Naizin

### 4.1.3 Hydrologie

Le réseau hydrographique possède une longueur d'environ 4.4 km de long, qui s'assèche sur plus de 2 mois en été, tandis qu'en hiver le débit journalier moyen peut être supérieur à 1m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Le toit de la nappe varie en fonction de la position dans le versant et au cours de l'année. En bas de versant sa profondeur ne dépasse pas 1 mètre sous la surface du sol tandis que pour le haut de versant elle varie entre 3 et 8 m (Molenat and Gascuel-Oudou, 2002). Les débits sont calculés par mesure de la hauteur d'eau au niveau d'un seuil rectangulaire.

#### 4.1.4 La production agricole

Ce bassin versant est l'objet d'une production agricole intensive consacrée à la polyculture élevage. Les pratiques agricoles, telles que les amendements et les rotations, ont été suivies à différentes dates par le CEMAGREF de Rennes depuis 1988 (Cann, 1990; Durand, 2004), puis par l'INRA. Cependant, la complexité et la diversité des cultures dans le bassin versant est si importante que les enregistrements sont loin d'être exhaustifs et il y a de grandes incertitudes concernant les dates d'intervention, les quantités et la nature des fertilisants (Durand 2004).

Globalement près de 90 % de la surface au sol est utilisée pour la production laitière et porcine. L'occupation du sol est composée à 30% de maïs (principalement du maïs ensilage semé en avril et récolté en octobre), de 30% de céréales d'hiver (semées en Novembre et récoltées en Juillet), et 30% de pâturages. La densité animale (élevage laitier plus hors sol) a été estimée à 10 UGB.ha<sup>-1</sup> (McDowell et al., 2012). En raison de cette forte densité d'élevage et de pratiques très intensives depuis le début des années 70, la pollution azotée de ce bassin est très élevée, tant sur le plan de la pollution nitrique des eaux (teneur moyenne de 72 mg.l<sup>-1</sup>, Cann (1990) ayant montré que plus de 95 % des flux d'azote à l'exutoire se faisaient sous forme de nitrate) que de la pollution atmosphérique, l'ensemble des émissions vers l'environnement atteignant 140 kg N.ha<sup>-1</sup> en moyenne (Durand et al., 2010).

#### 4.1.5 Le réseau bocager

Sur le bassin versant de Kervidy-Naizin des cartes des réseaux de haies de 1952 et 1999 issues de photographies aériennes ont été utilisées. Entre ces deux périodes le réseau de haies est passé de 140 m.ha<sup>-1</sup> à 48 m.ha<sup>-1</sup>, dû au remembrement et aux aménagements fonciers individuels. Cependant ces cartes indiquent uniquement les bordures de champs ou de route sur lesquelles on peut trouver une haie. Elles n'indiquent pas l'état ou la continuité de la haie. Nous avons donc considéré que les haies étaient homogènes et continues sur la totalité du réseau cartographié, et qu'elles étaient constituées de chênes, essence majoritairement présente sur le bassin versant.

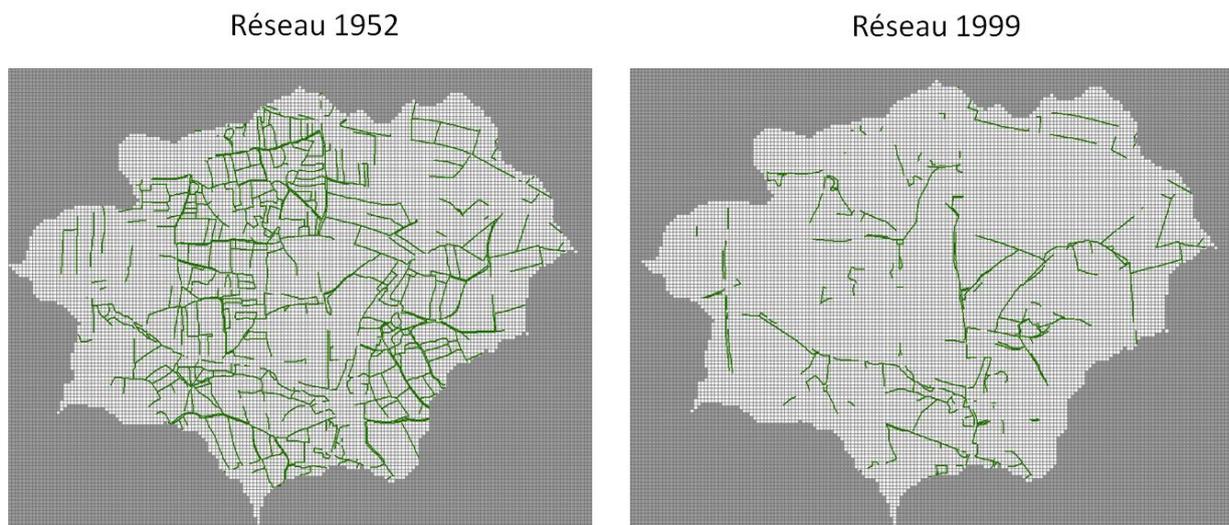


Figure 4.2 – Représentation des linéaires de haie de 1952 et de 1999 sur le bassin versant de Kervidy-Naizin. Le quadrillage correspond au maillage du modèle.

Pour être représentés dans le modèle, ces réseaux sont vectorisés et convertis en raster donnant pour chaque maille (20 × 20 m) la longueur en mètre linéaire de la haie présente sur la maille. Ces

#### 4.1 Site d'étude

longueurs sont présentées dans la figure Figure 4.3. Elles peuvent donc être variables dans chaque maille double couvert en fonction de la manière dont le linéaire de haie coupe une maille. Dans une maille, la longueur de haie la plus répandue est de 20 m, du fait que dans la majorité des cas les haies sont orientées Nord-Sud ou Est-Ouest.

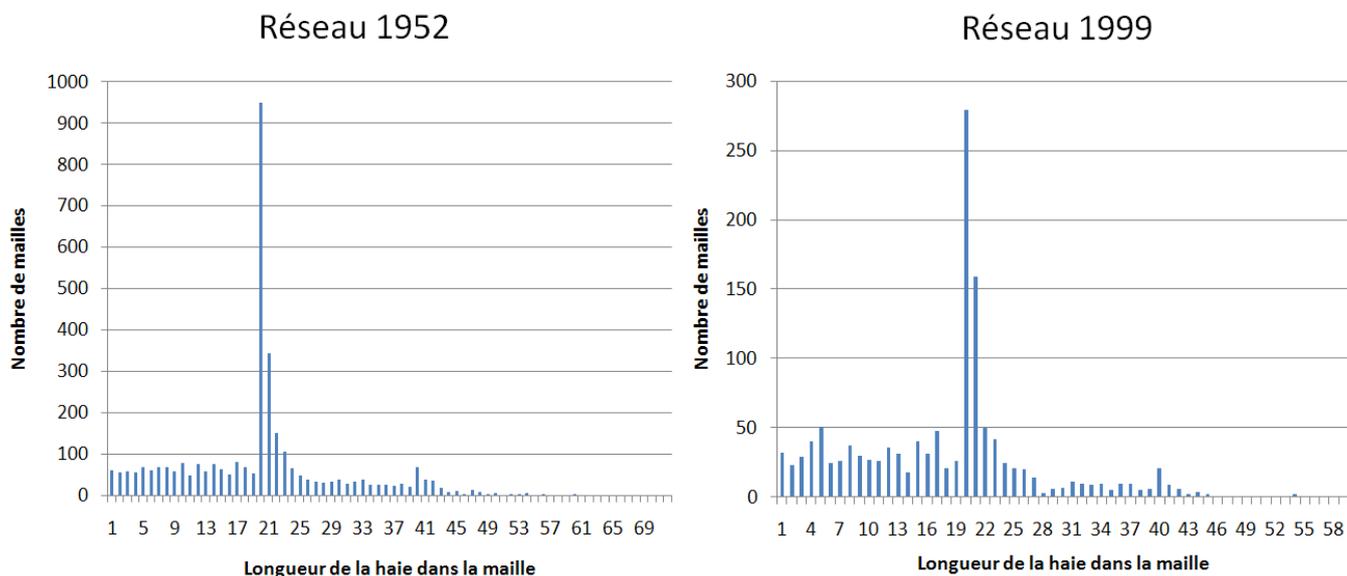


Figure 4.3- Histogramme du nombre de mailles double couvert dans le bassin versant en fonction de la longueur de haie (en mètre) dans la maille.

Le nombre de mailles et la longueur totale de haie pour le bassin versant et pour chaque type de sol sont présentés dans les tableaux Tableau 4.2 et Tableau 4.3.

	Densité	Nombre de mailles	Longueur totale	Longueur moyenne par maille
1952	140	3503	70115	20,05
1999	48	1352	24281	17,96

Tableau 4.2 – valeurs de la densité ( $m \cdot ha^{-1}$ ), du nombre de maille double couvert et de la longueur totale (mètre linéaire) de haie dans le bassin versant pour les réseaux de 1952 et 1999.

	sol hydromorphe			sol intermédiaire			sol drainant		
	densité	Nombre de mailles	longueur totale	densité	Nombre de mailles	longueur totale	Densité	Nombre de mailles	longueur totale
1952	176	628	12238	150	1803	35856	119	1072	22021
1999	104	399	7217	44	589	10556	35	364	6508

Tableau 4.3 – Valeurs de la densité ( $m \cdot ha^{-1}$ ), du nombre de maille double couvert et de la longueur totale (mètre linéaire) de haie pour chaque type de sol et pour les réseaux de 1952 et 1999.

Entre 1952 et 1999 la densité du réseau de haie sur le bassin versant a été quasiment divisée par trois, mais pas de manière homogène sur le bassin versant. En effet elle a été réduite de près de 40 % sur la zone des sols hydromorphes, de près de 70 % sur la zone des sols intermédiaires et de près de 60 % sur la zone des sols drainants (tableau Tableau 4.3). On note que la longueur moyenne par maille est plus forte pour le réseau de 1952 que pour celui de 1999.

## 4.2 Impact de la haie sur le bilan hydrique du bassin versant

### 4.2.1 Calage des paramètres d'écoulement du modèle après modification sur le gradient de nappe

Le coefficient de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970) a été utilisé afin de déterminer si les débits simulés sont en accord avec les débits observés. Le coefficient de Nash est donné par la formule suivante :

$$1 - \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Avec  $Q_{sim}$  et  $Q_{obs}$  les débits respectivement simulé et observé à un instant  $t$ . Ce coefficient varie entre 1 pour une corrélation parfaite et moins l'infini dans le cas contraire. Pour une valeur supérieure à 0 les valeurs de débits simulés donnent une meilleure approximation que la moyenne.

Les paramètres  $m$  et  $T_0$ , ont la plus forte influence sur les débits et sont utilisés pour la calibration par essai-erreur afin d'obtenir le meilleur coefficient de Nash sur la période étudiée. Les valeurs des paramètres  $m$  et  $T_0$  utilisés après calibration sont données dans le tableau Tableau 4.4. Ils permettent d'obtenir un coefficient de Nash de 0,81.

Paramètres	Sol drainant	Sol intermédiaire	Sol Hydromorphes
$T_0$ ( $m^2 \cdot j^{-1}$ )	9	5	10
$m$ (m)	0,07	0,1	0,02

Tableau 4.4 - Valeurs de  $m$  et  $T_0$  pour chaque type de sol du modèle pour le bassin versant de Kervidy-Naizin

Les différences entre les débits simulés et observés se font surtout au niveau des pics de crue qui sont plus faibles pour les débits simulés. On note également une reprise des écoulements et une décharge de la nappe parfois plus rapide pour les débits simulés (figure Figure 4.4).

## 4.2 Impact de la haie sur le bilan hydrique du bassin versant

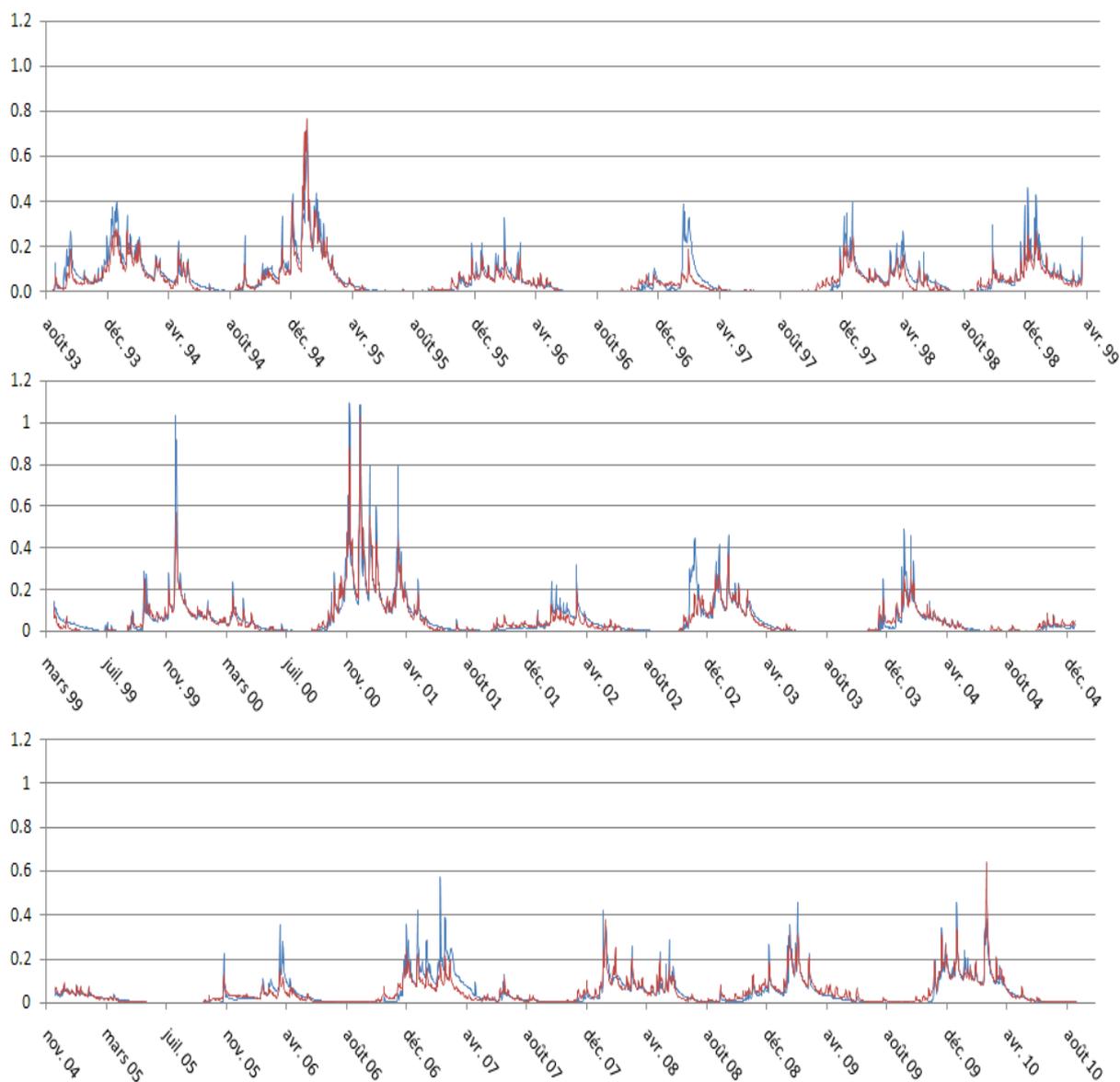


Figure 4.4 – Variations des débits journaliers ( $10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) observés (bleu) et simulés (rouge), à l'exutoire du bassin versant, durant la période de simulation allant septembre 1993 à septembre 2010.

### 4.2.2 Influence de la modification des écoulements

#### 4.2.2.1 Effet sur la nappe.

La modification du modèle portant sur les gradients des écoulements (décrite dans le chapitre 3.2) évite qu'il y ait des écoulements vers une maille de niveau piézométrique supérieur, prenant ainsi en compte les gradients inverses. Comme les écoulements sont multidirectionnels, on peut avoir une inversion de gradient concernant une, plusieurs, ou la totalité des mailles situées à l'aval d'une maille considérée. Pour une maille, lorsqu'il y a une inversion de gradient par rapport à l'ensemble des mailles situées à l'aval, l'écoulement profond de la nappe est nul. La durée (en jour) durant laquelle l'écoulement de la nappe d'une maille est nul, est présentée dans la figure Figure 4.5 pour l'ensemble des mailles du bassin versant et durant une période de 6000 jours de simulation. On observe que les occurrences d'écoulement de nappe nul dans une maille sont essentiellement

présentes au niveau des sols hydromorphes (figure Figure 4.1) mais également au niveau des limites de bassin versant.

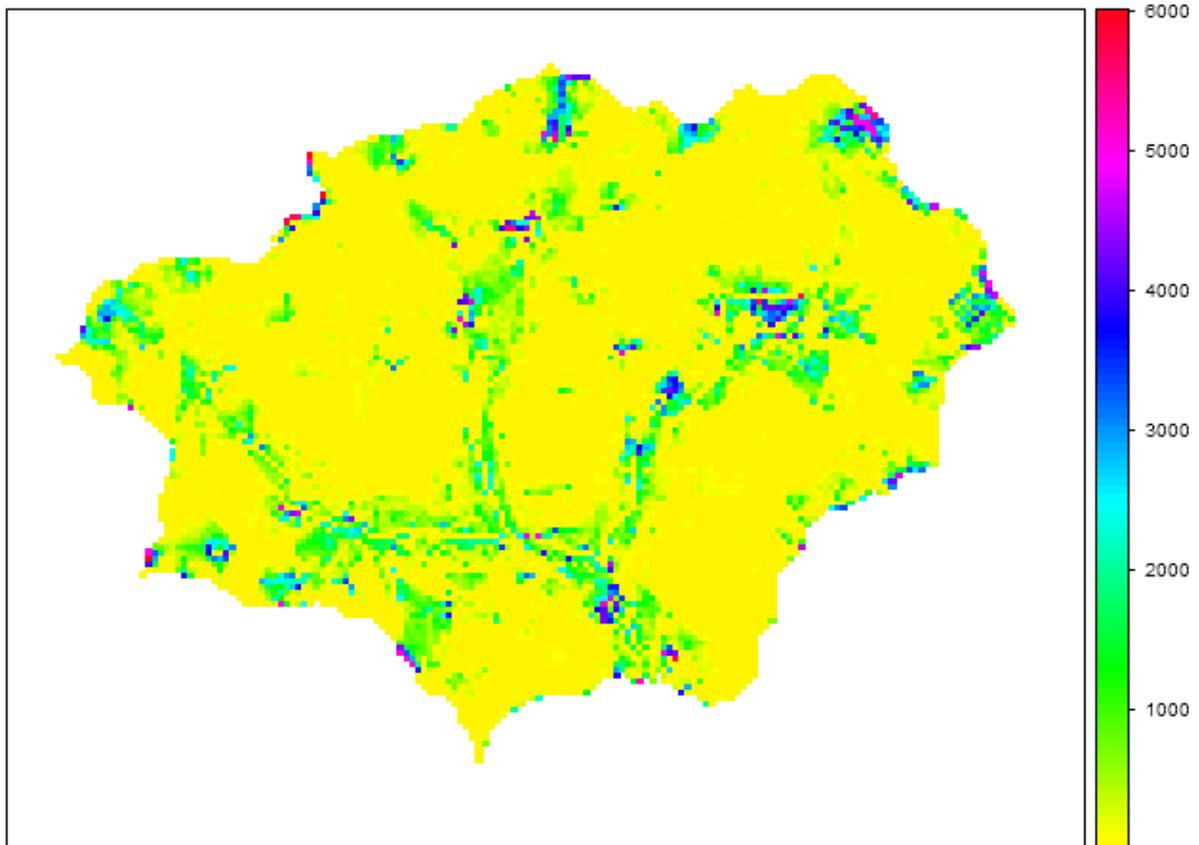


Figure 4.5 – Représentation du bassin versant modélisé avec pour chaque maille un indicateur coloré du nombre d'occurrences où il n'y a pas d'écoulement vers l'aval (en jour).

Ces inversions de gradient sont majoritairement dues aux propriétés intrinsèques du modèle et du bassin versant, notamment aux endroits où l'on voit que durant près de 4000 jours de simulation (soit 65 % du temps) on n'observe aucun écoulement d'une maille vers les mailles aval.

La modification des écoulements a un effet sur la dynamique de la nappe le long du versant. En effet elle entraîne une augmentation de la profondeur moyenne du toit de la nappe dans les zones de fond de vallée, augmentation qui, en été, est de l'ordre de 0,5 m au point le plus bas. Au contraire elle engendre une diminution de la profondeur moyenne du toit de la nappe dans les zones de haut de versant, qui est plus faible, de l'ordre de 0,5 à 1 m. Ces variations sont les plus fortes durant les périodes estivales, soit lorsque la végétation est la plus active, mais se marquent également en hiver lors des années sèches en haut de versant (figure Figure 4.7).

## 4.2 Impact de la haie sur le bilan hydrique du bassin versant

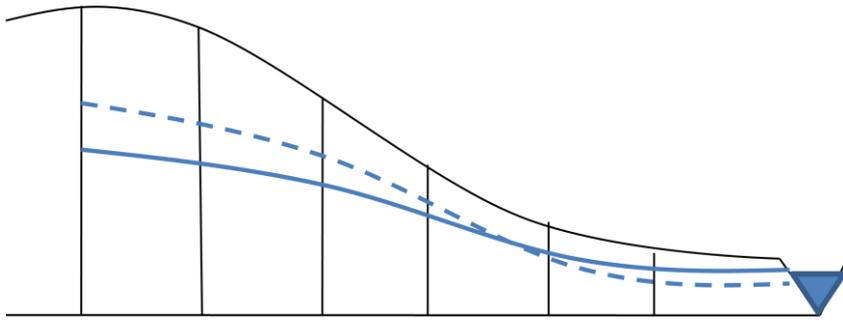


Figure 4.6 – Représentation schématique de l'évolution du niveau de la nappe après la modification des écoulements dans TNT2. En fin de période d'écoulement la ligne continue représente la position de la nappe sans modification et la ligne pointillée avec modification.

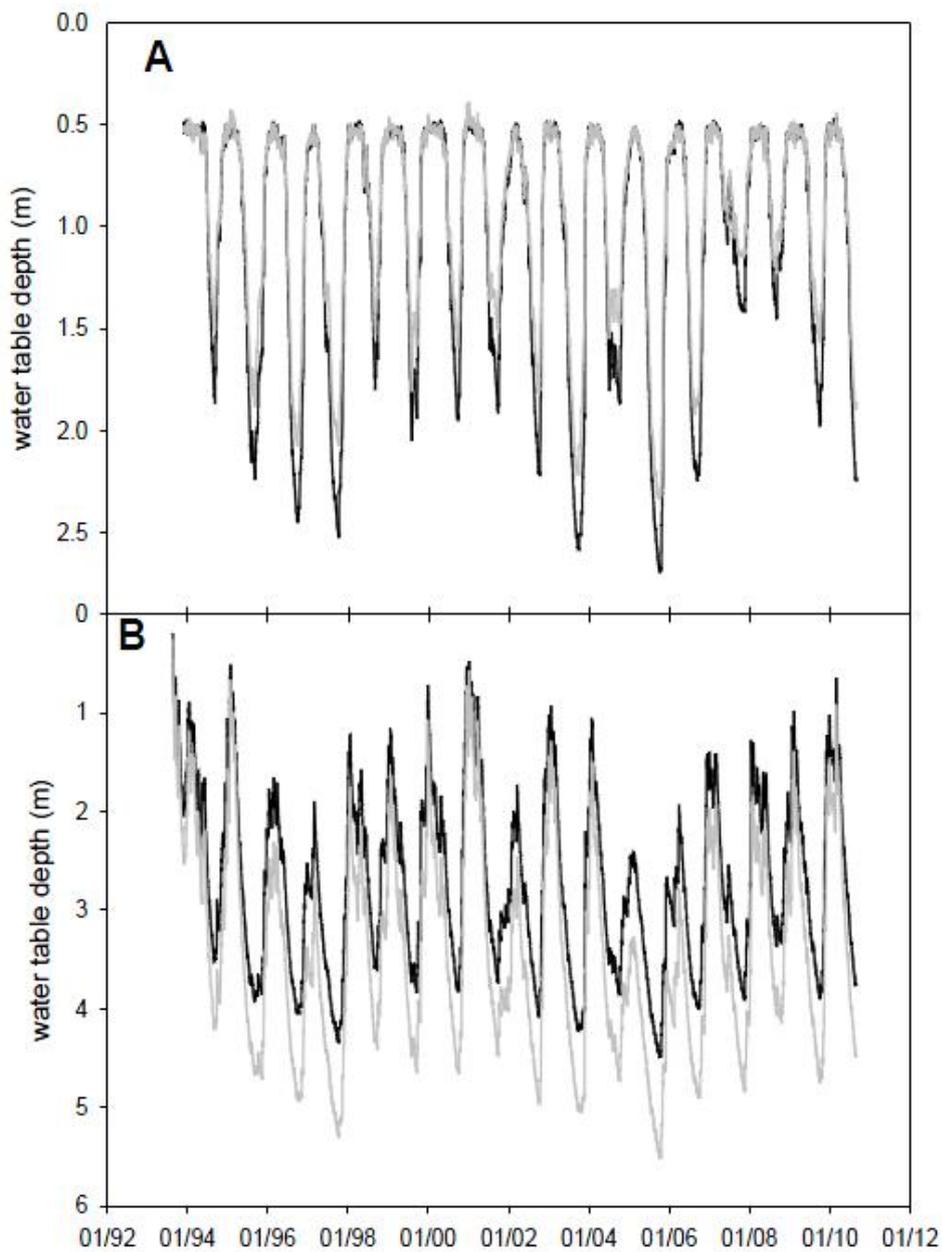


Figure 4.7 - variations moyennes du toit de la nappe sur l'ensemble des mailles de sols hydromorphes (A) et sur l'ensemble des mailles de haut de versant (B), pour les simulations sans modification des écoulements (gris) et avec modification des écoulements (noir).

La modification des écoulements entraîne annuellement une diminution du flux hydrique de 2.5 % à l'exutoire et une augmentation de l'évapotranspiration de 1.2 % sur le bassin versant. On observe également une diminution de la dénitrification d'environ 1% qui peut être liée à la baisse du toit de la nappe dans les zones de fond de vallée.

A une échelle de temps plus courte, on constate que la modification des écoulements peut avoir une influence plus importante, notamment lorsque les débits sont faibles c'est-à-dire lors de la reprise des écoulements en automne et lors de la décharge de la nappe au printemps. Durant ces périodes la diminution relative des débits (DRD), calculée avec la formule ci-dessous, peut atteindre 60 à 80 % (figure Figure 4.8).

$$DRD = (\text{debit sans modification} - \text{debit avec modification}) / \text{debit sans modification} \times 100$$

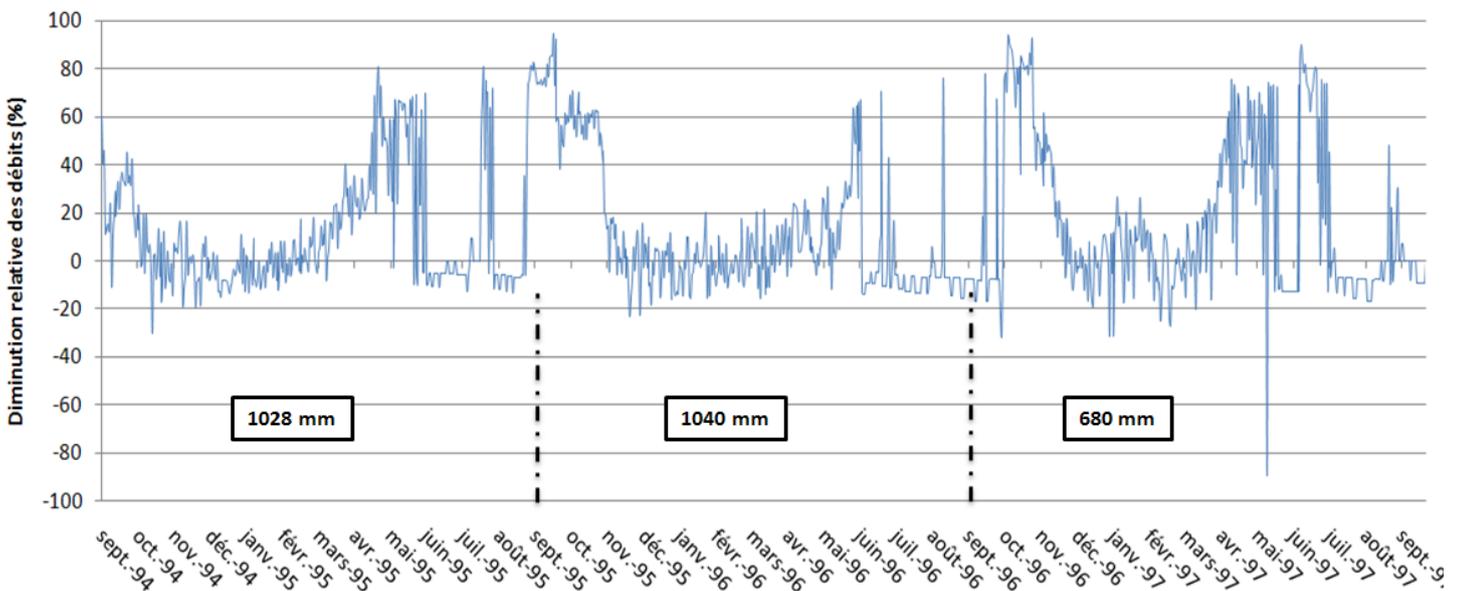


Figure 4.8 – Diminution relative des débits avec la modification des écoulements sur les gradients de nappe. Pour la visibilité de la figure, ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997. Les précipitations correspondantes sont données dans les encadrés sous le graphe.

Au contraire, la diminution des débits lors de la reprise des écoulements entraîne un stockage d'eau plus important dans la nappe ce qui provoque une augmentation des débits en hiver (valeurs négatives ; figure Figure 4.8). En été les brusques variations observées s'expliquent par les faibles débits durant cette période qui rendent les variations relatives plus sensibles.

#### 4.2.2.2 Influence du réseau bocager

L'augmentation moyenne du nombre d'occurrences sans écoulement vers l'aval (en jour) entre un bassin versant sans haie et un bassin versant avec haies est présentée dans le tableau Tableau 4.5.

On constate que cette augmentation moyenne par maille et par an est plus forte sur le bassin versant en présence d'un réseau bocager, et est plus important sur les mailles double couvert que sur l'ensemble du bassin versant. Cette augmentation, sur les mailles double couvert, est plus forte sur les sols hydromorphes que sur les sols drainants. Cependant, si l'on considère l'ensemble des mailles de sol hydromorphe l'augmentation du nombre d'occurrence est négative. Cela signifie que cette augmentation sur les mailles double couvert est compensée par une diminution sur les autres mailles

## 4.2 Impact de la haie sur le bilan hydrique du bassin versant

pour ce type de sol. Cela est également le cas pour le sol drainant. Au contraire sur le sol intermédiaire le bilan est positif (tableau Tableau 4.5).

sol	Toutes les mailles	mailles double couvert
Hydromorphe	-0,076	4,499
Intermédiaire	0,357	3,512
Drainant	-0,284	2,396
tous	0,067	3,582

Tableau 4.5 – Augmentations moyennes du nombre d’occurrences sans écoulement vers l’aval entre un bassin versant sans haie et un bassin versant avec haies. Variation par maille et par an pour l’ensemble des mailles, pour les mailles double couvert ainsi que pour chaque type de sol.

Sur l’ensemble du bassin versant on a donc globalement une augmentation du nombre d’occurrences moyen en présence d’un réseau bocager de 0.067 par maille. Cette augmentation est liée à un bilan positif sur les sols Intermédiaires. Cependant, le nombre d’occurrences sur chaque zone n’est pas quantitativement un indicateur de la modification d’intensité du flux de nappe.

Lorsqu’on traduit cela en termes de flux, les différences de débits avec et sans haies sur le bassin versant pour les modélisations avec et sans modification des écoulements sont finalement très similaires, et sont plutôt liées à l’augmentation de l’ETR (tableau Tableau 4.6).

	Avec haies	Sans haies	Différence relative (%)
Avec modification	1,58	1,66	4,8
Sans modification	1,62	1,71	5,3
Différence relative (%)	2,5	2,9	-

Tableau 4.6 – Valeurs moyennes des débits annuels ( $10^6 \text{ m}^3$ ) à l’exutoire du bassin versant dans les configurations avec et sans haies, ainsi que pour des simulations avec et sans prise en compte des gradients inversés.

### 4.2.3 Impact de la présence de haies sur le bilan d’eau des mailles double couvert

L’effet des haies sur l’évapotranspiration, la teneur en eau du sol et la profondeur du toit de la nappe a été étudié pour le réseau de haies de 1999 ( $48 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), en comparant les valeurs moyennes de ces variables pour l’ensemble des mailles double couvert, et les valeurs moyennes pour ces mêmes mailles en absence de haies (figure Figure 4.9). On constate que la présence de haies sur les mailles considérées a pour effet d’augmenter l’évapotranspiration moyenne (d’environ  $2 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$ ) et donc de diminuer la teneur en eau du sol (de 30 à 40 mm) et le niveau de la nappe (de 20 à 40 cm) durant la période de végétation active (période avec feuilles). On observe ici une dynamique temporelle que l’on estimera quantitativement dans le chapitre 4.2.4.2.

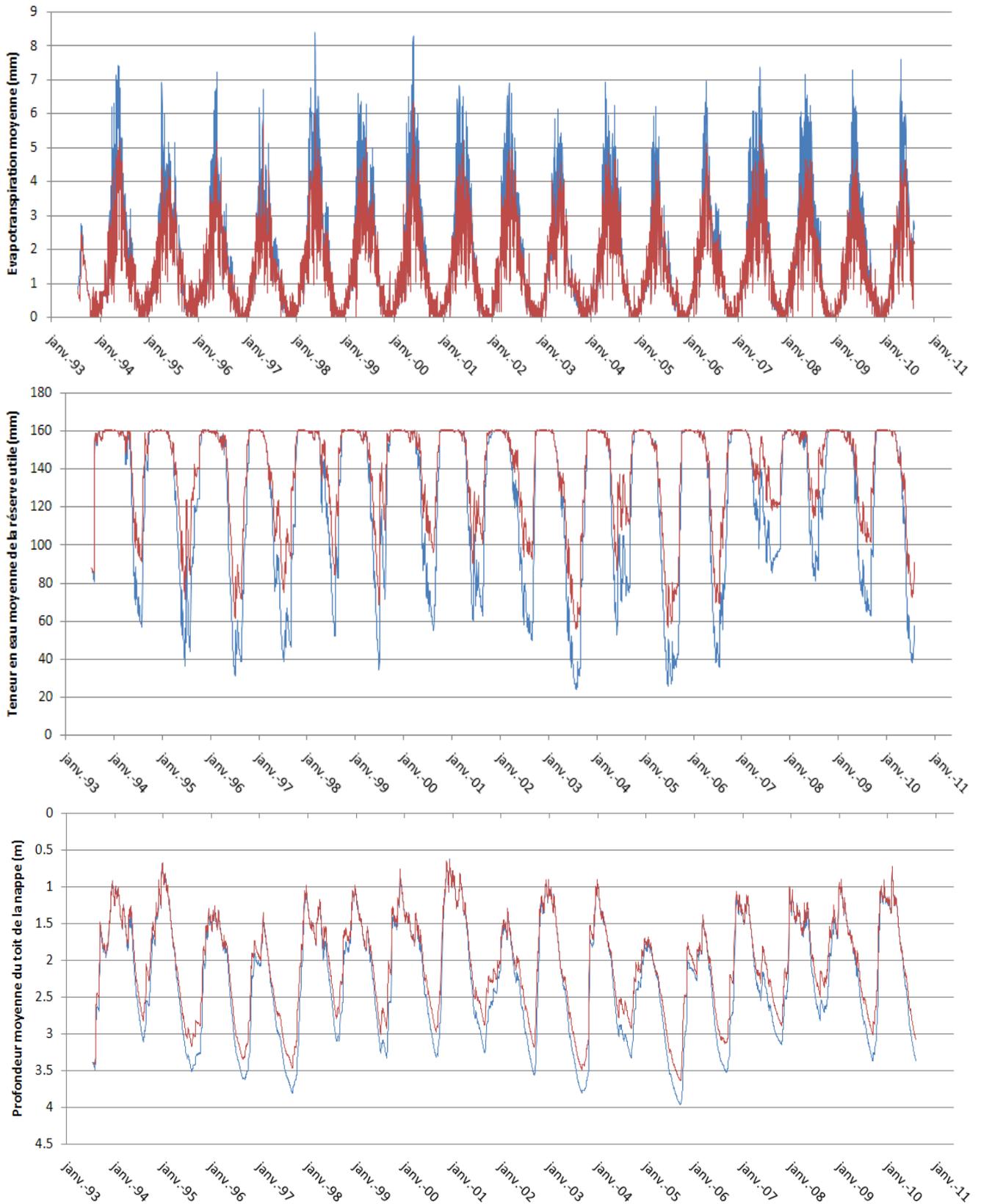


Figure 4.9 - Chronique des valeurs moyennes quotidiennes, pour l'ensemble des mailles double couvert, de l'évapotranspiration réelle, de la teneur en eau du sol, et de la profondeur du toit de la nappe avec haie (bleu) et sans haie (rouge), entre septembre 1993 et septembre 2012.

#### 4.2.4 Influence de la densité du réseau de haies sur le bilan hydrique

##### 4.2.4.1 Impact sur les mailles double couvert

Le tableau Tableau 4.7 montre l'impact de la présence de haies à l'échelle des mailles double couvert (c'est-à-dire si l'on regroupe l'ensemble de ces mailles).

	Avec haies		Mêmes mailles sans haie		Différence relative (%)	
Densité de haies (m.ha <sup>-1</sup> )	48	140	48	140	48	140
Evapotranspiration	658	631	542	525	21,4	20,3
Transpiration de la haie	740	716	0	0	-	-
Transpiration de la culture	305	259	356	336	- 14,6	- 22,9
Evaporation du sol	120	116	186	189	- 35,3	- 38,7
Teneur en eau de la réserve utile	126	122	139	137	- 9,2	- 11,3

**Tableau 4.7 – Valeurs moyennes annuelles (en mm) et différences relatives de l'évapotranspiration, de la transpiration de la haie et de la culture, de l'évaporation du sol et de la teneur en eau de la réserve utile sur les mailles double couvert avec et en absence de haies, pour les réseaux de 1958 (140 m.ha<sup>-1</sup>) et 1999 (48 m.ha<sup>-1</sup>).**

La présence de la haie sur les mailles double couvert entraîne une augmentation de l'évapotranspiration de 21 et 20 %, respectivement pour les réseaux de 48 et 140 m/ha, une diminution de la transpiration des cultures de 15 et 23 %, une diminution de l'évaporation du sol de 35 et 39 % et une diminution de la teneur en eau moyenne de la réserve utile de 9 et 11 % par rapport aux mêmes mailles sans haie. Ces valeurs constituent des moyennes qui prennent en compte les différentes positions des haies dans le versant et les différentes associations de cultures et rotations sur la période étudiée.

Les figures Figure 4.10 et Figure 4.11 montrent l'impact moyen de la longueur du linéaire de haie dans la maille sur différents termes du bilan d'eau. On constate sur ces figures, que les points s'alignent plutôt bien pour les longueurs de linéaire faibles et sont plus dispersés pour les longueurs de linéaire élevées. Cet effet est sans doute lié au nombre de mailles moins important pour les longueurs de linéaire plus élevées, et dont la moyenne est plus sensible aux extrêmes. A noter que dans les configurations du modèle une maille ayant une longueur de haie égale ou supérieure à 50 m est entièrement recouverte par la canopée. Pour ces mailles il n'y a donc pas d'association haie culture, seule la haie est présente.

La figure Figure 4.10 montre une diminution de la transpiration de la haie par unité de surface avec l'augmentation du linéaire dans la maille. Cette baisse de la transpiration est liée à un assèchement plus important du sol et à un abaissement plus important de la profondeur du toit de la nappe (figure Figure 4.11) avec l'augmentation de la densité de haie dans la maille. On observe également une plus grande diminution de la transpiration de la culture associée et de l'évaporation du sol avec l'augmentation du linéaire de haie dans la maille. La diminution de l'évaporation du sol semble cependant atteindre un palier lorsqu'on atteint 30 mètres de linéaire de haie par maille. L'effet global se traduit donc par une augmentation de l'ETR de la maille avec l'augmentation du linéaire de haie dans la maille (figure Figure 4.10).

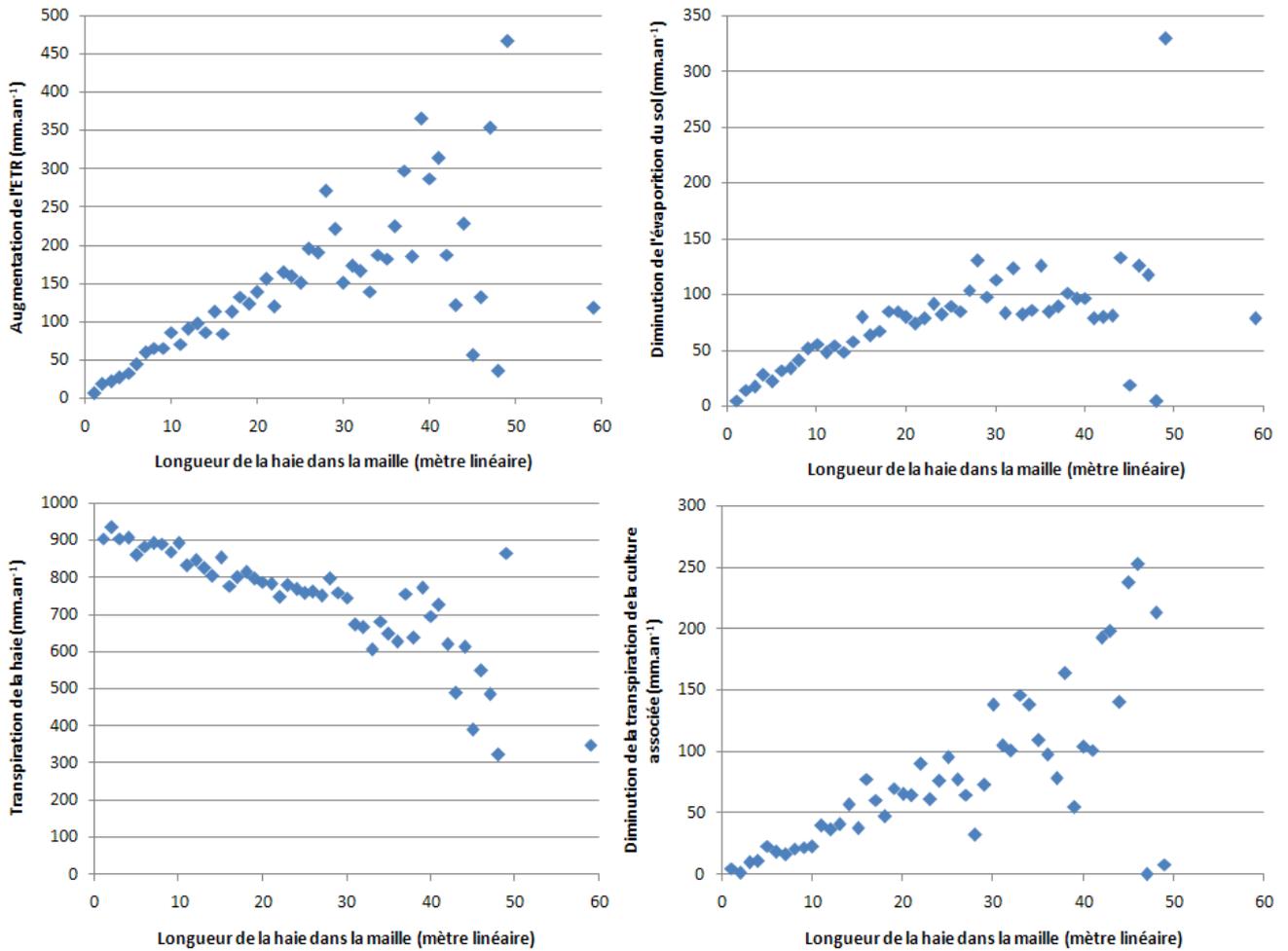


Figure 4.10- Transpiration de la haie, augmentation de l'ETR, diminution de l'évaporation du sol et de la transpiration de la culture des mailles double couvert, entre une configuration avec et sans haie, selon longueur du linéaire de haie dans une maille.

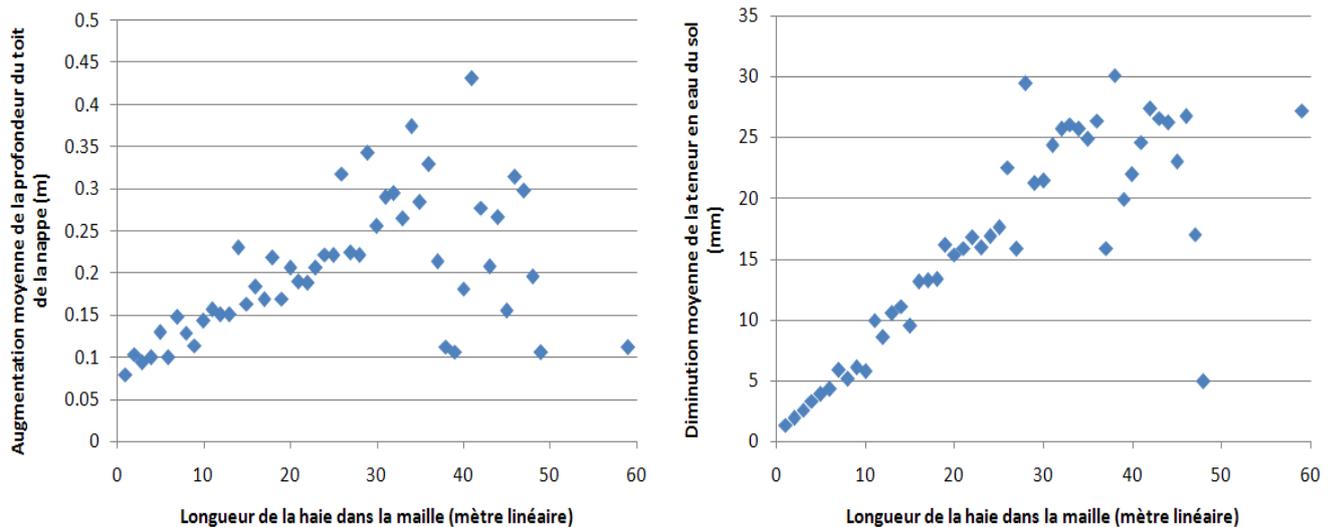


Figure 4.11 - Augmentation de la profondeur du toit de la nappe et diminution de la teneur en eau de la réserve utile des mailles double couvert, entre une configuration avec et sans haie, selon longueur du linéaire de haie dans une maille.

4.2.4.2 Impact sur le bassin versant

La présence d'un réseau bocager sur le bassin versant entraîne une diminution du débit à l'exutoire. Cette diminution est d'autant plus forte que la densité de haies sur le versant est importante (tableau Tableau 4.8). Pour des densités de haies de 48 et 140 m.ha<sup>-1</sup>, on obtient respectivement une diminution annuelle moyenne des débits à l'exutoire de 5 et 10,2 % et une augmentation annuelle moyenne de l'évapotranspiration de 3,6 et 7,2 % par rapport à un bassin versant sans haie.

	Sans haie	48 m.ha <sup>-1</sup>	140 m.ha <sup>-1</sup>
Débit (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	1,66	1,58	1,49
Evapotranspiration (mm)	486	504	522

Tableau 4.8 - Valeurs annuelles moyennes du débit à l'exutoire et de l'évapotranspiration sur le bassin versant pour des simulations avec les réseaux de haies de 1952 (140 m.ha<sup>-1</sup>), de 1999 (48 m.ha<sup>-1</sup>) et sans haie.

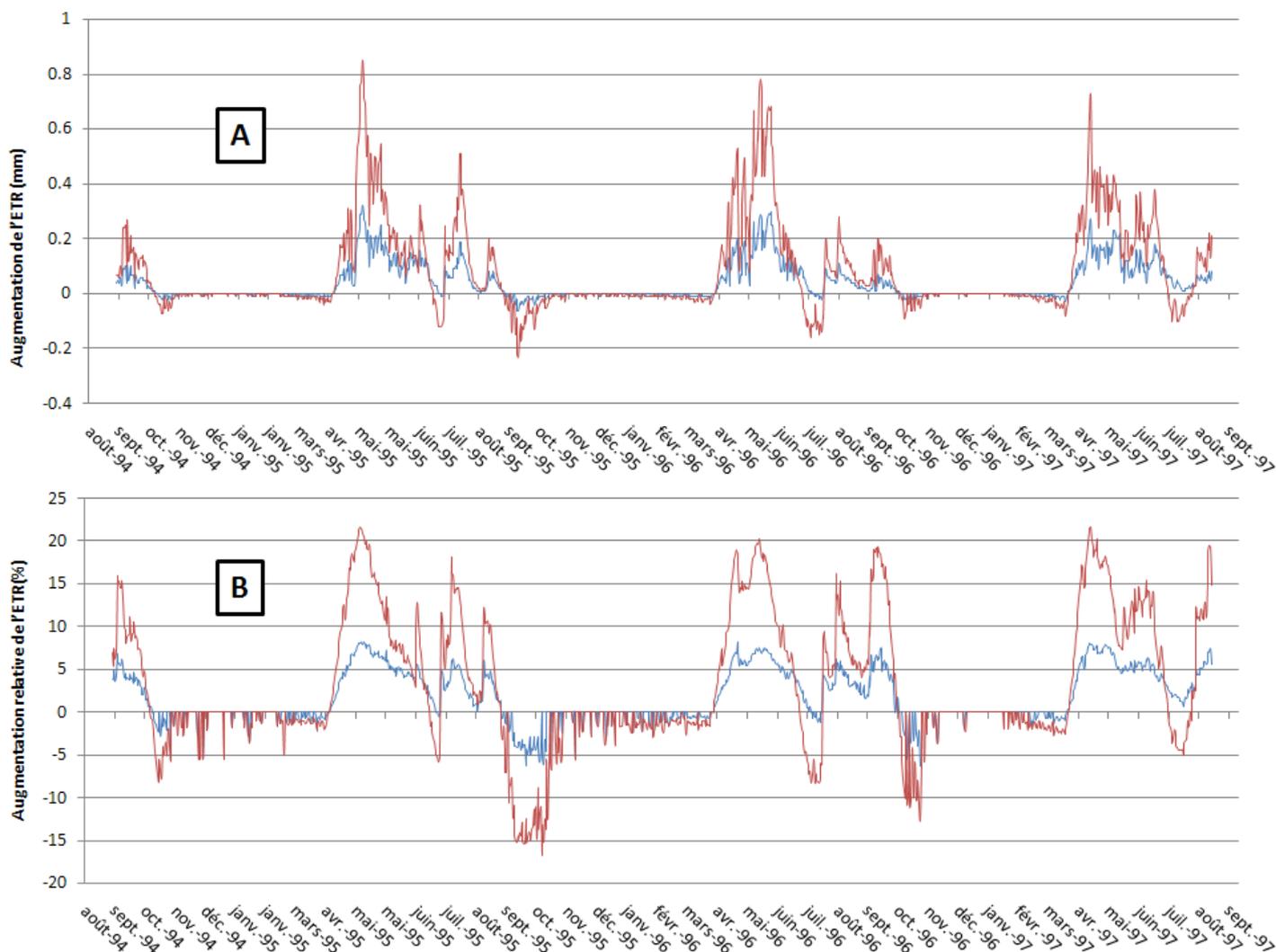


Figure 4.12 – Augmentation de l'évapotranspiration réelle journalière du bassin versant (A) et différence relative (B) entre une configuration sans haie et avec les réseaux de 140 m.ha<sup>-1</sup> (rouge) et 48 m.ha<sup>-1</sup> (bleu). Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997.

La figure Figure 4.12 - B montre cependant que l'augmentation relative de l'évapotranspiration réelle journalière à l'échelle du bassin versant peut atteindre des valeurs supérieures à la moyenne annuelle notamment durant la période d'activité des arbres entre avril et septembre. On observe en effet des augmentations pouvant atteindre respectivement 8 et 20 % pour les réseaux bocagers de

48 et 140 m.ha<sup>-1</sup>. Durant la période d'activité des arbres on note également des valeurs négatives pouvant correspondre à un assèchement du sol et à une augmentation de la profondeur du toit de la nappe (figure Figure 4.13) plus rapides en présence de haie réduisant ainsi la transpiration. La figure montre également une diminution de la transpiration durant la période sans feuilles des arbres qui correspond à la diminution de la surface de culture au sol liée à la présence de haie. Cette diminution est cependant plus faible en valeur absolue (figure Figure 4.12 - A)

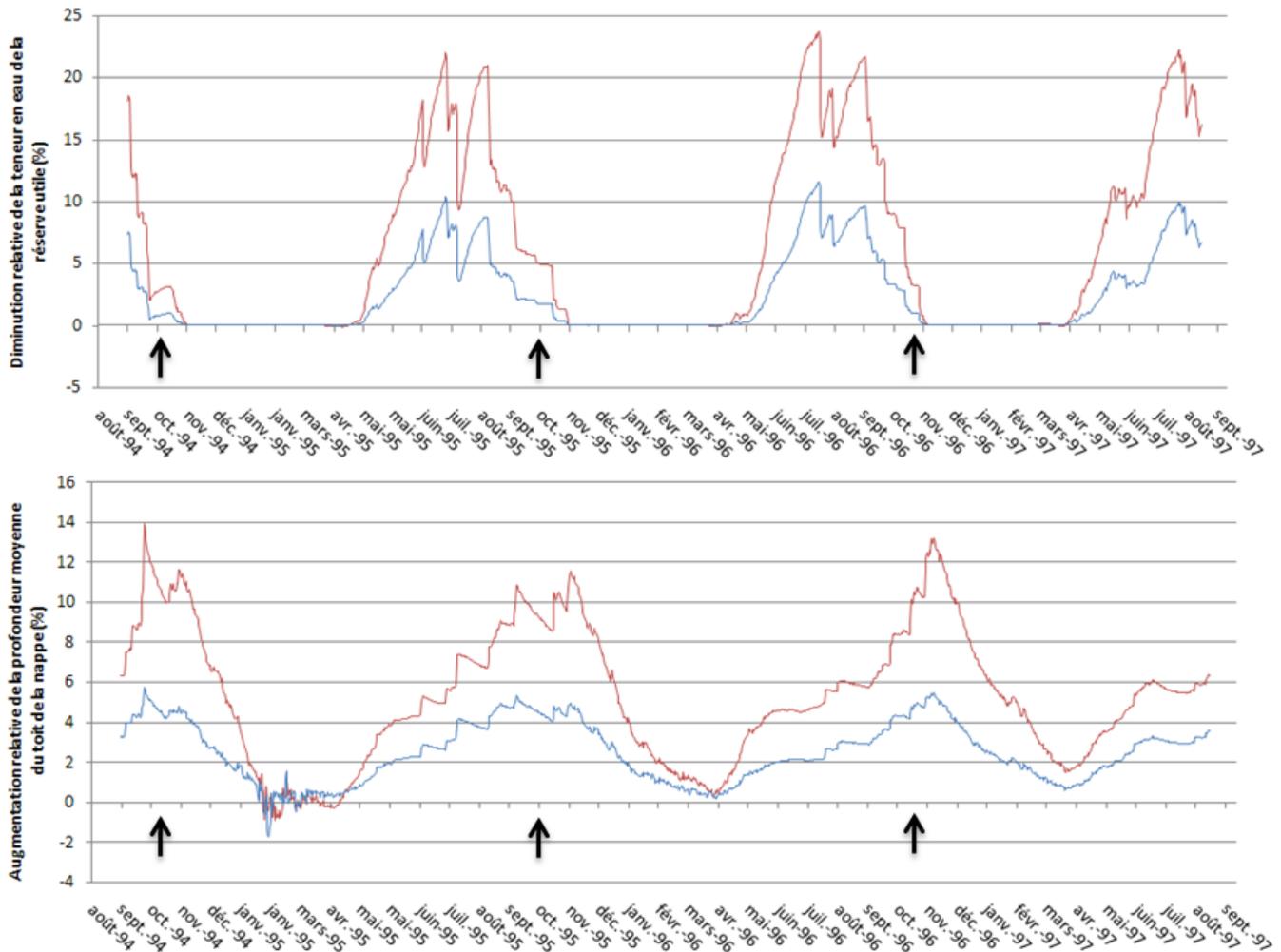


Figure 4.13 – Diminution relative de la teneur en eau moyenne journalière de la réserve utile et augmentation relative journalière de la profondeur moyenne du toit de la nappe à l'échelle du bassin versant entre une configuration sans haie et avec les réseaux de 140 m.ha<sup>-1</sup> (rouge) et 48 m.ha<sup>-1</sup> (bleu). Les flèches noires indiquent le moment de la chute des feuilles. Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997.

La diminution relative journalière, par rapport à un bassin sans haie, de la teneur en eau moyenne de la réserve utile des sols à l'échelle du bassin versant se fait essentiellement durant la période d'activité de l'arbre. Cette diminution atteint respectivement 10 à 20 % pour les réseaux de 48 et 140 m.ha<sup>-1</sup> (figure Figure 4.13). On note que la différence d'assèchement des sols perdure environ un mois après la chute des feuilles. L'augmentation relative de la profondeur moyenne du toit de la nappe se produit toute l'année et atteint respectivement 5 à 12 % pour les réseaux de 48 et 140 m.ha<sup>-1</sup>. L'augmentation est faible voire nulle en avril, puis augmente avec la reprise de la transpiration et atteint un maximum entre novembre et décembre, signe d'un retard de la réhumectation des sols et donc du drainage vers la nappe. Ces effets des haies sur la teneur en eau du sol et sur la profondeur du toit de la nappe entraînent une diminution du débit à l'exutoire en

## 4.2 Impact de la haie sur le bilan hydrique du bassin versant

présence de haies qui se fait essentiellement à la reprise des écoulements, globalement entre octobre et février (figure Figure 4.14 - A). Cette diminution peut atteindre 90 % des flux à cette période. La diminution du débit est globalement équivalente mais plus longue avec l'augmentation de la densité bocagère sur le bassin versant. La diminution du débit en présence de haies se manifeste également entre avril et juin mais de façon moins importante. Néanmoins les différences relatives de débit (figure Figure 4.14 – B) durant cette période peuvent atteindre 70 % des flux.

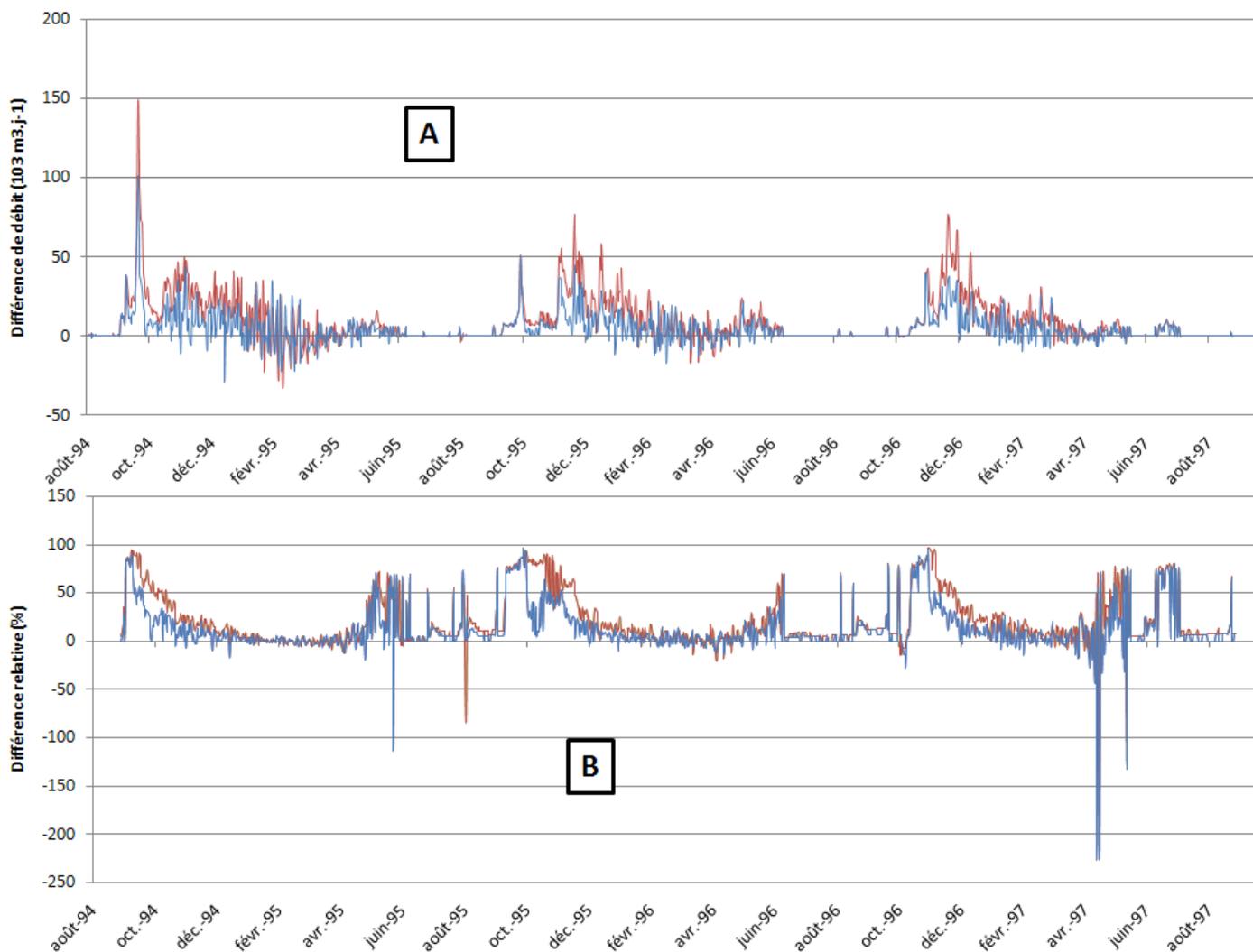


Figure 4.14 – Diminution du débit journalier (A) et différence relative (B) à l'exutoire du bassin versant entre une configuration sans haie et avec les réseaux de 140 m.ha<sup>-1</sup> (rouge) et 48 m.ha<sup>-1</sup> (bleu). Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997.

Les valeurs très négatives de différences relatives sur la figure Figure 4.14-B correspondent à une augmentation des débits en absence de haie. Cependant, cela s'applique à des différences de débits très faibles (figure Figure 4.14-A).

La diminution relative du débit à l'exutoire est fonction de la pluviométrie (Figure Figure 4.15). En effet plus les années sont sèches et plus la diminution relative de débit du bassin versant est importante. Cette diminution relative est d'autant plus marquée que la densité de haies sur le bassin augmente.

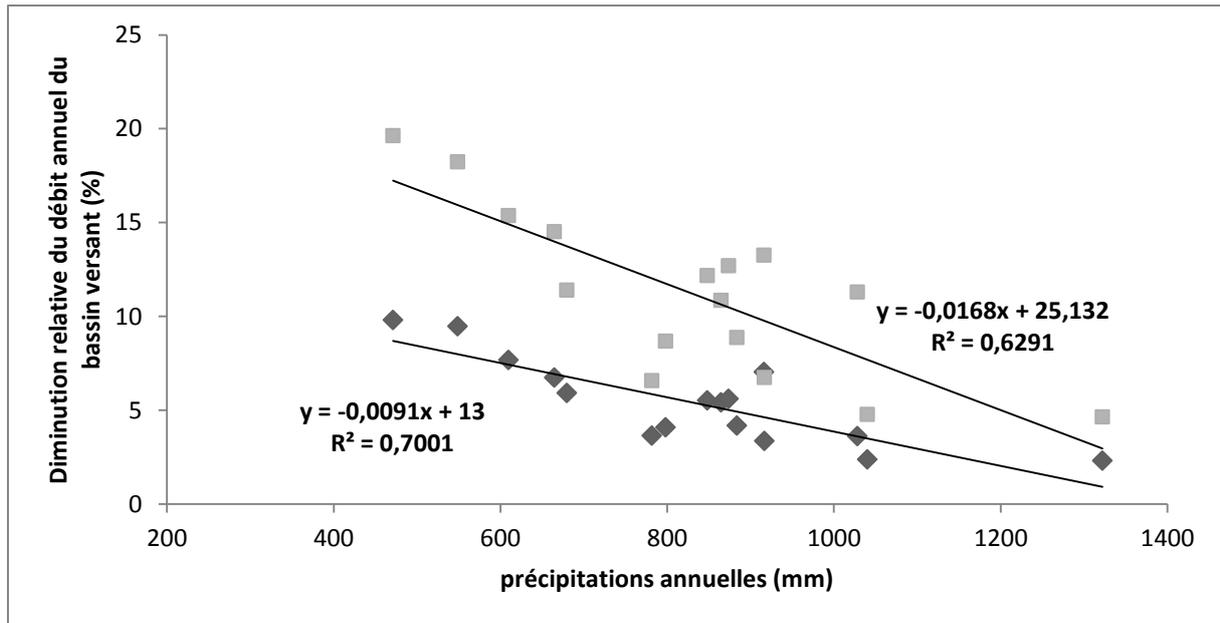


Figure 4.15- Variation relative de débit du bassin versant en fonction de la pluviométrie pour le réseau de  $48 \text{ m.ha}^{-1}$  (noir) et de  $140 \text{ m.ha}^{-1}$  (gris)

Il n'y a par contre pas de tendance en ce qui concerne les variations de débit absolues en fonction de la pluviométrie. Il n'y a pas non plus de tendance significative entre la pluviométrie et les différences de variation du toit de la nappe ou d'évapotranspiration entre les configurations avec et sans haie.

#### 4.2.5 Influence sur le bilan d'eau de la position des haies sur le versant

La longueur du linéaire de haie dans la maille influençant les composantes du bilan hydrique, cette source de variabilité a été éliminée afin d'analyser le rôle de la position des haies sur le versant. Pour cela, des réseaux fictifs ont été utilisés afin de déterminer l'influence de la position de la haie sur le versant (équivalente à une distance à la nappe), sur les composantes du bilan hydrique de la maille et du bassin versant. Dans un premier temps l'ensemble des longueurs de linéaires de haies des mailles double couvert du réseau bocager de 1999 ont été ramenées à une même longueur, soit 20 m par maille (la longueur de la maille). Les composantes du bilan hydrique de chaque maille double couvert ont ensuite été étudiées en fonction de la profondeur moyenne de la nappe et moyennées sur la durée de la simulation (1993-2010).

La figure Figure 4.16 présente la Profondeur Moyenne du Toit la Nappe (PMTN) sur 17 ans, pour chaque maille du bassin versant et la figure Figure 4.17 la répartition des mailles double couvert en fonction de cette profondeur moyenne pour le réseau bocager de 1999.

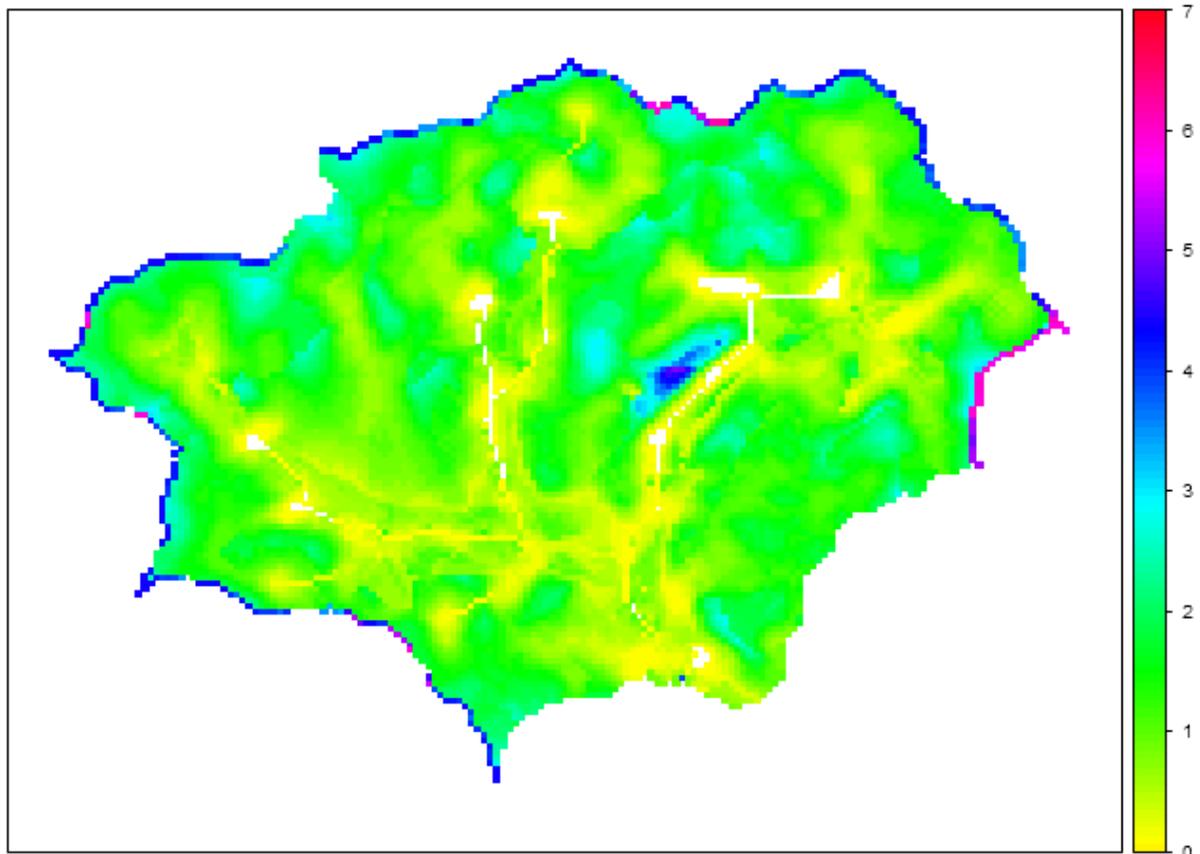


Figure 4.16 – Représentation de la profondeur moyenne de la nappe (m) pour l'ensemble du bassin versant de Kervidy-Naizin

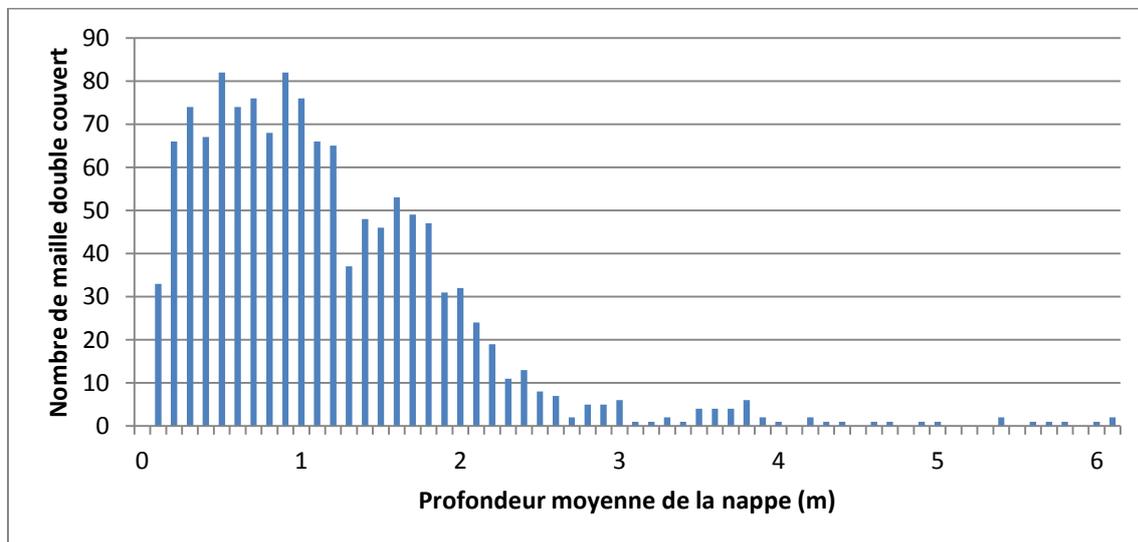


Figure 4.17 – Histogramme de la répartition des mailles double couvert en fonction de la profondeur moyenne de la nappe.

#### 4.2.5.1 Impact sur les mailles double couvert

La figure Figure 4.18 présente, l'évolution moyenne de la transpiration de la haie, de la diminution de transpiration de la culture associée, de la diminution de la teneur en eau de la réserve utile et de l'augmentation de l'ETR des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haie et selon

la PMTN. On constate que la transpiration de la haie présente une tendance à la baisse avec l'augmentation de la PMTN. Cela transcrit la diminution de l'eau disponible par remontées capillaires lorsque la PMTN augmente.

La diminution de la transpiration d'une culture entre une maille avec et sans haie semble de plus en plus importante avec l'augmentation de la PMTN (figure Figure 4.18). Pour des faibles PMTN, on note une augmentation de la transpiration de la culture (valeurs négatives). Cet effet est le résultat d'une diminution des stress intégrés dans STICS tel que l'effet d'anoxie, entraînant également l'augmentation de la profondeur moyenne du front racinaire de la culture (figure Figure 4.19). C'est la diminution de la teneur en eau du sol et du niveau du toit de la nappe en présence de haie qui réduit ce stress.

Lorsque la profondeur du toit de la nappe est faible, la haie et la culture ont à leur disposition l'eau dont elles ont besoin. La culture transpire alors quasiment de la même façon indépendamment de la présence de la haie. Au contraire, lorsque la profondeur du toit de la nappe augmente, la disponibilité en eau diminue et les deux couverts doivent se partager l'eau de la réserve utile. L'augmentation de la profondeur du toit de la nappe traduit donc une plus forte interaction de compétition entre la haie et la culture associée.

Enfin le bilan des deux mécanismes présentés ci-dessus entraîne une augmentation de l'ETR de la maille d'autant plus forte que la PMTN est faible (figure Figure 4.18). L'augmentation de l'ETR des mailles double couvert est donc plus forte en bas de versant qu'en haut de versant.

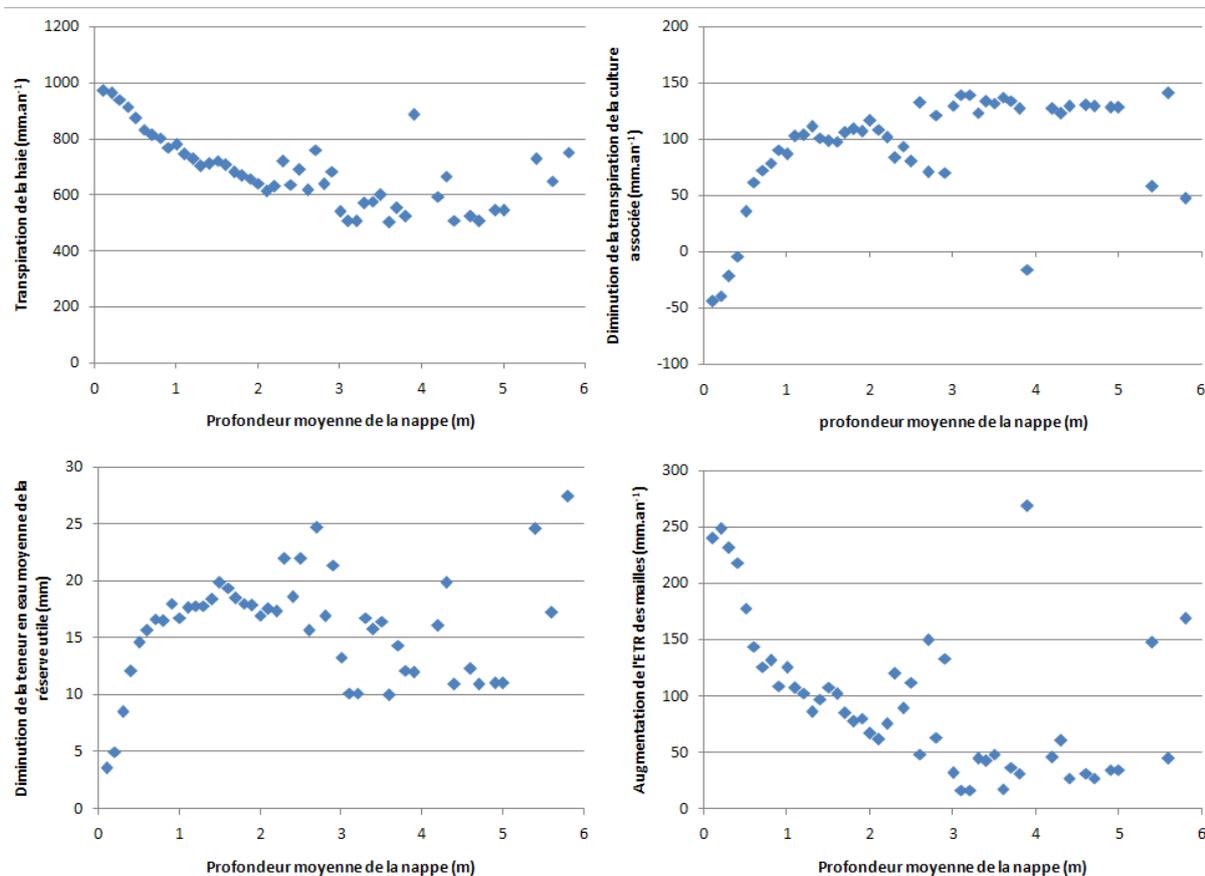


Figure 4.18 Variation moyenne de la transpiration de la haie, de la diminution de la transpiration de la culture, de la diminution de la teneur en eau de la réserve utile et de l'augmentation de l'ETR des mailles entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN.

## 4.2 Impact de la haie sur le bilan hydrique du bassin versant

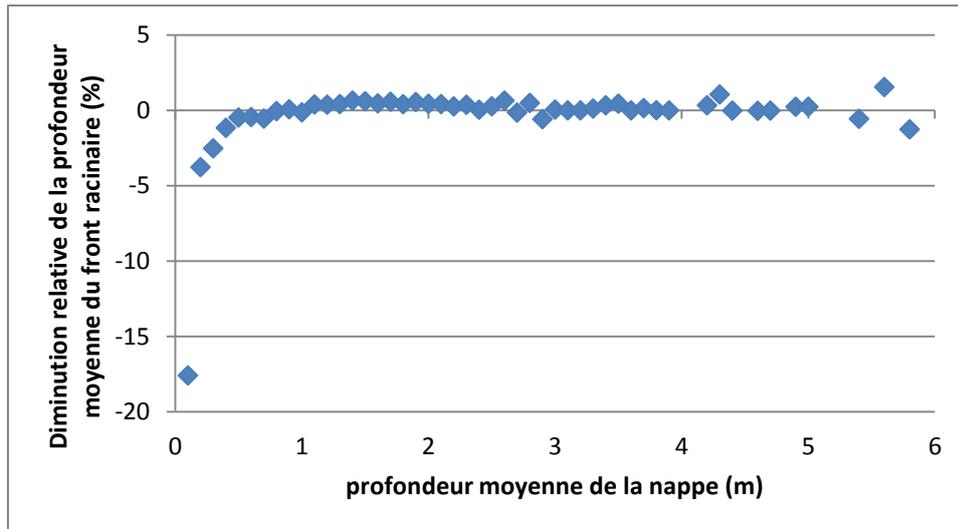


Figure 4.19 – Diminution relative moyenne de la profondeur du front racinaire de la culture entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN.

La figure Figure 4.20 montre une augmentation des remontées capillaires pour une PMTN faible. Cette augmentation s'annule pour des PMTN plus importantes. Cela montre bien l'influence de la nappe sur la transpiration pour les positions de bas de versant. On constate également une diminution du ruissellement entre les configurations avec et sans haie aux faibles PMTN. Cette diminution du ruissellement n'est pas liée à l'effet de barrière physique de la haie car ce mécanisme n'a pas été implémenté dans le modèle. Cette diminution est en fait uniquement liée à une diminution dans l'espace et le temps de la surface de sol saturée en présence de haie et donc à une diminution du ruissellement sur surface saturée.

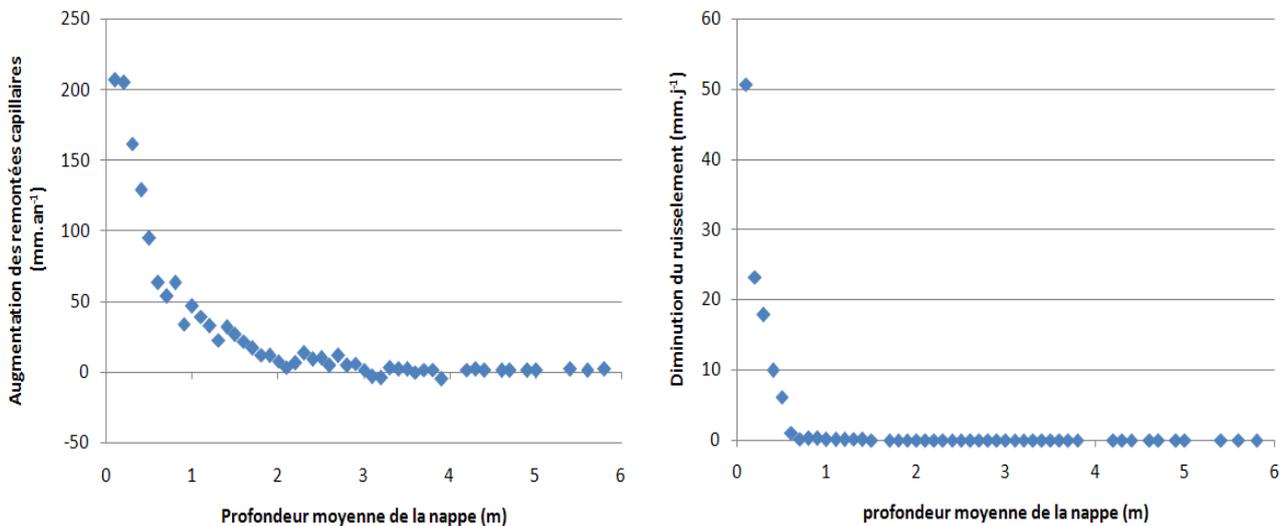


Figure 4.20 – Augmentation des remontées capillaires et diminution du ruissellement entre une configuration avec et sans haie selon la PMTN.

#### 4.2.5.2 Effet du type de culture associée avec la haie

L'influence du type de culture associé à la haie a été testée en utilisant le réseau bocager précédent mais avec des mailles haie-culture identiques, c'est-à-dire dont la culture associée à la haie est la même sur l'ensemble des mailles double couvert. Trois associations différentes ont été testées, qui sont les associations haie-prairie pâturée, haie-blé, et haie-maïs.

La figure Figure 4.21 montre la transpiration de la haie en fonction de la PMTN pour chaque type de culture associé à la haie. On constate qu'à faible PMTN la transpiration de la haie est quasiment équivalente quel que soit le type d'association haie-culture. Comme vu précédemment, la transpiration de la haie diminue avec l'augmentation de la PMTN dans la maille. Cependant vu que l'ensemble des mailles double couvert sont identiques, à l'exception de leur position sur le bassin versant, on observe une distribution moins dispersée des points et une bonne relation apparaît entre les différents flux et la PMTN. La transpiration de la haie dans les trois cas diminue pour une PMTN allant de 0 à 2 m, puis atteint un palier pour les PMTN supérieures. Ce palier est différent pour chaque type d'association haie-culture. En effet il est plus faible pour la prairie (env. 29 %), plus important pour le maïs (env. 60 %) et intermédiaire pour le blé (env. 37 %). Cela peut s'expliquer en partie par la période d'activité de chaque culture. Le blé étant semé plus tôt, il entre plus rapidement en compétition avec la haie que le maïs. La prairie est, elle, en compétition avec la haie sur toute la période d'activité de la haie, car il s'agit d'une prairie permanente contrairement aux deux autres cultures qui laissent le sol nu durant une partie de l'année.

Ces paliers sont également observés pour la diminution relative de la transpiration de la culture associée en présence de haie. Ils se produisent pour une PMTN située entre 1 et 2 m en fonction du type d'association. Le niveau de ces paliers est également différent pour chaque type d'association. Ce niveau est relativement plus élevé pour le maïs et plus bas pour la prairie. Pour ces cultures cela s'explique pour les mêmes raisons qui ont été évoquées précédemment. Le maïs étant semé au moment de la reprise d'activité de la haie, la compétition pour l'eau avec le maïs est donc importante. Au contraire, le blé étant semé plus tôt dans l'année, il entre en compétition avec la haie au moment où il est déjà bien développé.

Ces observations se traduisent par une augmentation relative de l'évapotranspiration des mailles plus forte pour le cas haie-blé (figure Figure 4.21) lorsque les PMTN augmentent.

## 4.2 Impact de la haie sur le bilan hydrique du bassin versant

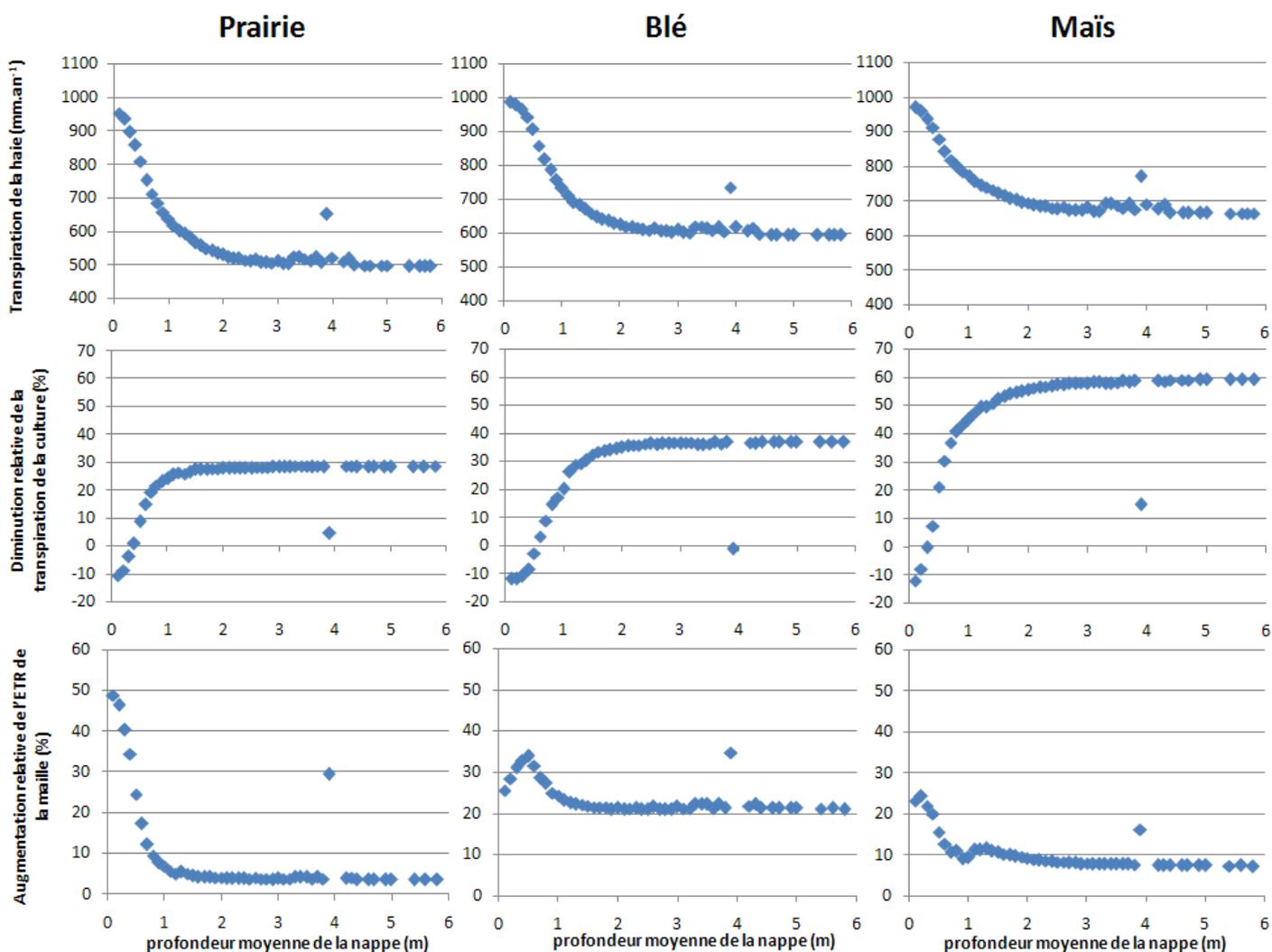


Figure 4.21 – Transpiration moyenne annuelle de la haie, Diminution relative de la transpiration de la culture et augmentation relative de l'ETR de la maille entre une configuration avec et sans haie selon la PMTN et le type de culture associée à la haie (prairie, blé, maïs).

La plus grande complémentarité entre la haie et le blé se traduit par une augmentation du facteur de stress en eau plus faible que pour le maïs et la prairie, et par une hausse plus importante de la diminution de la réserve utile moyenne annuelle, entre une configuration avec et sans haie pour des PMTN élevées (figure Figure 4.22). Cette diminution de la teneur en eau de la réserve utile se traduit par une diminution du ruissellement sur surface saturée pour des PMTN faibles. Cette diminution est plus importante dans le cas d'une association haie-blé.

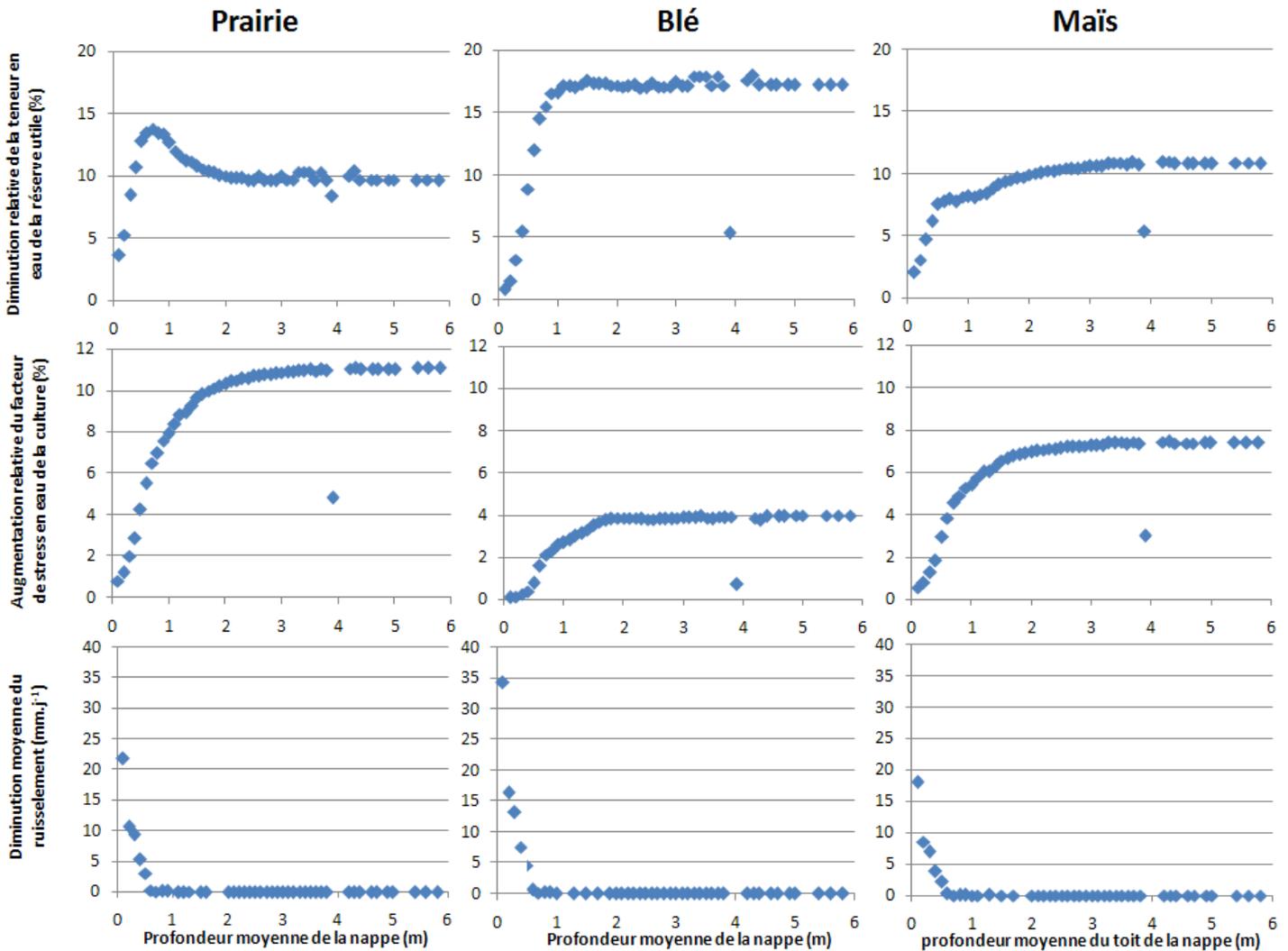


Figure 4.22 – Diminution relative moyenne de la quantité d’eau de la réserve utile, augmentation relative moyenne du facteur de stress en eau et diminution moyenne du ruissellement entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN et le type de culture associée à la haie.

#### 4.2.6 Influence de la taille d’entretien des haies

L’impact de la taille d’entretien sur les flux d’eau a été estimé à partir de trois scénarios de taille pour le réseau de haies de 1999, en faisant varier la surface de la canopée, le LAI et la densité du système racinaire affectés par la taille. Dans un premier scénario, la largeur de la canopée est réduite de moitié, ce qui peut reproduire les tailles mécanisées de part et d’autre de la haie. Dans un second scénario, c’est le LAI qui est réduit de moitié, ce qui peut reproduire les tailles de haut jet. Enfin dans le troisième scénario, l’arbre est totalement élagué à l’image des ragosses.

Le tableau 17 montre l’impact moyen de l’entretien des haies sur les mailles double couvert. Comme on pouvait s’y attendre c’est le scénario d’arbres complètement élagués qui a le plus d’influence. En effet on observe une diminution de 4,8 % de l’évapotranspiration. Le scénario qui a ensuite le plus d’impact est celui de la réduction de la canopée de moitié, avec une diminution de l’évapotranspiration de 4,5 %. Le scénario de diminution du LAI de moitié est celui qui a le moins d’effet sur l’évapotranspiration avec une diminution de 1,8 %. L’effet sur la transpiration de la haie

## 4.2 Impact de la haie sur le bilan hydrique du bassin versant

est plus importante soit une diminution de 24,8 % pour l'arbre totalement élagué, 22,3 % pour la réduction de la canopée et 11 % pour la réduction du LAI. La réduction de la transpiration de la haie est compensée par une augmentation de la transpiration de la culture et de l'évaporation du sol.

	Non taillée	LAI / 2	Canopée / 2	Totalement élaguée
Évapotranspiration	650	638	621	619
Transpiration de la haie	725	645	563	545
Transpiration de la culture	311	314	325	325
Évaporation du sol	120	134	137	141
Teneur en eau moyenne de la RU	127	129	131	131

**Tableau 4.9 - Valeurs moyennes annuelles (en mm) de l'évapotranspiration, de la transpiration de la haie et de la culture, de l'évaporation du sol et de la teneur en eau de la réserve utile à l'échelle des mailles double couvert pour les différents scénarios de taille.**

A l'échelle du bassin versant l'impact de l'entretien des haies est beaucoup plus faible avec une diminution du débit à l'exutoire de 0,6 à 1,4 % en fonction du mode de gestion, et une diminution de l'évapotranspiration maximale de 0,3 % (tableau Tableau 4.10).

	Non taillée	LAI / 2	Canopée / 2	Totalement taillée
Débit à l'exutoire ( $10^6 \text{ m}^3$ )	1,58	1,589	1,6	1,602
Évapotranspiration (mm)	392	392	391	391

**Tableau 4.10 - Valeurs moyennes annuelles du débit à l'exutoire et de l'évapotranspiration pour les différents scénarios de taille.**

## 4.2.7 Discussion de l'influence de la haie sur le bilan hydrique

### 4.2.7.1 Modification des écoulements

La simulation, dans le modèle TNT2, d'un arrêt des écoulements quand le gradient hydraulique de la nappe s'inverse permet avec cette approximation de modéliser plus fidèlement l'effet de la haie. En effet cette inversion de gradient a été observée dans les zones de bas fond où elle est favorisée par les prélèvements importants d'eau par les racines liés à la forte transpiration des arbres (Caubel 2001, Ghazavi 2008). Cependant les écoulements modélisés avec TNT2 engendrent fréquemment des inversions de gradient essentiellement en bas de versant, en présence de haie ou non. Cela est vraisemblablement lié au fonctionnement du modèle qui simule les écoulements profonds d'une maille en fonction de la topographie du bassin versant plutôt qu'avec le gradient hydraulique local de la nappe. De ce fait même si les débits simulés à l'exutoire du bassin versant sont plutôt bons, les profondeurs du toit de la nappe sont moins fidèles à la réalité (Annexe 2) que ce soit avec ou sans modification des écoulements.

La présence des haies entraîne néanmoins une augmentation de l'occurrence des écoulements de nappe nuls sur les mailles où elles sont présentes, ainsi que sur certaines mailles voisines. A l'inverse l'occurrence de ces gradients sur d'autres mailles sans haie diminue, sans doute par un effet d'équilibrage de la nappe. D'une manière générale, avec ou sans haie, la prise en compte des gradients négatifs sur le bassin versant modifie l'équilibre global de la nappe par une diminution de la PMTN dans les zones de haut de versant et par une augmentation dans les zones de bas de versant. Cette modification d'équilibre modifie notamment les flux d'azote car l'augmentation de la profondeur du toit de la nappe dans les zones de bas fond entraîne une diminution des taux de dénitrification annuels de l'ordre de 1%. Elle diminue également le débit annuel de 2,5%.

### 4.2.7.2 Effet de l'association haie-culture sur les mailles.

La présence de haies sur les mailles entraîne une augmentation de l'évapotranspiration. Cette augmentation est liée à une transpiration plus importante de la haie qui est supérieure à la diminution de la transpiration par unité de surface de la culture associée et de l'évaporation du sol. La diminution de transpiration de la culture associée est liée à un effet de la compétition pour l'eau entre la haie et la culture à rayonnement solaire intercepté équivalent. Cette compétition est d'autant plus importante que la période d'activité des deux couverts se chevauche. Elle est plus forte pour le couple maïs/haie que pour le couple blé/haie. Cet effet de compétition pour l'eau est cependant sûrement surestimé dans le modèle pour plusieurs raisons. La première est que l'on a établi une hiérarchie entre la haie et la culture, la haie étant la première à effectuer ces prélèvements à chaque pas de temps. La seconde est liée à un effet intrinsèque des couches de sol du modèle. En effet chaque couche de sol ne possède qu'une valeur de teneur en eau à un pas de temps donné. Il n'y a donc pas de différences d'humidité à l'intérieur de la maille même si la haie prélève plus d'eau que la culture associée. De ce fait, même si à un pas de temps donné la haie n'a accès qu'à une partie de la ressource en eau de la maille via le rationnement des surfaces, les différences de prélèvements en eau dans le sol entre la haie et la culture sont ensuite homogénéisées au pas de temps suivant via cette variable unique. La haie et la culture peuvent donc progressivement avoir accès à une quantité d'eau plus importante que celle présente dans la zone qui leur a été attribuée. Cet effet peut être plus ou moins important en fonction du type d'association. La figure Figure 4.23 illustre un exemple de l'effet sur la teneur en eau d'une couche

de sol, au cours d'un pas de temps, lorsqu'il y a une différence de prélèvements entre deux couverts. Pour la simplification de la figure seulement deux ratios ont été représentés ( $R_1$  et  $R_2$ ). Lorsque les deux couverts poussent en même temps (Cas 1) la compétition est plus forte mais le prélèvement successif des deux couverts modère la différence entre la teneur en eau restante pour un ratio donnée et la teneur en eau moyenne à la fin du pas de temps. Au contraire lorsque seul l'un des deux couverts transpire (Cas 2), la différence entre la teneur en eau restante pendant prélèvement pour un ratio donnée et la teneur en eau moyenne à la fin du pas de temps est plus importante. Cet effet est bien évidemment plus ou moins important selon le ratio de la haie dans la maille.

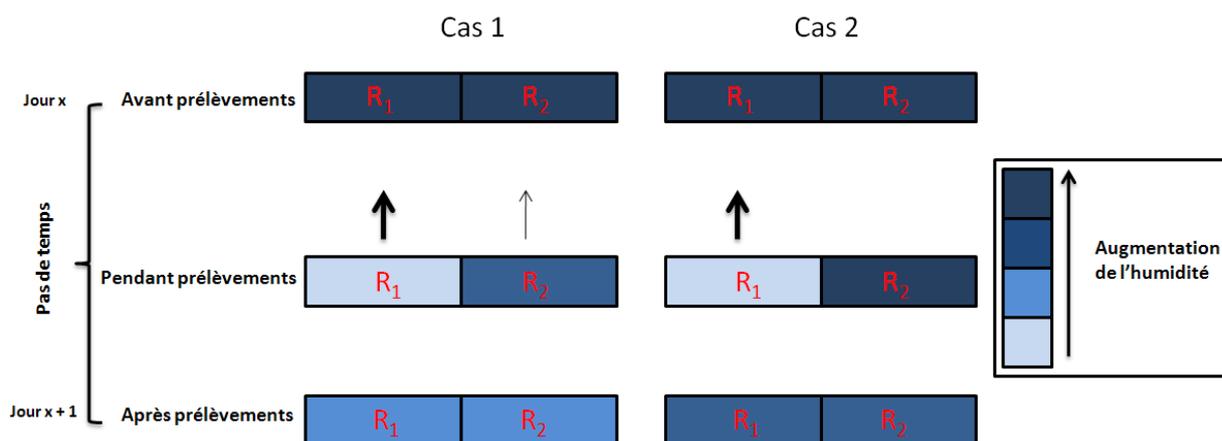


Figure 4.23 – Illustration de l'effet de prélèvements différents des deux couverts sur la teneur en eau d'une couche de sol.

Dans le modèle l'étape de la figure Figure 4.23 correspondant à l'état intermédiaire (pendant prélèvements) n'existe pas, la teneur en eau d'une couche est constamment homogène. Cette étape a ici été ajoutée pour illustrer les différences entre la teneur en eau qui est censée rester dans une couche pour un couvert donné et la teneur en eau pondérée à la fin du pas de temps.

D'autre part, pour les cultures dont le développement est limité par des effets d'anoxie du système racinaire, la présence de la haie en bas de versant va diminuer ce stress en réduisant la teneur en eau des couches. Là encore la valeur unique de la teneur en eau des couches surestime ce processus par une diminution du stress sur l'ensemble de la maille.

### 4.2.7.3 Effet de la position des haies sur le versant

La transpiration de la haie est plus importante lorsqu'elle est située en bas de versant plutôt qu'en haut de versant, ce qui est en accord avec les résultats expérimentaux de Crosbie et al. (2007). Cela est dû, en bas de versant, à la proximité entre la nappe et la surface. De plus cette disponibilité en eau diminue l'impact de la compétition entre les deux couverts d'une maille.

### 4.2.7.4 Influence de la présence de haies sur les débits à l'exutoire du bassin versant

L'augmentation de la transpiration sur les mailles double couvert en présence de haie diminue, sur ces mailles, la teneur en eau du sol par rapport à une configuration sans haie. Cette diminution se prolonge de 1 à 2 mois après la chute des feuilles des arbres selon les années. Il y a donc un retard à la réhumectation des sols lors de la reprise des écoulements. C'est ce retard couplé à une augmentation de la profondeur du toit de la nappe sur les mailles double couvert qui entraîne une

forte diminution des débits à la reprise des écoulements. Cette diminution peut atteindre près de 90 % des flux à l'exutoire du bassin versant, d'autant qu'à cette période les débits soient faibles. La durée de cette réduction est d'autant plus importante que la densité bocagère sur le bassin versant est forte. En effet, la réduction moyenne de la teneur en eau des sols et l'augmentation moyenne de la profondeur du toit de la nappe à l'échelle du bassin versant est d'autant plus importante que la densité du réseau bocager augmente. La non prise en compte de l'interception des précipitations par la canopée des arbres peut encore sous estimer la diminution des débits lors de la reprise des écoulements. En effet, il a été montré que l'interception pouvait réduire la quantité des précipitations qui arrivent au sol en moyenne de 28 % par événement pluvieux durant la période avec feuilles et de 12 % pour la période sans feuilles sur une largeur de 7 à 8 m de part et d'autre de la haie (Ghazavi et al., 2008). De ce fait, les observations sur le terrain montrent que le retard de la réhumectation des sols peut être de 3 mois à proximité de la haie (chapitre 2.5.3.1).

Comme pour le modèle de Viaud et al. (2005), la diminution relative des débits est d'autant plus importante que l'année est sèche, et ce gradient augmente avec la densité du réseau de haies. Les années très humides, la présence de haies, quelle que soit la densité du réseau de haies, ne diminue que marginalement les débits.

Les simulations n'ont cependant pas montré d'augmentation relative significative de l'évapotranspiration annuelle avec les précipitations, contrairement au modèle de Viaud et al. (2005). Cela peut s'expliquer premièrement par le fait que les deux modèles sont très différents en termes de prise en compte de l'eau du sol facilement disponible. En effet dans le modèle de Viaud et al. (2005), la teneur en eau disponible est évaluée globalement sur l'ensemble de la profondeur du sol, et indépendamment de la végétation. Au contraire dans le modèle présenté ici, elle tient compte de la densité racinaire des différents horizons et de la résistance des plantes à la sécheresse. Mais la raison principale est sans doute liée au fait que la transpiration de la haie est fonction du type de culture qui lui est associée. Le nombre important de configurations haie-culture sur le bassin versant ainsi que les différentes configurations de succession des cultures sur chaque parcelle peuvent expliquer que la variabilité de la transpiration annuelle de la haie soit moins dépendante des précipitations.

Enfin, pour des raisons de simplicité, les effets micrométéorologiques liés à l'orientation de la haie et à la position sur le versant (ombrage, évapotranspiration différenciés en fonction de l'orientation, vitesse du vent, température et humidité de l'air) n'ont également pas pu être pris en compte. Ces effets peuvent avoir un impact sur le développement et la transpiration de la haie et de la culture associée (Missonnier, 1976).

### 4.3 Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant

#### 4.3.1 Calage des paramètres concernant le bilan d'azote du modèle après modification des écoulements

Les principaux paramètres permettant de calibrer les flux et les concentrations d'azote à l'exutoire (à l'exception des apports d'intrants) sont ceux qui touchent à la dénitrification et la minéralisation. Les flux de dénitrification ont été localement mesurés et globalement estimés par modélisation sur des bassins versant de Bretagne (Bordenave et al., 2005; Oehler et al., 2007; Oehler et al., 2009). Ils ont notamment été estimés à  $3,2 \text{ g Nm}^{-2}\text{year}^{-1}$  pour le bassin versant de Naizin. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle obtenue par simulation avec TNT2 soit  $3,4 \text{ g N.m}^{-2}\text{.an}^{-1}$ . La minéralisation a été estimée dans les sols français par Mary et Rémy (1979) et Mary et al. (1996) et se situe dans une fourchette allant de  $90$  à  $160 \text{ kg N.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$ . La minéralisation moyenne annuelle calculée avec le modèle est de  $145 \text{ kg N.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$ , ce qui est dans le haut de la fourchette des observations précédentes, en cohérence avec un historique de forts apports organiques sur ces sols.

La figure Figure 4.24 montre que les valeurs simulées de concentration en azote à l'exutoire du bassin depuis 2000 sont du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées. Les flux cumulés sont également très semblables avec une différence relative de 1,4 % entre 2000 et 2010.

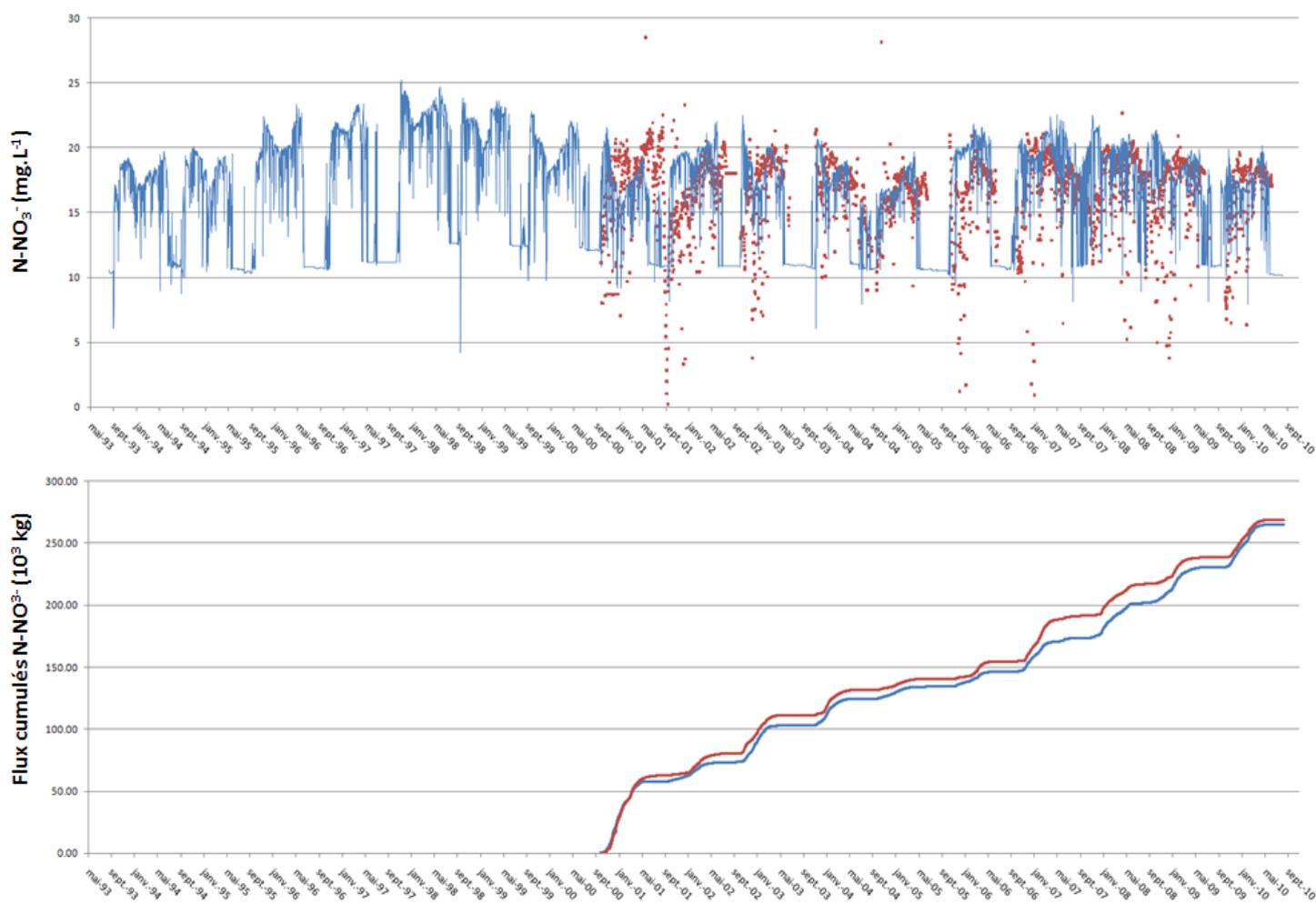


Figure 4.24 – Variations des concentrations d'azote et des flux cumulés mesurés (rouge) et simulés (bleu) à l'exutoire du bassin versant de Kervidy-Naizin entre 1993 et 2010. Pour les valeurs mesurées les concentrations ne sont disponibles qu'entre 2000 et 2010.

On note cependant que les valeurs de concentrations simulées pour les faibles débits, essentiellement à la reprise des écoulements, ainsi que lors des crues, montrent des valeurs plus fortes que les valeurs mesurées.

### 4.3.2 Influence de la densité des réseaux de haies

#### 4.3.2.1 Effet de la surface de sol occupée par les haies

La présence d'un réseau bocager sur un bassin versant entraîne une diminution de la surface cultivée. En effet plus la densité du réseau bocager est importante et plus la surface cultivable est réduite du fait de l'emprise au sol des haies. Cela entraîne naturellement une diminution des intrants liés à la fertilisation des cultures. On observe donc une diminution de la teneur en azote prélevé dans une maille (haie plus culture associée) avec l'augmentation du linéaire de haie (figure Figure 4.25). Cependant pour les faibles longueurs du linéaire de haie ( $< 10 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) on note une augmentation des prélèvements qui est sans doute le résultat d'une compensation entre la réduction des intrants et la restitution par la haie lors de la chute des feuilles.

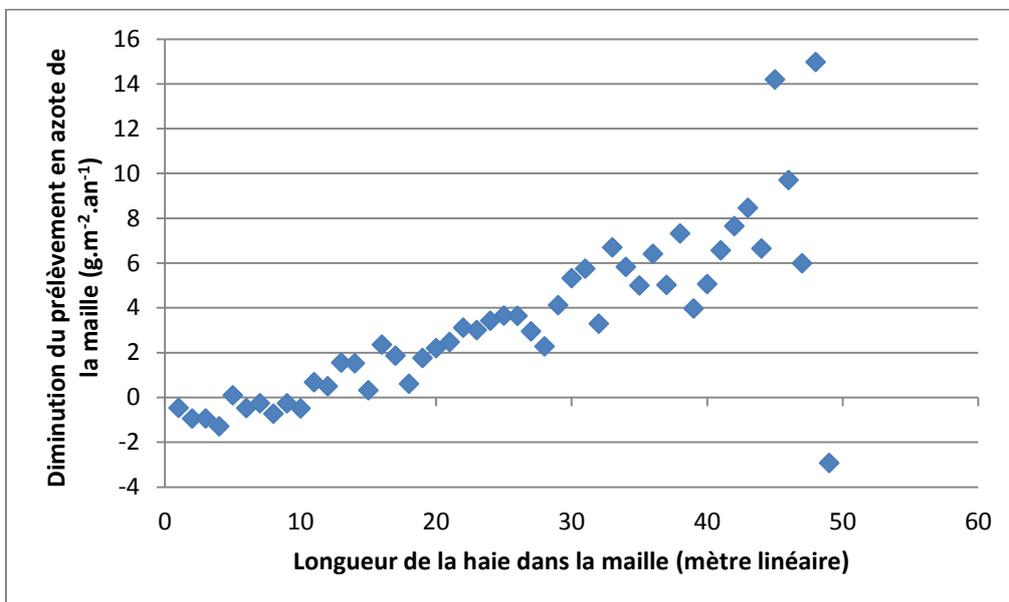


Figure 4.25 – Diminution moyenne du prélèvement en azote dans la maille (haie plus culture) avec l'augmentation du linéaire de haie.

La consommation biologique en azote, par unité de surface de bassin versant, correspond à la dénitrification, au stockage dans le bois des arbres et à l'exportation par les cultures (figure Figure 4.26). La présence du réseau bocager sur le bassin entraîne une diminution de la dénitrification, une augmentation du stockage d'azote dans le bois et une diminution de l'exportation d'azote liée à la récolte des cultures. Ces variations sont de plus en plus fortes lorsque la densité de haies augmente sur le bassin versant.

La consommation biologique totale en azote du bassin reste néanmoins équivalente dans les trois cas étudiés (réseau de 1952, de 1999 et sans haie), bien que la tendance soit légèrement à la baisse avec l'augmentation de la densité de haies. On a en effet une diminution de la consommation biologique totale d'environ 1% avec le réseau de  $48 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$  et d'environ 2% avec le réseau de  $140 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$  par rapport à une configuration sans haie, de l'ordre au plus de quelques grammes pour chacun des processus.

### 4.3 Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant

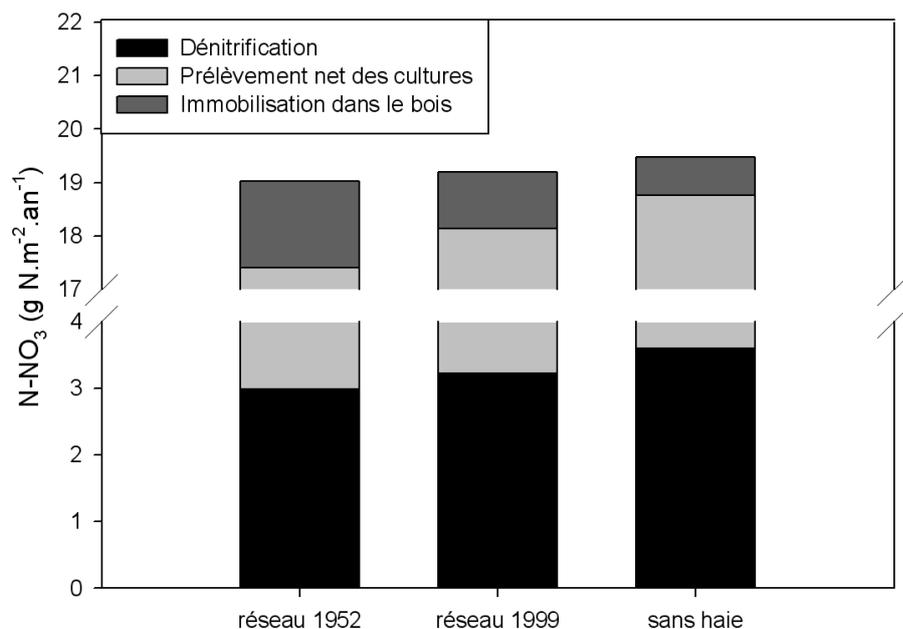


Figure 4.26 - Histogramme cumulé des flux annuels moyens sur le bassin versant de dénitrification, exportation par les cultures et immobilisation par les haies et bosquets de l'azote pour les simulations avec les réseaux de haie de 140 m.ha<sup>-1</sup> (1952) de 48 m.ha<sup>-1</sup> (1999) et sans haie.

Afin de déterminer l'efficacité de la haie à diminuer les pertes d'azote par rapport à un autre couvert, on calcule les pertes relatives qui correspondent à la part des entrées qui échappe à la consommation biologique (stockage dans le bois, dénitrification et export par les cultures) par rapport à la totalité de ces entrées sur le bassin versant. Cet azote perdu se retrouve soit dans les résidus de culture ou de haie, soit dans le sol soit dans la nappe. Les pertes relatives d'azote sont déterminées par la formule suivante :

$$\text{Pertes relatives} = (\sum \text{entrées} - \text{Consommation biologique}) / \sum \text{entrées}$$

La figure Figure 4.27 montre que le pourcentage d'azote apporté sur le bassin versant et non consommé biologiquement diminue avec l'augmentation de la densité bocagère.

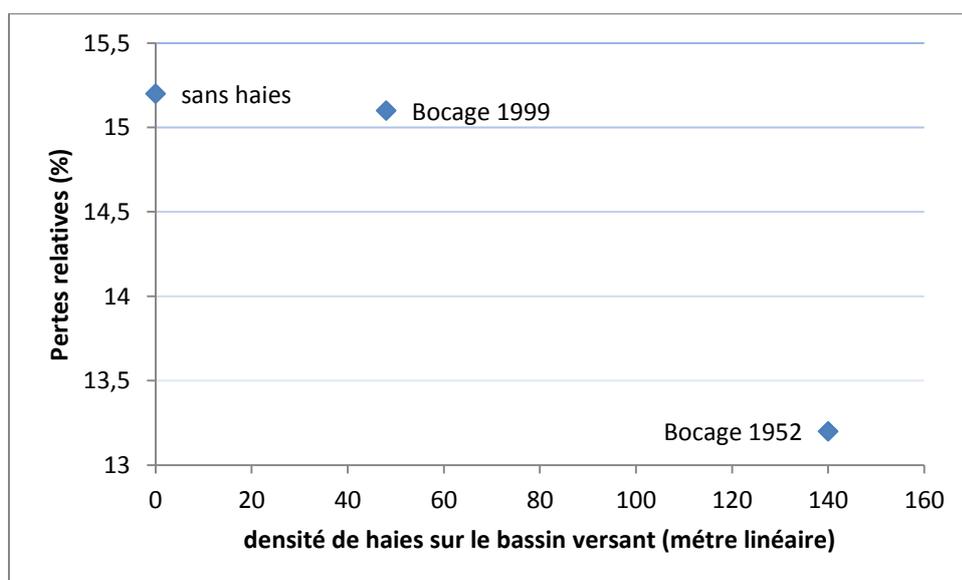


Figure 4.27 - Évolution des pertes relatives d'azote avec l'augmentation de la densité de haie.

Cette diminution avec l'augmentation de la densité de haie sur le bassin versant n'est pas linéaire. Elle n'est en effet que de 0,1 unité pour le réseau bocager de 48 m.ha<sup>-1</sup>, tandis qu'elle est de 2 unités pour le réseau de 140 m.ha<sup>-1</sup>.

#### 4.3.2.2 Impact sur les mailles double couvert

A l'échelle des mailles double couvert les variations des flux d'azote sont présentées dans le tableau Tableau 4.11. Les pertes en azote organique diminuent de 35,5 et 47,6 % respectivement pour les réseaux de 48 et 140 m.ha<sup>-1</sup> par rapport aux mêmes mailles sans haie, la dénitrification diminue de 19,5 et 27,6 % et la minéralisation nette diminue de 9,3 et 11,9 %.

Densité de haies (m.ha <sup>-1</sup> )	Avec haie		Même mailles sans haie		Différence relative (%)	
	48	140	48	140	48	140
Dénitrification	2,93	2,30	3,64	3,18	19,5	27,6
Minéralisation nette	15,34	13,99	16,91	15,88	9,3	11,9
Perte de l'humus	2,87	1,80	4,45	3,44	35,5	47,6
Prélèvement de la haie	12,89	12,28	0	0	-	-
Prélèvement des cultures	24,12	22,64	27,56	26,99	12,5	16,1
Prélèvement de la maille	26,28	25	27,6	27	4,8	7,6

Tableau 4.11 - Valeurs moyennes en g N m<sup>-2</sup> .an<sup>-1</sup> de la dénitrification, de la minéralisation nette, des pertes en azote de l'humus et des prélèvements de la haie, des cultures et de la maille (haie plus culture), à l'échelle des mailles double couvert de 1999 (48 m.ha<sup>-1</sup>) et 1952 (140m.ha<sup>-1</sup>), pour des simulations avec et sans haie.

Ces valeurs constituent des moyennes qui prennent en compte les différentes positions dans le versant et les différentes associations de culture et rotation sur la période étudiée.

Les figures Figure 4.28, Figure 4.29 et Figure 4.30 montrent l'impact moyen de la longueur du linéaire de haie dans la maille sur les différents termes du bilan d'azote. On constate, sur l'ensemble de ces figures, une plus faible dispersion des points pour les longueurs de linéaire faibles que pour les longueurs de linéaire élevées. Cette dispersion comme pour les termes du bilan d'eau est, sans doute liée au nombre moins important de mailles qui présentent des longueurs de linéaire élevées. Pour ces longueurs de linéaire, les moyennes sont donc plus soumises aux extrêmes.

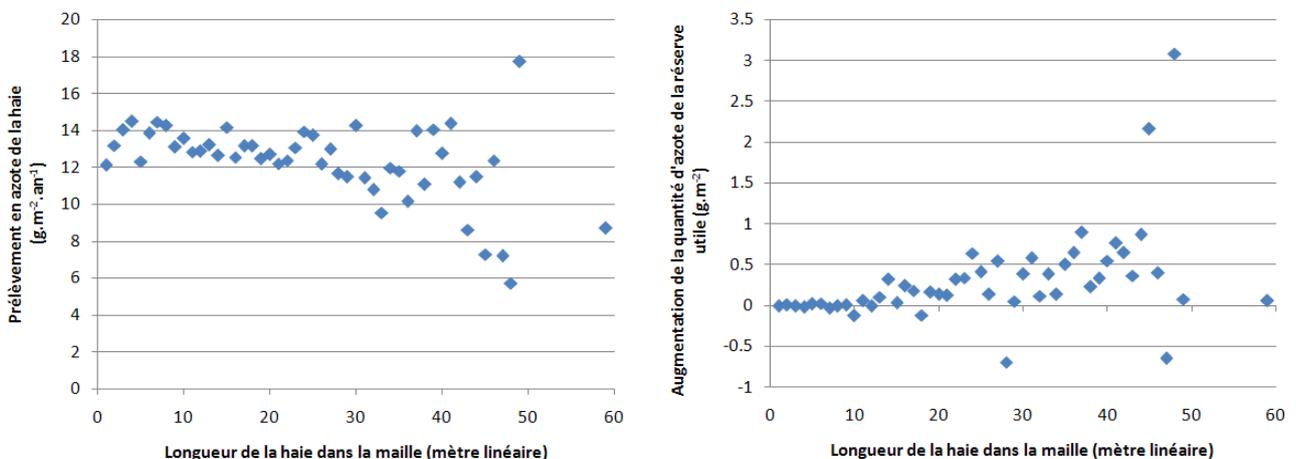


Figure 4.28 – Prélèvement en azote de la haie et augmentation de la quantité d'azote de la réserve utile entre une configuration avec et sans haie, en fonction de la longueur du linéaire de haie dans la maille.

### 4.3 Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant

La figure Figure 4.28 montre que le prélèvement en azote de la haie tend à rester stable avec l'augmentation du linéaire de haie dans la maille jusqu'à une longueur de 30 mètres linéaires. Cette stabilité est contraire à la tendance observée pour la transpiration (figure Figure 4.10) où l'on avait une diminution du prélèvement d'eau liée à un assèchement plus important du sol et à un abaissement plus important de la profondeur du toit de la nappe. Cela s'explique ici par une augmentation de la teneur en azote de la réserve utile avec l'augmentation du linéaire de haie. L'augmentation de la teneur en azote dans la réserve utile peut, elle, être la conséquence d'une diminution de la dénitrification (figure Figure 4.30) et d'une diminution du prélèvement par la culture (figure Figure 4.29). La plus forte diminution de la dénitrification quand le linéaire de haie augmente est la conséquence d'une diminution de la teneur en eau du sol (figure Figure 4.11). La diminution du prélèvement par la culture peut, quant à elle, être attribuée à une diminution de la masse sèche de la culture associée qui est la conséquence d'une dévaluation des facteurs de production (augmentation du facteur de stress en eau plus importante que la diminution du facteur de stress pour l'azote ; ainsi que dans une moindre mesure à la diminution du rayonnement solaire en partie intercepté par la haie).

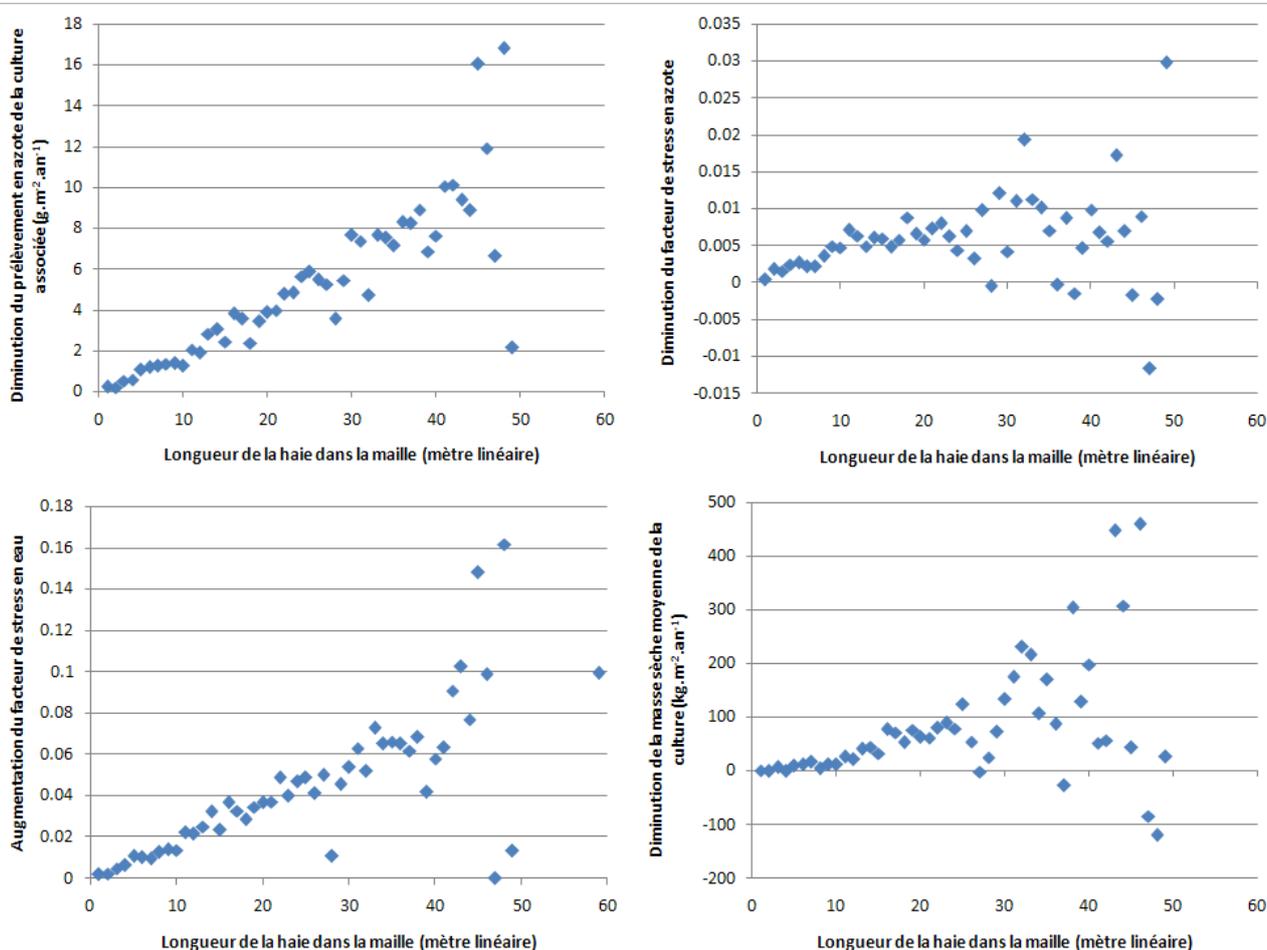


Figure 4.29 – Diminution moyenne du prélèvement en azote, du facteur de stress en azote et de la masse sèche de la culture associée entre une configuration avec et sans haie, et selon la longueur du linéaire de haie dans la maille.

En ce qui concerne le stock de carbone et d'azote dans le sol, la figure Figure 4.30 montre une augmentation de la teneur en C et en N de l'humus avec l'augmentation du linéaire de haie. Cela est la conséquence de la restitution de matières organiques par la haie lors de la chute des feuilles et d'une diminution de la minéralisation nette. La diminution de la minéralisation nette en présence de

haies est due à un apport en matière organique moins facilement décomposable (C/N plus élevé) ainsi qu'à une diminution de la teneur en eau du sol qui affecte le taux de décomposition. L'augmentation du ratio de haie dans la maille au détriment de celui de la culture favorise donc l'enrichissement en carbone et azote organique du sol.

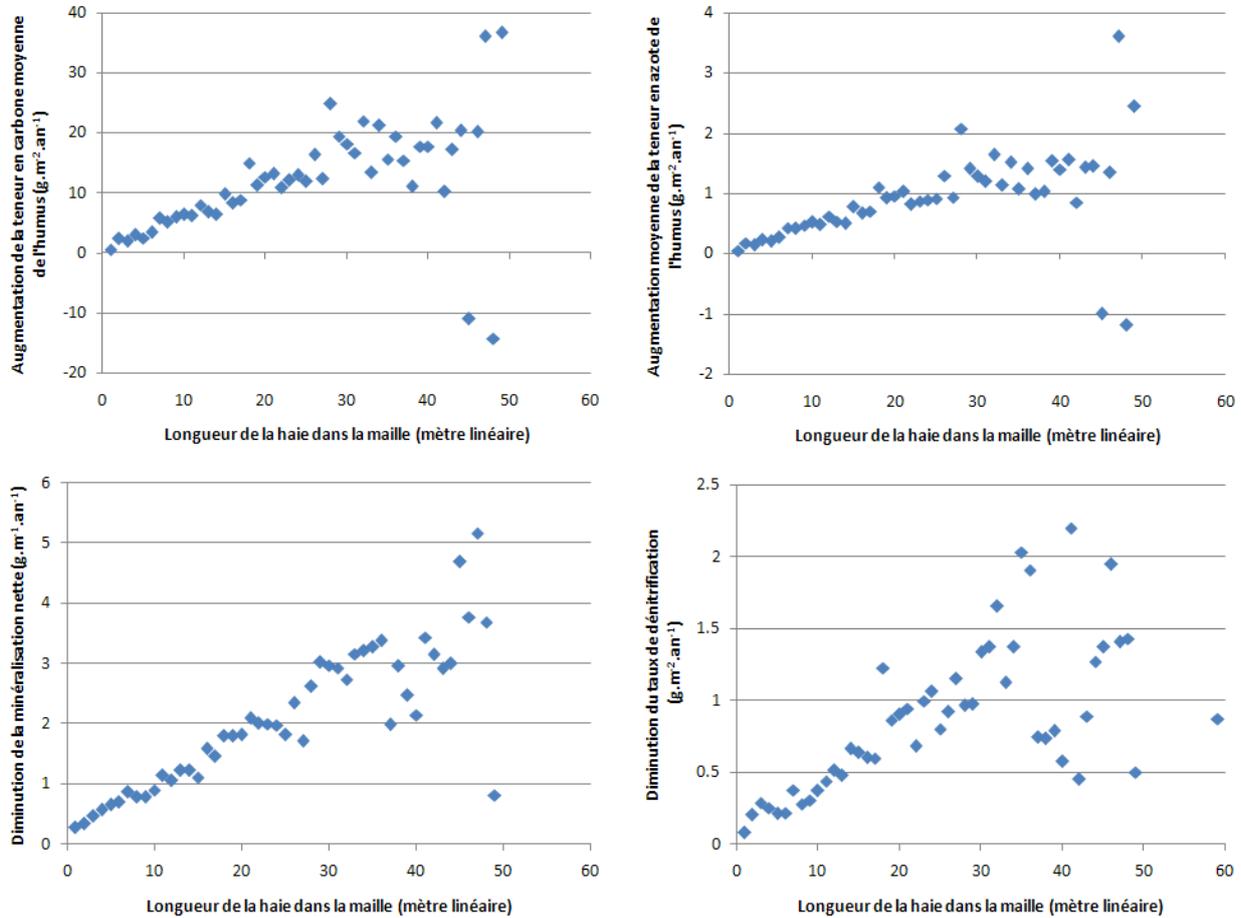


Figure 4.30 – Augmentations moyennes de la teneur en carbone et azote de l’humus et diminutions moyennes de la minéralisation nette et du taux de dénitrification entre une configuration avec et sans haie, selon la longueur du linéaire de haie dans la maille.

#### 4.3.2.3 Impact dans le bassin versant

Sur la période de simulation (1993-2010), la présence d’un réseau bocager sur le bassin versant entraîne une diminution du flux de N-NO<sub>3</sub> à l’exutoire de 3,6 % pour le réseau de 48 m.ha<sup>-1</sup> et de 9,2 % pour celui de 140 m.ha<sup>-1</sup> par rapport à la configuration sans haie. La présence du réseau bocager entraîne également une diminution de la dénitrification de 10,3 et 17 % respectivement pour les réseaux de 48 et 140 m.ha<sup>-1</sup> et une diminution de la minéralisation nette de 2,1 et 4,8 %. La diminution de la minéralisation nette entraîne ainsi, en présence de haies, une diminution des pertes en N de l’humus de 7,4 et 14,2 % par rapport à une configuration sans haie (tableau Tableau 4.12). On note, avec la présence du réseau bocager sur le bassin versant, une augmentation de la teneur en azote de la réserve utile ainsi qu’une augmentation de la teneur en azote de la maille. Cet effet sera discuté dans la partie 4.3.2.2.

### 4.3 Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant

	Sans haie	48 m.ha <sup>-1</sup>	140 m.ha <sup>-1</sup>
Flux à l'exutoire	5,78	5,57	5,25
Dénitrification	3,59	3,22	2,98
Minéralisation nette	14,77	14,46	14,06
Perte de l'humus	5,01	4,64	4,3
Prélèvement net de la haie	0,00	0,89	2,17
Prélèvement net des cultures	15,17	14,92	14,43
Azote de la réserve utile	3,38	3,56	3,9
Azote de la nappe	13,39	13,48	13,75

Tableau 4.12 - Valeurs annuelles moyennes de flux d'azote dans le bassin versant en g N.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> pour des simulations sans haie, avec les réseaux de haies de 1999 (48 m.ha<sup>-1</sup>) et de 1952 (140 m.ha<sup>-1</sup>).

Les différences de dénitrification en présence de haies à l'échelle du bassin versant se manifestent essentiellement entre mai et septembre (figure Figure 4.31 - A). Durant cette période, les différences relatives peuvent atteindre respectivement 20 à 30 % pour les réseaux de 48 et 140 m.ha<sup>-1</sup> (figure Figure 4.31 - B).

Les différences de flux d'azote à l'exutoire entre un bassin versant sans haie et avec les deux réseaux de 48 m.ha<sup>-1</sup> et 140 m.ha<sup>-1</sup> sont présentées figure Figure 4.32 pour trois années hydrologiques. Ces différences sont fortement corrélées à la différence de débit présentée en figure Figure 4.14. L'action de la haie sur la diminution des flux d'azote à l'exutoire est donc fortement liée à une diminution des débits.

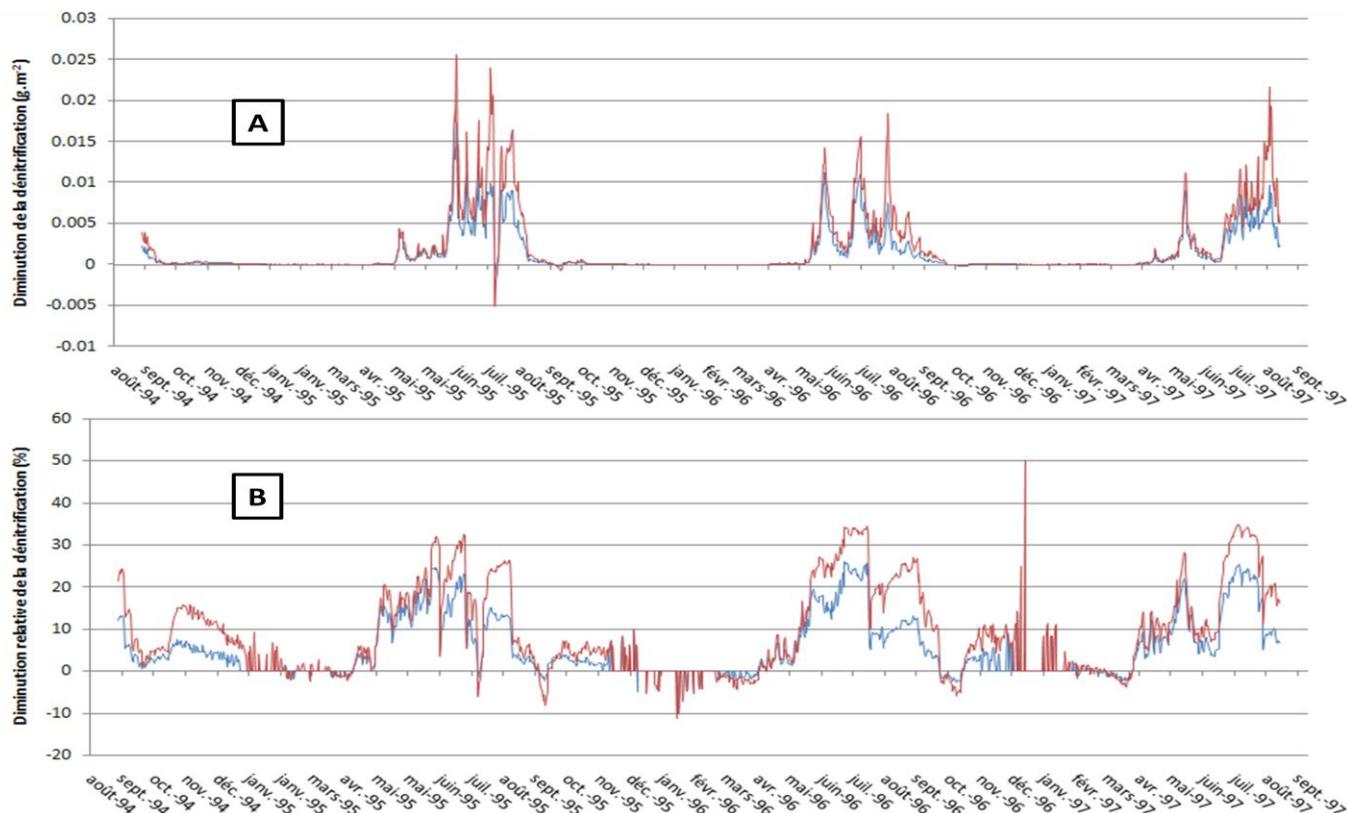


Figure 4.31 - Diminution de la dénitrification à l'échelle du bassin versant (A) et différence relative (B) entre une configuration sans haie et avec les réseaux de haies de 140 m.ha<sup>-1</sup> (rouge) et 48 m.ha<sup>-1</sup> (bleu). Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997.

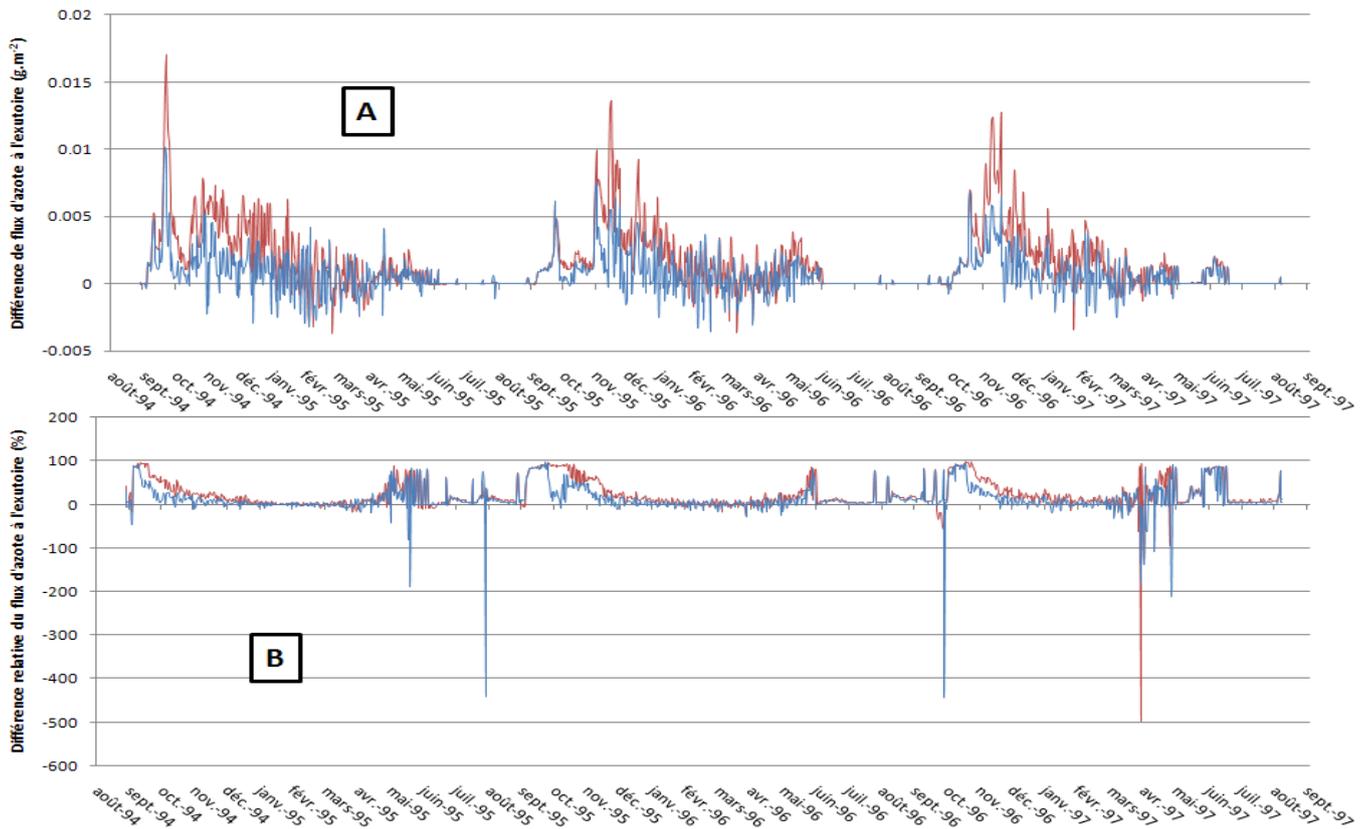


Figure 4.32 - Diminution du flux d'azote (A) et différence relative (B) à l'exutoire du bassin versant entre une configuration sans haie et avec les réseaux de haies de  $140 \text{ m.ha}^{-1}$  (rouge) et  $48 \text{ m.ha}^{-1}$  (bleu). Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997.

### 4.3.3 Influence de la position des haies sur le versant

Les mêmes réseaux fictifs utilisés pour quantifier l'effet sur les termes du bilan hydrique (chapitre 4.2.5) ont également été utilisés pour les termes du bilan d'azote.

#### 4.3.3.1 Impact sur les mailles double couvert

La figure Figure 4.33 montre la quantité d'azote prélevé par la haie en fonction de la Profondeur Moyenne du Toit de la Nappe (PMTN) assimilée à la position dans le versant. On observe une diminution des prélèvements avec l'augmentation de la PMTN. Cette diminution tend vers un palier pour une PMTN supérieure à 3 m. Les prélèvements par la haie plus importants aux faibles PMTN sont attribués au remontées capillaires en bas de versant. Les remontées capillaires diminuent avec l'augmentation de la PMTN et ne semblent donc plus participer au prélèvement de la haie après 3 m. La diminution du prélèvement en azote de la maille avec la présence de la haie tend à s'accroître quand la PMTN augmente. Pour des PMTN faibles, on observe au contraire une augmentation des prélèvements en azote de la maille en présence de haie.

### 4.3 Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant

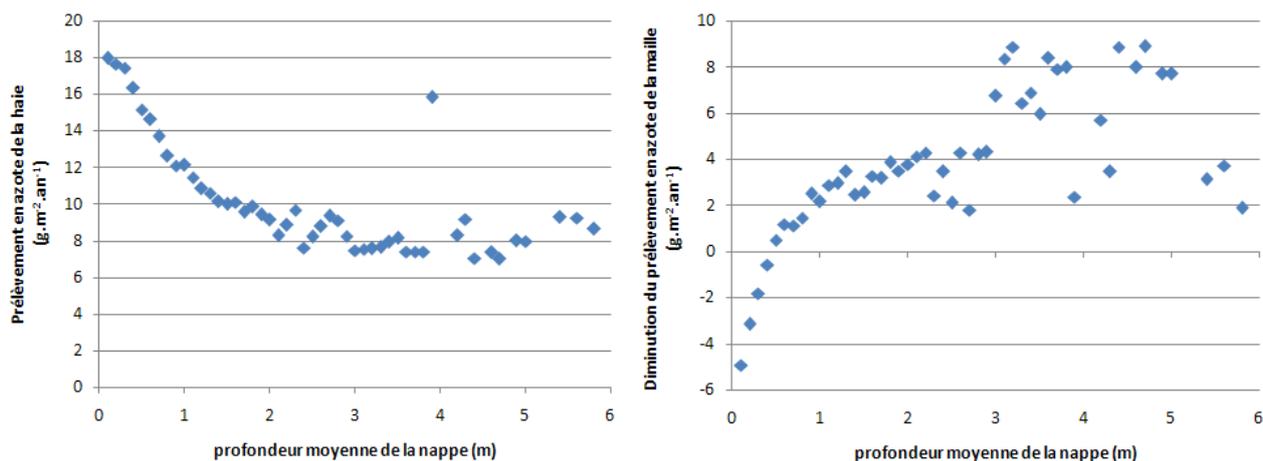


Figure 4.33 – Prélèvement en azote de la haie (gauche) et diminution moyenne du prélèvement en azote de la maille entre une configuration avec et sans haie (droite), en fonction de la PMTN.

On constate également une augmentation de la teneur en azote de la réserve utile avec l'augmentation de la PMTN (figure Figure 4.34). La compétition avec la haie entraîne une diminution de la masse sèche de la culture. Cette diminution limite les besoins en azote de la culture, et donc le facteur de stress, augmentant ainsi la teneur en azote de la réserve utile (figure Figure 4.34). Cette compétition avec la haie est d'autant plus forte que la PMTN est importante. Cela implique, dans des conditions où la disponibilité en azote est forte, que c'est la compétition pour l'eau qui pilote la croissance de la culture en présence de haie et entraîne la diminution du prélèvement en azote de la culture.

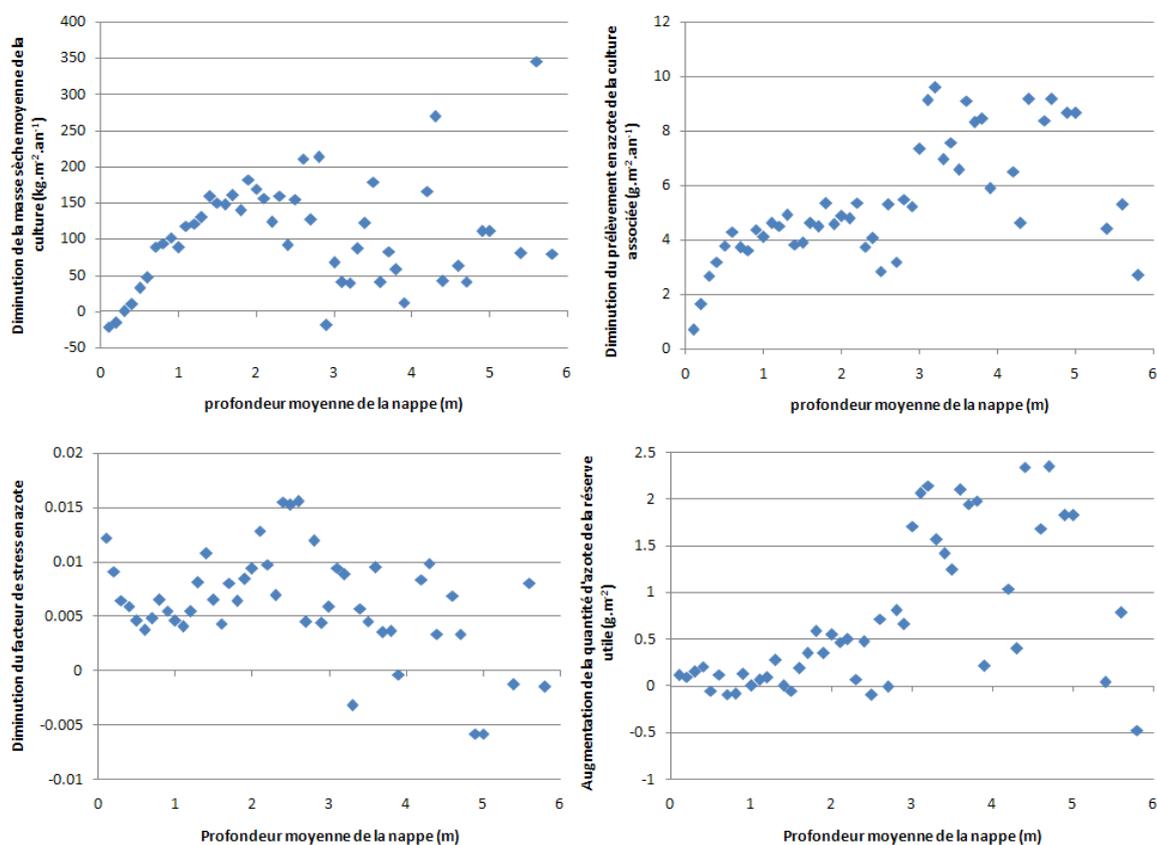


Figure 4.34 – Diminution moyenne du prélèvement en azote, du facteur de stress et de la masse sèche de la culture associée et augmentations moyennes de la teneur en azote de la réserve utile entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN dans la maille.

La figure Figure 4.35 montre d'ailleurs que cette diminution des prélèvements en azote de la culture en présence de haie tend à augmenter la teneur en azote de la nappe en haut de versant par une lixiviation des intrants non consommés. Cependant l'augmentation reste faible par rapport à la quantité d'intrants apportés. En effet, elle est en moyenne de  $22,7 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , soit 0,9 % de l'augmentation de la teneur en azote de la nappe simulée (pour les valeurs les plus fortes). Au contraire en bas de versant l'intensité de la compétition avec la culture étant plus faible, on observe une diminution de la teneur en azote de la nappe. Cette diminution est également associée à un prélèvement direct dans la nappe par les racines de la haie.

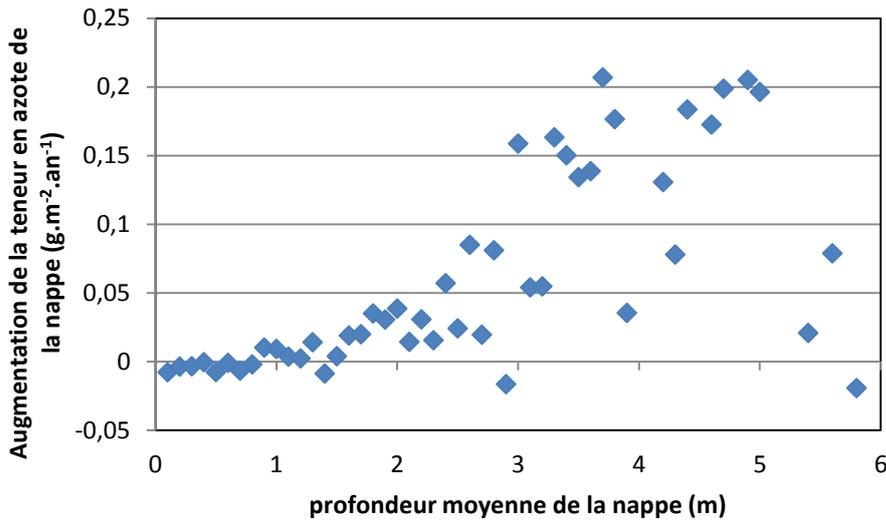


Figure 4.35 – Augmentation de la teneur en azote de la nappe en présence de haie, selon la PMTN.

Afin d'estimer la part d'intrants non exportée ou immobilisée dans la maille, les pertes relatives (chapitre 4.3.2.1) ont été calculées pour les différentes PMTN. La figure Figure 4.36 présente ces pertes relatives et les différences entre les mailles double couvert et les mêmes mailles sans haie en fonction de la PMTN. On observe ainsi que les pertes relatives diminuent en présence de haie pour les faibles PMTN. Cela implique pour ces mailles que la part d'intrants qui se retrouve dans le sol et/ou dans la nappe est réduite en présence de haie. Au contraire pour les PMTN plus élevées on a des valeurs positives des pertes relatives, ce qui implique donc une part plus forte des intrants non exportée ou immobilisée qui peut augmenter la lixiviation du nitrate vers la nappe. Ce schéma décrit de manière générale ce qui se passe sur le bassin versant. C'est-à-dire qu'il y a une lixiviation des nitrates en haut de versant qui enrichit la nappe, puis qui transite dans la nappe le long du bassin versant par l'intermédiaire des écoulements profonds, et enfin une part de cet azote peut ensuite être consommé par les plantes et par dénitrification hétérotrophe lorsque la nappe atteint le bas de versant, là où elle est plus proche de la surface du sol. Dans le modèle la présence de la haie modifie ces flux en augmentant la lixiviation en haut de versant (due à l'augmentation de la compétition pour l'eau), ainsi qu'en augmentant les prélèvements en bas de versant. L'augmentation des prélèvements en bas de versant peut être la conséquence de la présence de la haie, ainsi que d'une augmentation de la teneur en azote de la nappe due à l'augmentation de la lixiviation en haut de versant.

### 4.3 Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant

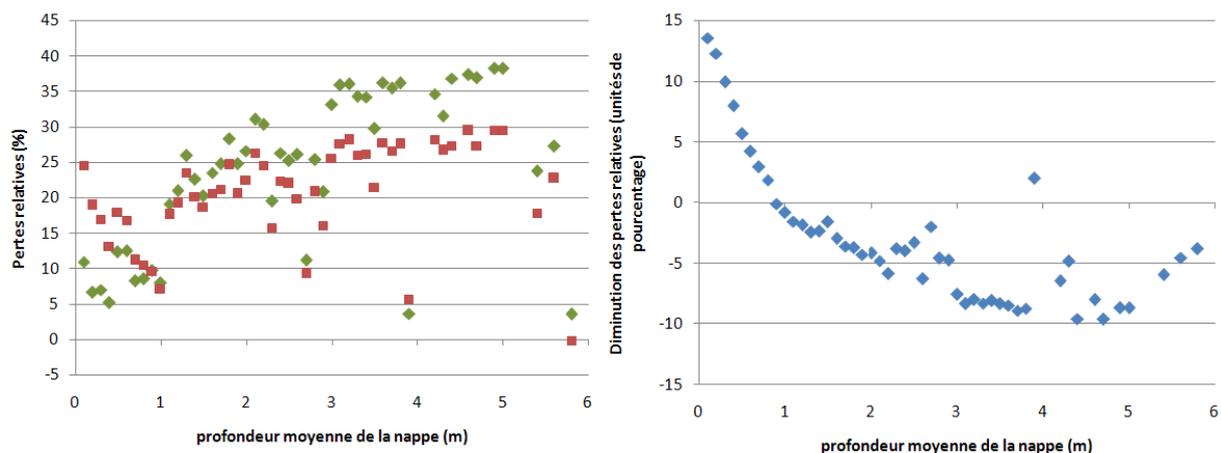


Figure 4.36 - Pertes relatives moyennes pour les mailles double couvert (losanges graphique de gauche) et les mêmes mailles sans haie (carrés), et diminutions des pertes relatives en présence de haie (losange graphique de droite), selon la PMTN.

On notera cependant que la majorité des mailles considérées ont une PMTN qui se situe à moins de 3 m. La plus grande différence de pertes relatives observée pour des PMTN supérieures à trois mètres n'intègre donc pas une grande diversité de culture.

En bas de versant, les prélèvements en azote des haies étant plus importants, la restitution qui est une part fixe de ces prélèvements est également plus importante. On observe donc en bas de versant une plus forte augmentation de la teneur en carbone et azote organique du sol en présence de haie, qui diminue avec l'augmentation de la PMTN (figure Figure 4.37). La diminution de la minéralisation nette varie rapidement entre une PMTN de 0 et 1 m avant d'atteindre un palier. Cette diminution est donc plus faible en bas de versant qu'en haut de versant malgré un apport de résidu plus important en bas de versant. Cependant cet apport important ainsi que la diminution plus faible de la teneur en eau du sol (figure Figure 4.18) en bas de versant augmentent la vitesse de minéralisation brute.

Enfin la diminution du taux de dénitrification baisse légèrement avec l'augmentation de la PMTN (figure Figure 4.37). On note que les points sont assez dispersés, même pour les faibles PMTN. Le taux de dénitrification est notamment fonction de la teneur en eau et en azote du sol. La teneur en eau du sol diminuant et la teneur en azote augmentant, ces deux facteurs se compensent provoquant une faible variation avec l'augmentation de la PMTN.

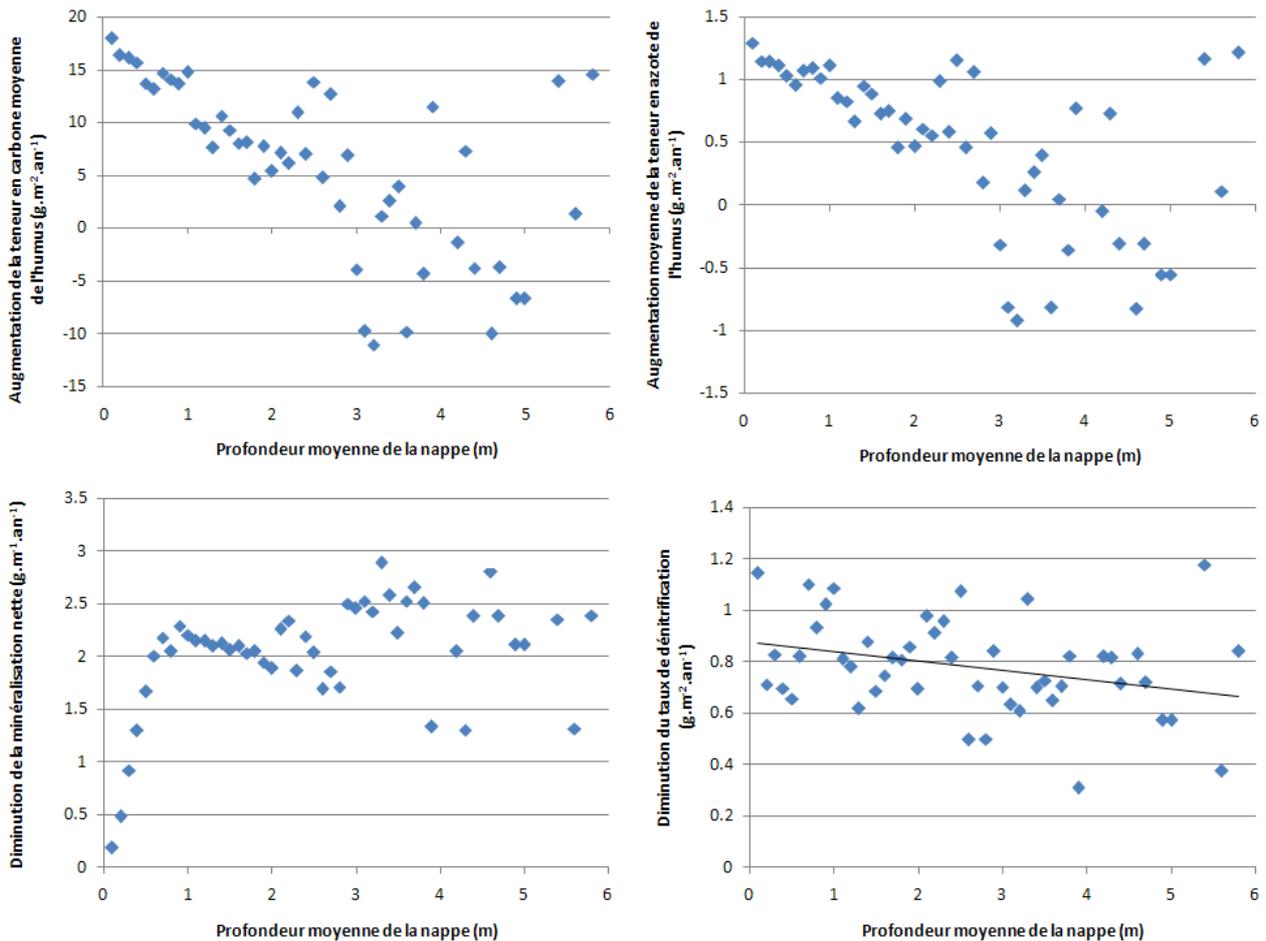


Figure 4.37 – Augmentation moyenne de la teneur en carbone et azote de l’humus et diminution moyenne de la minéralisation nette et du taux de dénitrification entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN.

#### 4.3.3.2 Effet du type de culture associé à la haie

La figure Figure 4.38 présente le prélèvement en azote moyen de la haie et la diminution relative moyenne du prélèvement de la culture entre les mailles double couvert et les mêmes mailles sans haies, selon la PMTN. Comme observé précédemment le prélèvement de la haie diminue avec l’augmentation de la PMTN pour atteindre un palier. On observe que ce palier atteint un niveau différent selon le type de culture associé à la haie. En effet, pour une association haie-prairie, ce palier se situe à  $5.5 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , pour une association haie-blé il est à  $7 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ , et pour l’association haie-mais il est à  $12 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . Pour les PMTN élevées, les sources d’azote pour la haie proviennent des apports d’engrais (tableau Tableau 4.13), des dépôts atmosphériques et de la minéralisation. Les différences en termes de sources d’azote se font donc essentiellement par les amendements. Les dates et quantités d’engrais apporté à la maille sont très différentes selon le type de culture considéré. En effet la quantité d’azote apportée par les engrais est la plus forte pour le maïs et la plus faible pour la prairie. De plus pour la prairie et le blé, les apports se font assez tôt dans l’année par rapport au maïs. Les paramètres choisis pour la haie étant ceux du chêne, le débourrement des arbres se situe entre mi-avril et début mai. La prairie et le blé sont donc déjà bien développés au moment où la haie entre dans sa période active. De plus une partie des engrais a déjà été apportée pour ces cultures et a été assimilée par ces dernières. L’apport d’azote utilisable pour la haie sur les maille avec une association prairie et blé est donc très limité pour des PMTN élevées. Au contraire le

maïs est semé au même moment que le début d'activité de la haie. Le maïs exerce donc au début de sa période de croissance une faible compétition avec la haie et les apports d'azote qui suivent peuvent donc être plus facilement utilisés par la haie. Ces observations expliquent la capacité de la haie à prélever plus d'azote lorsqu'elle est associée au maïs, dans le cas d'une PMTN élevée.

L'intensité de la compétition de la haie sur les cultures associées s'exprime sur la diminution relative du prélèvement en azote des cultures. On constate que cette diminution relative s'accroît avec la PMTN. Cette diminution atteint un palier globalement aux mêmes PMTN que pour les paliers des prélèvements de la haie discutés précédemment. Pour une association avec le blé ce palier se situe à 10 % indiquant un faible impact de compétition entre les deux cultures. Il passe à 20 % pour la prairie et à 40 % pour le maïs montrant une forte compétition (figure Figure 4.38). Cette compétition est indirecte pour l'azote, car le facteur de stress azoté de la culture a plutôt tendance à diminuer (figure Figure 4.39). En effet cette compétition s'exprime principalement par une augmentation du facteur de stress en eau qui se répercute sur la croissance de la culture et donc sur sa masse sèche finale. On observe effectivement une diminution de la masse sèche qui s'accroît avec l'augmentation de la PMTN. La croissance de la culture étant ralentie, ses besoins en azote sont donc réduits. Pour la prairie la diminution de la masse sèche a plutôt tendance à être inférieure aux deux autres cultures. Cette diminution est le résultat du calcul de la croissance de la prairie dans TNT2. En effet dans le modèle cette croissance n'est pas fonction du rayonnement solaire, mais est calculée par un potentiel de croissance empirique dépendant de la date qui est affecté uniquement par les stress en eau et en azote. Ce mode de calcul pour la croissance de la prairie peut donc expliquer une diminution de la masse sèche plus faible malgré une augmentation du facteur de stress en eau plus importante.

Le bilan des prélèvements de la haie et de la culture associée se traduit par une diminution du prélèvement en azote de la maille pour les PMTN élevées (figure Figure 4.38). Cette diminution atteint 20, 17 et 25 % respectivement pour la prairie, le blé et le maïs. La différence entre les trois associations se situe également aux faibles PMTN avec une augmentation des prélèvements totaux de la maille pour le blé et le maïs (valeurs négatives). Cette augmentation atteint 150 % pour une association avec le blé et 60 % pour une association avec le maïs. Cette augmentation n'est par contre pas observée pour la prairie.

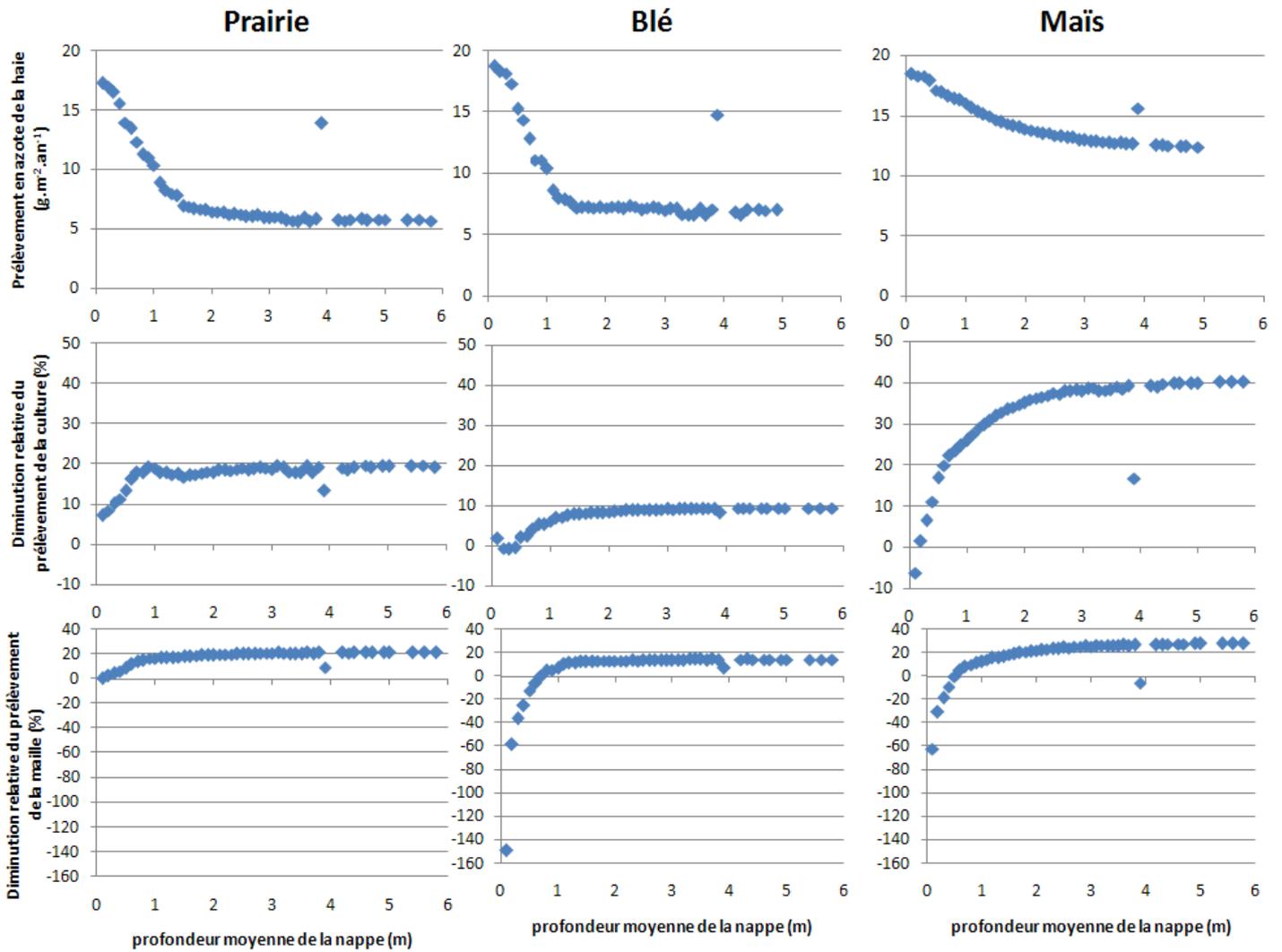


Figure 4.38- Prélèvements en azote moyens de la haie et diminutions relatives moyennes du prélèvement de la culture et de la maille entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN, pour les associations de la haie avec la prairie, le blé, et le maïs.

	Date de semis	Type d'apport	Date d'apport	Apport (g N.m <sup>-2</sup> )
Prairie	Au début de la simulation	Minérale	01/03	2.13
		Minérale	15/04	4.27
Blé	05/11	Minérale	15/02	6.39
		Minérale	15/04	6.39
Maïs	25/04	Lisier	26/04	15.07
		Minérale	27/04	7.67

Tableau 4.13 –Date de semis, ainsi que le type, la date et la quantité d'azote apportée pour la prairie, le blé et le maïs.

On note, en effet que pour les faibles PMTN (jusqu'à 0.4 m pour le blé et 0.1 m pour le maïs), que le blé et le maïs prélèvent plus d'azote en présence de haie (valeurs négatives). En effet à ces PMTN la compétition pour l'eau et l'azote est réduite à cause de leur forte disponibilité. De plus le facteur de stress en azote et d'anoxie diminuent en présence de la haie, ce qui permet un développement de la culture plus important (figure Figure 4.39).

### 4.3 Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant

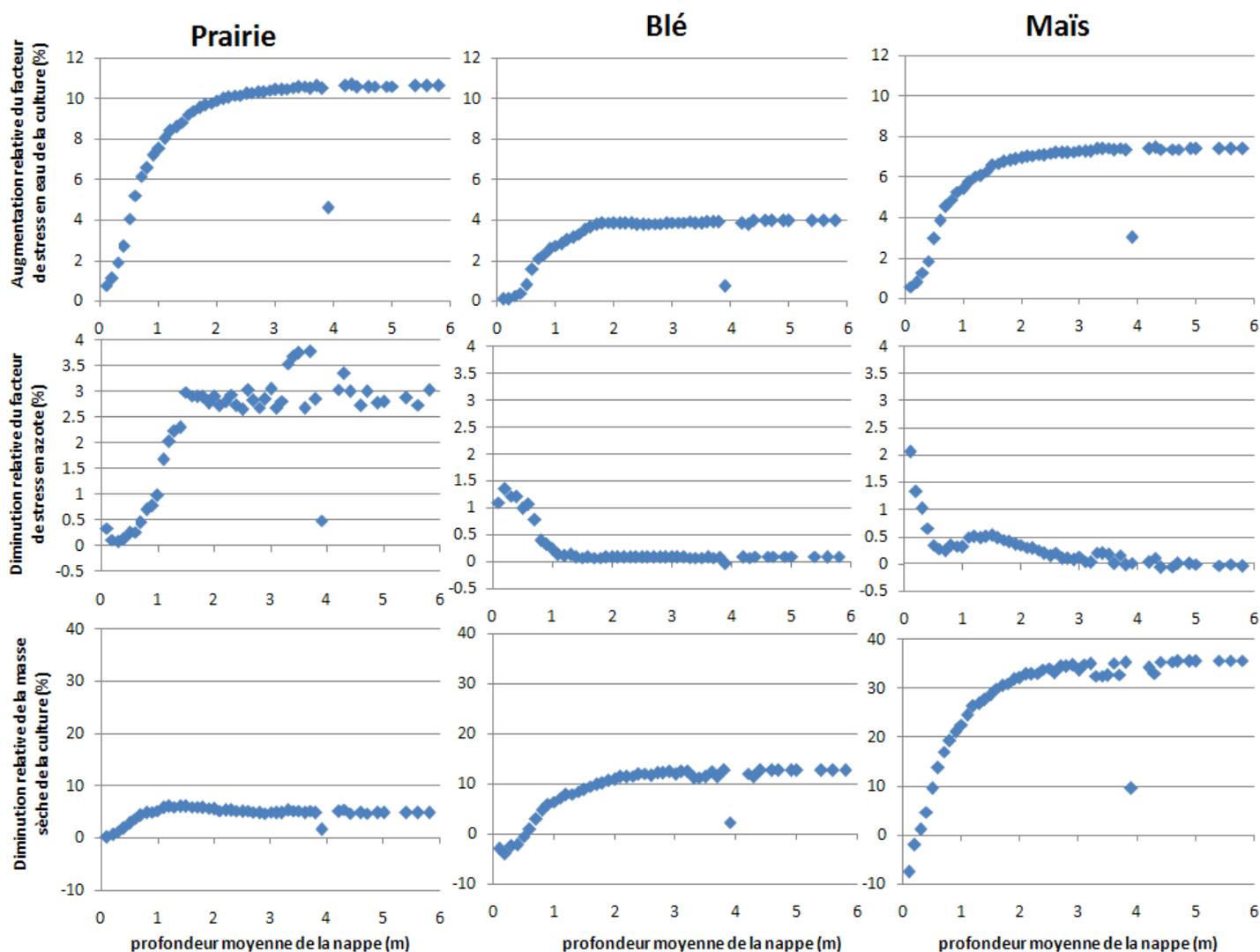


Figure 4.39 – Augmentations relatives moyennes du facteur de stress en eau et diminutions relatives moyennes du facteur de stress en azote et de la masse sèche de la culture entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN, pour une association avec une prairie, du blé ou du maïs.

La figure Figure 4.40 montre une diminution relative de la minéralisation nette qui est équivalente pour les trois types d'association haie-culture. L'augmentation relative de la teneur en azote de l'humus est par contre très différente. Pour la prairie, la teneur en azote de l'humus tend à augmenter en bas de versant et à diminuer en haut de versant. Cette différence le long du versant peut s'expliquer par le fait que la prairie est déjà génératrice d'une augmentation de la teneur en azote de l'humus à cause des importantes restitutions (environ 30% de l'azote prélevé) lors du pâturage. En présence de la haie, la diminution de la masse sèche de la prairie en haut de versant réduit donc ces apports qui ne sont pas compensés par ceux de la haie. Pour les deux autres cultures, les restitutions étant plus faibles, l'association avec la haie tend à augmenter la teneur en azote de l'humus malgré la diminution de leur masse sèche.

La figure Figure 4.40 montre que la diminution relative de la dénitrification est la plus prononcée pour l'association avec le blé, et la plus faible pour l'association avec la prairie. Cela s'explique pour le blé par une teneur en eau (figure Figure 4.22) et en azote (figure Figure 4.41) moyenne annuelle du sol plus faible, malgré une augmentation moyenne de la teneur en azote de la nappe. Pour le maïs la diminution est intermédiaire car, même si la teneur en azote du sol est plus faible, la teneur en eau

au printemps est, elle, relativement plus importante due à une levée des cultures fin avril. Enfin la diminution de la dénitrification est la plus faible pour la prairie car la diminution de la teneur en eau du sol est équivalente au cas du maïs, mais la teneur en azote du sol est au contraire plus importante.

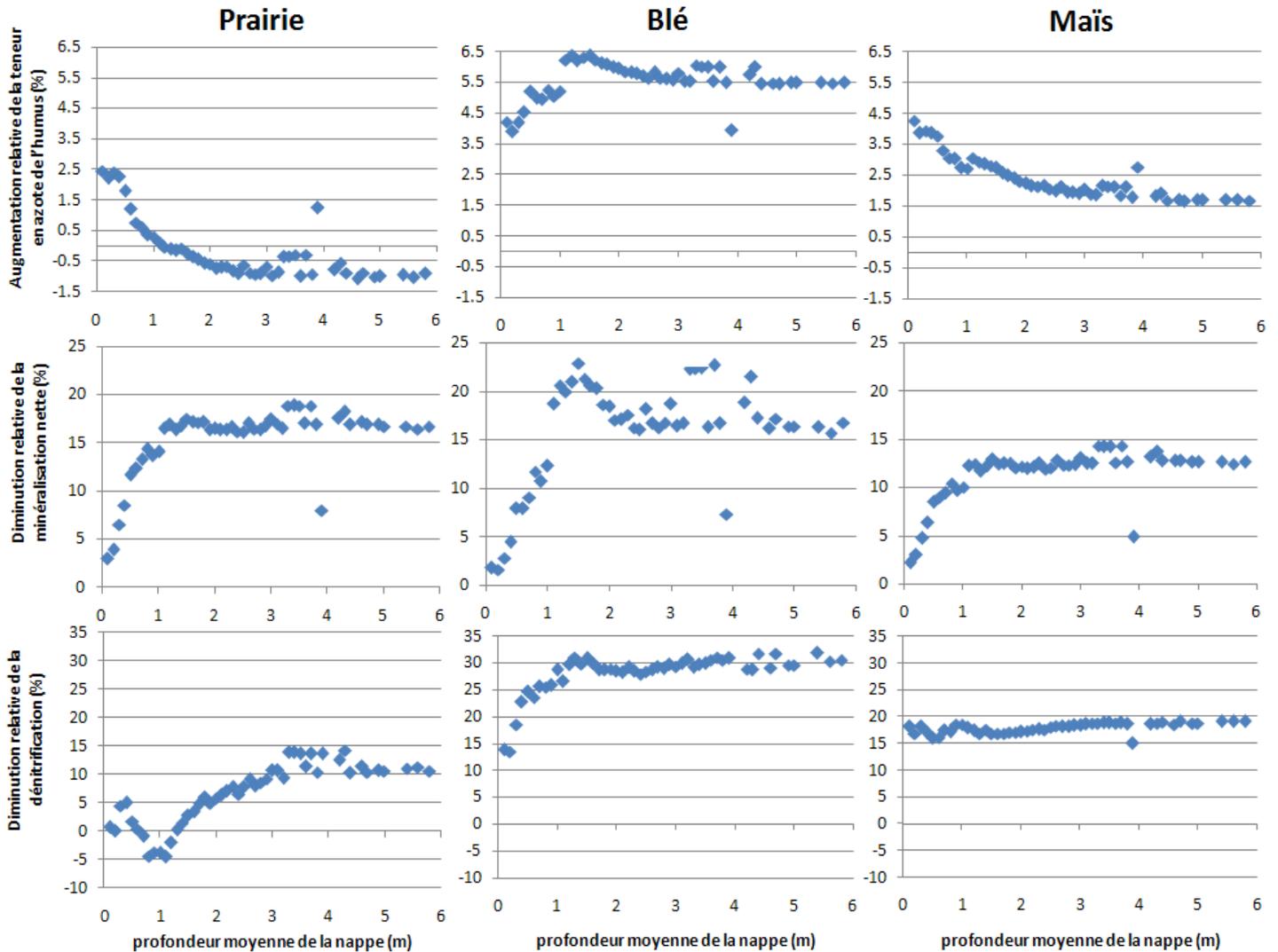


Figure 4.40 – Augmentations relatives moyennes de la teneur en azote de l’humus et diminutions relatives moyennes de la minéralisation nette et de la dénitrification entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN, pour une association avec une prairie, du blé ou du maïs.

Cette forte augmentation de la teneur en azote du sol pour une association haie-prairie s’explique par une diminution du rapport C/N de l’herbe qui enrichit le sol lors des restitutions.

La figure Figure 4.41 montre que la teneur en azote de la nappe tend donc à augmenter pour l’association haie-prairie, même en bas de versant malgré une diminution des pertes relatives (figure Figure 4.42). Cela peut s’expliquer par le fait que l’augmentation de la lixiviation en haut de versant n’est pas compensée par l’augmentation des prélèvements en bas de versant. Au contraire pour l’association haie-maïs les prélèvements en bas de versant compensent suffisamment la lixiviation du haut de versant entraînant ainsi une diminution de la teneur en azote de la nappe pour les mailles de bas de versant. Enfin, la plus faible compétition entre la haie et le blé génère de faibles différences de pertes relatives en haut de versant et un prélèvement plus important en bas de versant, ce qui

### 4.3 Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant

entraîne une diminution de l'azote de la nappe en haut et en bas de versant. Les fortes pertes relatives pour le blé en bas de versant s'expliquent par un facteur de stress en eau plus important.

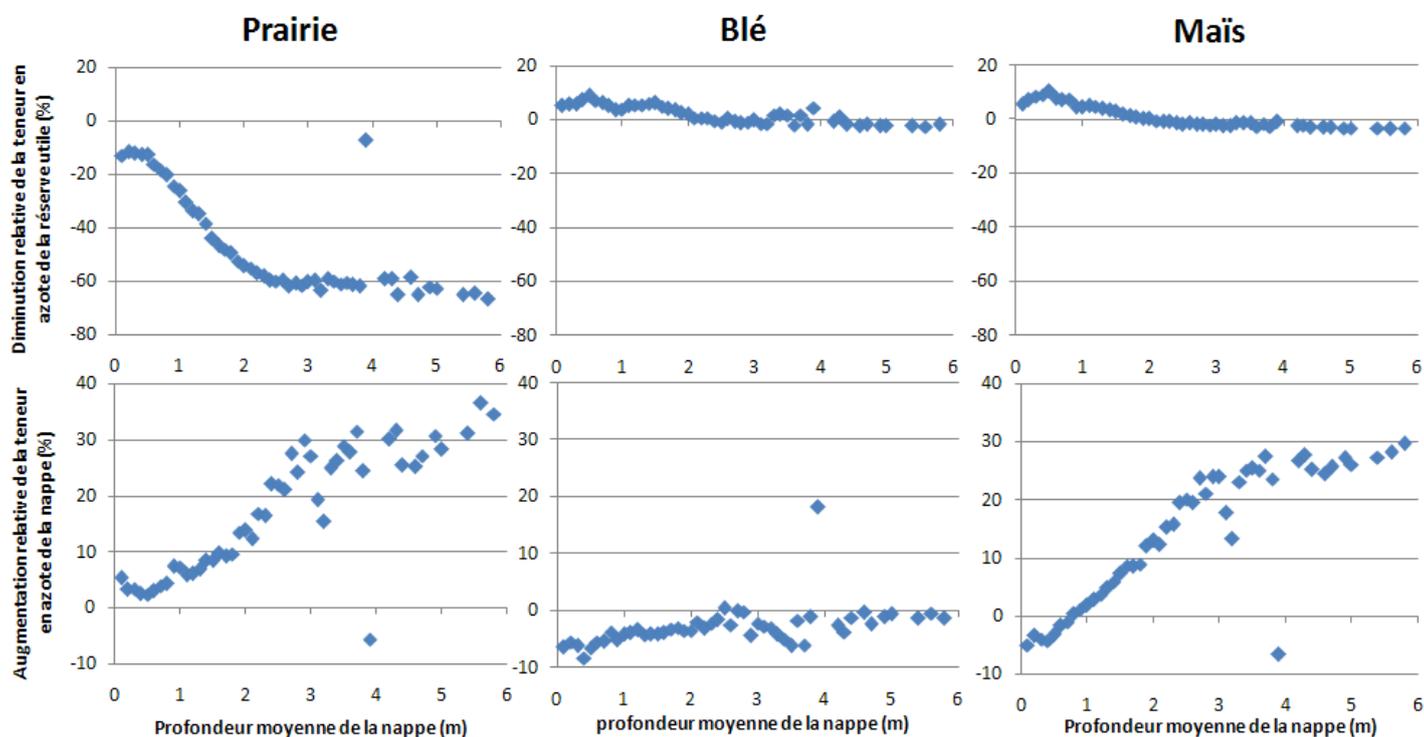


Figure 4.41 – Diminutions relatives moyennes de la teneur en azote de la réserve utile et augmentations relatives moyennes de la teneur en azote de la nappe, selon la PMTN et pour les différents types d'association haie-culture.

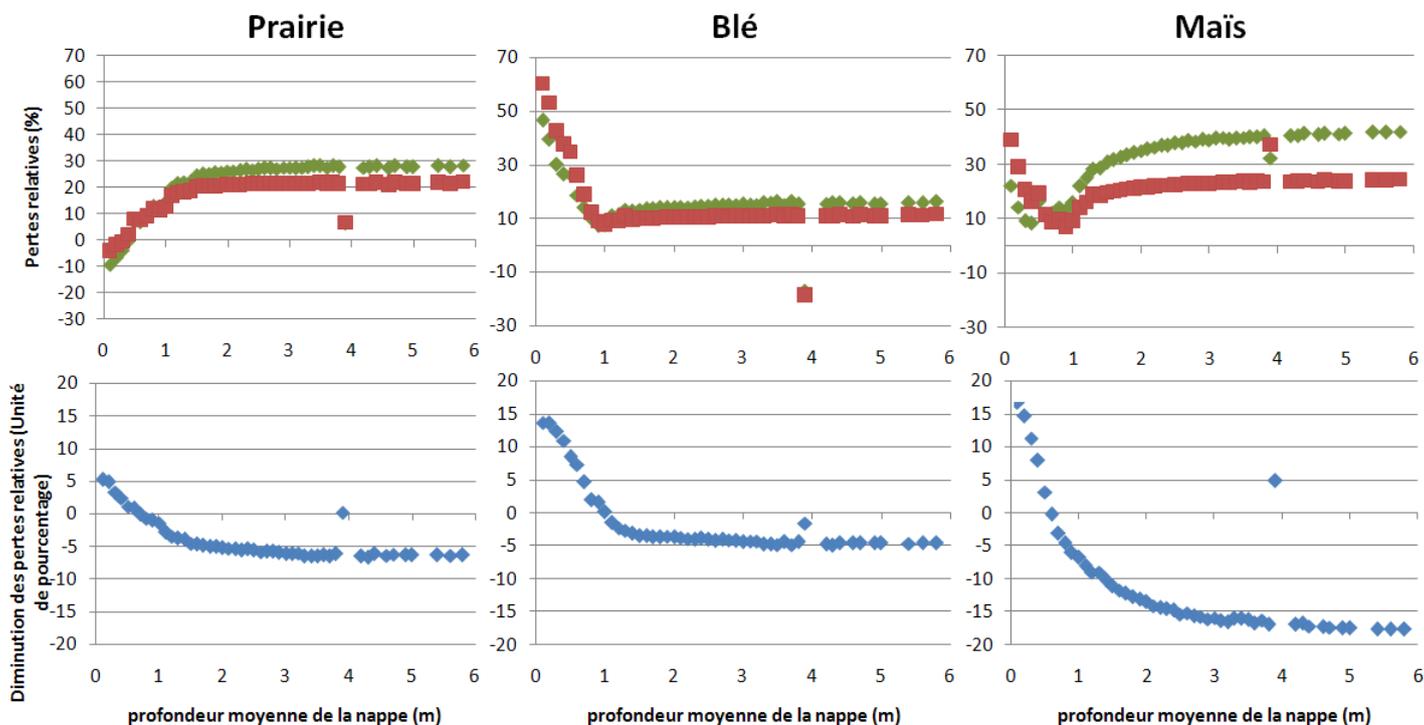


Figure 4.42 – Pertes relatives moyennes pour les mailles double couvert (losanges graphiques du haut) et les mêmes mailles sans haies (carrés), et diminutions des pertes relatives moyennes en présence de haie (losanges graphiques du bas), selon la PMTN et pour les différents types d'association haie-culture.

On notera pour la prairie que les pertes relatives sont négatives, pour les faibles PMTN. Cela implique que la quantité d'azote exportée ou immobilisée est plus importante que les intrants. Cette quantité d'azote supplémentaire provient de la minéralisation de l'humus ou des prélèvements dans la nappe.

#### 4.3.4 Influence de la taille d'entretien.

Les mêmes scénarios d'entretien des haies précédemment utilisés pour les termes du bilan hydrique (chapitre 4.2.6) sont repris ici.

A l'échelle des mailles double couvert on note une diminution du prélèvement en azote de la haie allant de 9.5 à 17 % en fonction du type de scénario modélisé. Au contraire on observe une augmentation du prélèvement des cultures allant de 2 à 3,4 %. Les prélèvements de la maille (haie plus culture) tendent au final vers des variations inférieures à 1 %. On note tout de même une plus forte augmentation des prélèvements pour le scénario de la canopée réduite de moitié, et une diminution des prélèvements pour le scénario de l'arbre totalement élagué.

Sur les mailles double couvert la dénitrification augmente de 2.6 à 7 %, les pertes en azote de l'humus augmentent de 4.9 à 11 % et la minéralisation nette augmente de 1.17 à 2.5 %. Les scénarios qui ont le plus d'influence sur ces variables sont dans l'ordre décroissant : l'élagage complet, la diminution de la canopée et la diminution du LAI, comme pour le bilan en eau.

Au final, les pertes relatives augmentent pour les scénarios où le LAI est réduit et où l'arbre est totalement élagué, par rapport à l'arbre non taillé. Au contraire elles diminuent pour le scénario où la largeur de la canopée de la haie est réduite de moitié. Cette diminution est la conséquence d'un prélèvement en azote plus important de la maille et d'une diminution plus faible de la dénitrification.

	Non taillée	LAI / 2	Canopée / 2	Totalement élaguée
Prélèvement de la haie	13.14	11.89	11.75	10.91
Prélèvement de la culture	24.41	24.91	25.14	25.25
Prélèvement de la maille	26.04	26.06	26.23	26.01
Dénitrification	3.02	3.1	3.21	3.23
Perte en azote de l'humus	3.06	3.21	3.34	3.4
Minéralisation nette	15.45	15.63	15.84	15.84
Pertes relatives (%)	14	15.4	13.4	14.2

Tableau 4.14 – valeur moyenne en  $g N.m^{-2}.an^{-1}$  de différents termes du bilan d'azote sur les mailles double couvert en fonction du type d'entretien appliqué à la haie.

Dans le modèle la taille a en outre, une influence en termes de rayonnement solaire intercepté. La différence dans le modèle entre le scénario de réduction de la largeur de la canopée et celui de la réduction du LAI se situe au niveau des zones qui sont influencées par l'interception du rayonnement solaire. Dans le premier cas elle se fait surtout sur le ratio de maille mixte, tandis que pour le second l'influence est répartie sur les ratios mixte et de haie seule (figure Figure 4.43). Cette différence en termes d'interception du rayonnement solaire peut expliquer les variations simulées en termes de prélèvements d'eau et d'azote de la culture associée.

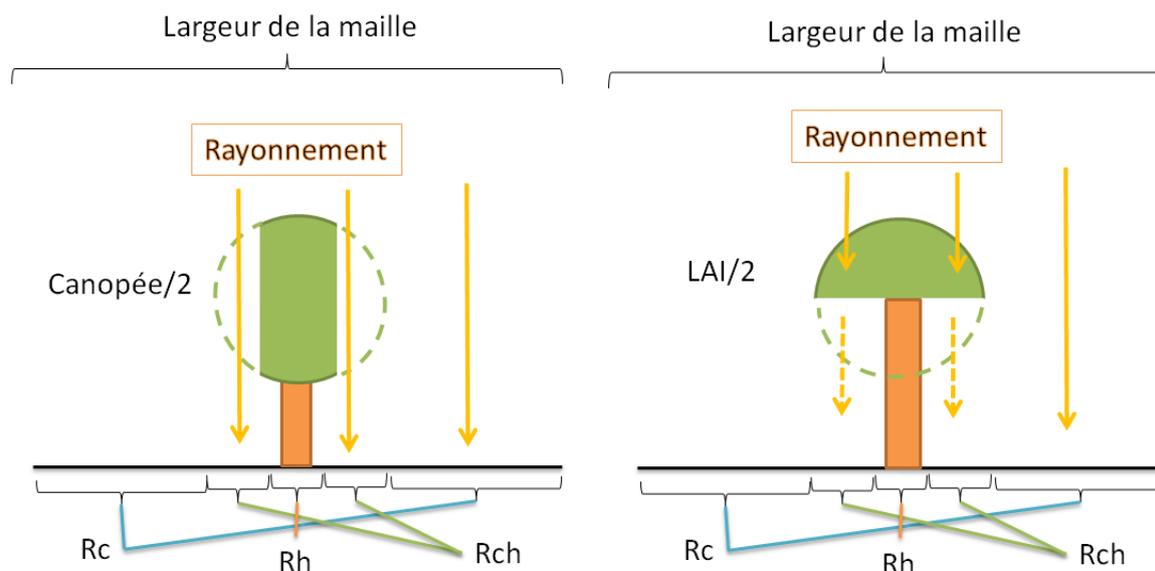


Figure 4.43 – Schéma de l'influence du type de scénario de taille d'entretien (Canopée/2 ou LAI/2) sur l'interception du rayonnement dans le modèle. Rh correspond au ratio de surface où la haie est seule, Rc au ratio de surface où la culture est seule et Rch au ratio de la zone mixte.

A l'échelle du bassin versant quel que soit le scénario de taille, on observe une augmentation des flux d'azote à l'exutoire par rapport à la simulation avec haies non taillées. Cette augmentation est cependant très faible et varie de 0.4 à 0.7 % en fonction des scénarios de taille (tableau Tableau 4.15). La dénitrification, est plus fortement influencée à l'échelle du bassin avec une augmentation allant de 1.2 à 3 % en fonction du scénario de taille. Les pertes en azote de l'humus augmentent, elles, de 0.9 à 1.9 %. Enfin l'augmentation de la minéralisation nette ne dépasse pas les 0.5 %.

	Non taillée	LAI / 2	Canopée / 2	Totalement taillée
Flux à l'exutoire	5.59	5.61	5.62	5.63
Dénitrification	3.24	3.28	3.32	3.34
Perte en azote de l'humus	4.67	4.71	4.75	4.76
Minéralisation nette	14.48	14.52	14.55	14.56

Tableau 4.15 - Valeurs annuelles moyennes en  $\text{g N.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  de flux d'azote en fonction du scénario d'élague à l'échelle du bassin versant.

#### 4.3.5 Discussion de l'influence modélisée de la haie sur le bilan d'azote

##### 4.3.5.1 Impact de l'association haie-culture sur les mailles double couvert

La présence de la haie sur la maille diminue le développement de la culture à cause d'une augmentation du stress hydrique. La croissance de la culture étant limitée, ses prélèvements en azote sont donc également diminués et notamment non compensés par le prélèvement des arbres en haut de versant. La présence de haie sur la maille tend donc à augmenter les pertes des intrants par lixiviation en haut de versant là où la compétition pour l'eau avec la culture est la plus importante, et ce malgré une diminution des apports de la maille due à la surface occupée par la haie. Cette augmentation de la lixiviation en haut de versant est donc fonction de l'intensité de la compétition pour l'eau entre la haie et la culture et du chevauchement temporel des périodes d'activités de ces deux couverts. Cependant nous avons également vu précédemment que ces

interactions de compétition sont certainement surestimées dans la configuration actuelle du modèle. Les observations en agroforesterie, auxquelles on peut comparer ces résultats, montrent de fait une augmentation des rendements, donc de l'utilisation des ressources (van Noordwijk et al., 1996). De même l'observation de certains systèmes agroforestiers a montré une diminution de la lixiviation de l'azote (Allen et al., 2004; Buresh and Tian, 1997; Lehmann et al., 1998a; Seyfried and Rao, 1991). Les pertes d'azote par lixiviation sont donc également sûrement surestimées. En bas de versant la compétition entre la haie et la culture étant plus faible, on observe au contraire une augmentation des prélèvements relativement à la quantité d'intrants apportée. Les prélèvements supplémentaires se font dans la nappe.

Cependant la diminution de la teneur en eau au voisinage de la haie en bas de versant entraîne une diminution de la dénitrification. En effet la dénitrification bactérienne nécessite des conditions d'anoxie et est favorisée par la saturation des horizons superficiels du sol. L'assèchement plus important du sol sur les mailles double couvert comparé à un autre couvert est donc défavorable à la dénitrification. A l'inverse, la dénitrification bactérienne peut être favorisée dans la zone racinaire plus développée et plus profonde des arbres, également plus riche en carbone organique (Grimaldi et al., 2012). Cependant ces mécanismes n'ont pas été implémentés dans le modèle, ce qui sous estime sans doute les valeurs de dénitrification. D'un autre côté, le fait de ne pas avoir pris en compte l'interception de la pluie par la canopée de la haie réduit la diminution de la teneur en eau de la réserve utile ce qui tend à surestimer le processus de dénitrification. De plus, l'azote dans le modèle étant uniquement représenté sous forme de nitrate, la minéralisation des résidus de la haie se fait sous forme de nitrate. Il a cependant été montré que l'azote libéré lors de la décomposition de la matière organique sous la haie se faisait plutôt sous forme d'ammonium (Ryszkowski et Kedziora, 2007). La non prise en compte de l'ammonium dans le modèle surestime également la dénitrification.

#### 4.3.5.2 Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant

A l'échelle du bassin versant, la présence des haies diminue les pertes relatives d'azote dans le bassin versant, c'est-à-dire la proportion des intrants qui échappent à la consommation biologique. Cela signifie que l'augmentation de la lixiviation observée en haut de versant est favorablement compensée par l'augmentation des prélèvements dans la nappe en bas de versant (figure Figure 4.44) et ce malgré une diminution de la dénitrification.

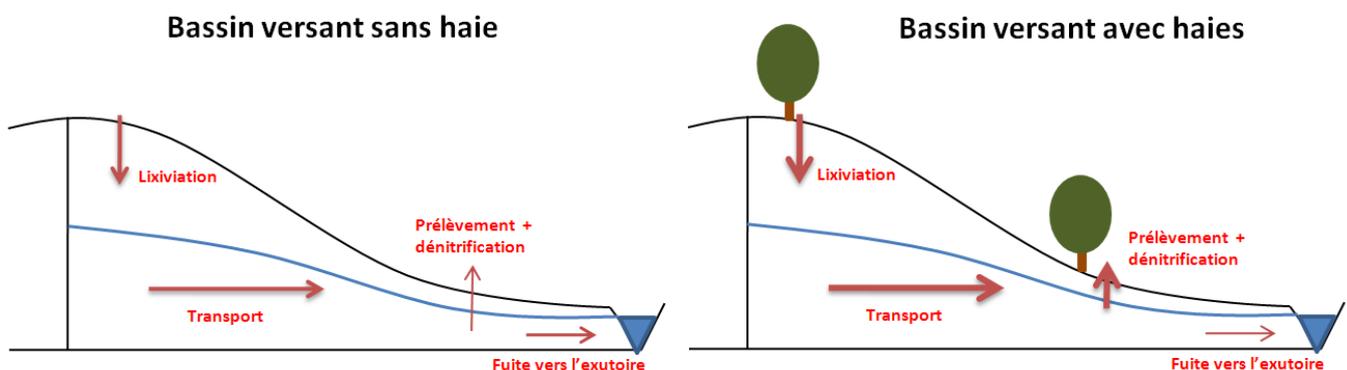


Figure 4.44 – Schéma simplifié de circulation de l'azote simulé sur un bassin versant avec haies et sans haie. L'épaisseur des flèches indique l'importance relative des flux.

L'augmentation de la concentration moyenne en azote dans la nappe avec la présence de haie est d'ailleurs principalement due à l'augmentation de la lixiviation en haut de versant. En effet avec le réseau fictif positionné uniquement en haut de versant on note une augmentation de la teneur en azote de la nappe de 1.2 % alors que pour celui positionné uniquement sur les sols hydromorphes on observe une diminution de la teneur moyenne en azote de la nappe de 0,2 %.

Pour les réseaux bocagers de 1999 et de 1952 la diminution des flux d'azote à l'exutoire est respectivement de 3.6 et 9.2 %. La diminution des flux d'azote à l'exutoire du bassin versant, en présence de haies, est principalement liée à la réduction des débits. Cependant plusieurs facteurs peuvent contribuer à cette diminution. Premièrement la surface agricole effectivement cultivée diminue avec l'augmentation de la surface occupée au sol par le réseau bocager. La surface agricole est par exemple réduite de 7.28 ha (1.5%) avec le réseau de 1999 et de 28.03 ha (4.3%) avec le réseau de 1952. Cette diminution entraîne donc une diminution des intrants dans le bassin versant. Deuxièmement les pertes en azote organique au niveau des mailles haies et de manière globale sur l'ensemble du bassin versant diminuent. En effet les prélèvements en azote de la haie sont en partie stockés dans les tissus de l'arbre (bois) et dans les feuilles. Lors de la chute des feuilles une partie de l'azote prélevé est restitué en surface, entraînant une augmentation de la teneur en carbone et azote organique du sol au voisinage de la haie. Cela reproduit les observations sur le terrain (Walter et al., 2003). Enfin la diminution de la teneur en eau au voisinage de la haie entraîne une diminution de la minéralisation de la matière organique qui contribue à favoriser le stockage d'azote dans le sol. Ces effets favorisant donc la diminution des fuites d'azote vers l'exutoire du bassin versant sont en partie compensés par la diminution de la dénitrification hétérotrophe.

Les résultats obtenus sur ce bassin versant où les teneurs en azote sont très importantes pourraient être différents dans le cas d'un bassin versant moins contaminé. La compétition entre la haie et la culture associée semble d'ailleurs être conditionnée la disponibilité en eau car c'est dans cette configuration le facteur limitant. En effet le recyclage de la matière organique effectué par la haie pourrait avoir un effet plus important dans des conditions plus limitantes en azote. Des simulations non présentées ici montrent par exemple une diminution de la dénitrification moins importante en bas qu'en haut de versant du fait d'une plus forte augmentation de la teneur en azote de l'humus, malgré une diminution plus importante de la teneur en eau du sol.

#### 4.4 Discussion de la partie 4

Bien que l'impact des haies sur les mailles où elles sont présentes soit significatif, leur effet modélisé à l'échelle annuelle sur le bassin versant étudié reste faible. Ce faible impact est dû à la faible densité du réseau bocager. Le remembrement réalisé entre 1952 et 1999 a en effet réduit leur densité de 140 m/ha à 48 m/ha. A une échelle temporelle plus courte, le réseau bocager peut cependant avoir un impact beaucoup plus important, notamment lors de la reprise des écoulements et lors de la période de tarissement de la nappe. Durant ces périodes, cet effet pourrait d'ailleurs être plus important si l'on considérait l'interception des précipitations par la canopée des arbres.

La position des haies sur le bassin versant a également une influence sur les termes du bilan d'eau et d'azote. En bas de versant, la forte disponibilité en eau et en azote permet une forte consommation de la haie et limite la compétition avec les cultures associées. En effet, cette compétition est d'autant plus importante que la profondeur de la nappe est importante. Cette interaction entre la haie et la culture entraîne une diminution de la biomasse de la culture. Cela a notamment déjà été bien observé dans les paysages bocagers ou en agroforesterie, où le rendement des cultures associées aux arbres diminue lorsque ces derniers atteignent un stade de développement adulte (Missonnier, 1976; Nair, 1993). Cependant dans les systèmes agroforestiers le rendement total (arbre plus culture) par unité de surface est plus important que celui d'une monoculture où d'une sylviculture. La version actuelle du modèle a cependant du mal à simuler l'augmentation relative de l'utilisation des ressources, et peut montrer un effet négatif en favorisant la lixiviation des nitrates. Cette augmentation de la lixiviation peut être la conséquence des couches de sol homogènes.

Les résultats de simulations montrent par ailleurs que l'entretien des haies a un effet assez important sur la redistribution des prélèvements en eau et en azote entre la haie et la culture et diminue la compétition, ce qui a déjà été observé dans les systèmes agroforestiers (Droppelmann et al., 2000; Lawson and Kang, 1990). A l'échelle de la maille la dénitrification et les pertes en azote de l'humus sont également influencées par la taille d'entretien. Au final l'effet de l'élagage des arbres a des effets variables en termes de pertes relatives en fonction du scénario utilisé. Cependant, à l'échelle du bassin versant l'impact de l'entretien des haies semble avoir peu d'influence. Ces résultats restent néanmoins très incertains car ils se basent sur un modèle de croissance après taille très simple.

Enfin les haies modélisées dans le modèle sont uniformes en termes de densité de boisement linéaire. Cependant des cartographies plus détaillées des réseaux bocagers permettraient une représentation plus fidèle. Les méthodes de télédétection par segmentation d'image satellite discutées par Vannier et al. (2011) pourraient permettre d'obtenir une bonne représentation de la couverture réelle d'un réseau bocager. L'essence utilisée pour la modélisation de la haie est également unique (chêne), ce qui a son importance notamment pour les interactions de compétitions avec les cultures.

En termes de qualité de l'eau, les haies ont donc paradoxalement à la fois un aspect positif de rétention des nitrates et un aspect négatif lié d'une part à leur effet sur la teneur en eau qui entraîne une diminution de la dénitrification et d'autre part à la compétition avec la culture associée qui peut augmenter la lixiviation. Néanmoins les résultats de simulation suggèrent que les effets bénéfiques sur le bilan azoté, liés à la présence des haies sur le bassin étudié, l'emportent sur les effets négatifs,

grâce notamment à la réduction des flux d'eau et aux possibilités de captation d'azote de la nappe en bas de versant.

## 4.5 Conclusion

L'introduction des mailles double couvert dans le modèle TNT2 a permis dans un premier temps de simuler plus finement la présence au sol de la haie en conservant des dimensions de maille plus importantes que leur zone d'influence. Conserver des dimensions de mailles plus importantes permet notamment de garder des temps de simulations raisonnables pour la modélisation de bassin versant. Ensuite l'introduction d'une maille double couvert dans le modèle permet de prendre en compte les interactions arbre-culture qui ont une importance sur les bilans d'eau et d'azote. Ces interactions sont d'ailleurs différentes en fonction du type d'association.

Le module réalisé a été testé de manière très approfondie et son comportement est globalement conforme aux attentes. Les phénomènes identifiés comme importants par les études de terrain et l'analyse de la littérature sont simulés et leurs variations en fonction des conditions climatiques et topographiques sont cohérentes. Les choix effectués sont donc globalement satisfaisants et remplissent le cahier des charges fixé, à savoir une simulation réaliste des processus majeurs tout en restant simple.

Cependant, ces choix laissent suspecter que le modèle surestime ou sous-estime certains processus importants. Compte tenu du fait que l'impact hydrologique et hydrochimique de la haie résulte de la combinaison complexe de processus aux effets parfois opposés, il est nécessaire d'aller plus loin dans l'analyse. Ainsi, la surestimation de la compétition liée à l'homogénéisation des couches de sol au sein des mailles double couvert a été identifiée comme un élément clef. Le chapitre suivant présente une tentative de remédier à ce problème en discrétisant latéralement les couches de sol de chaque maille double couvert en trois sous ensembles indépendants correspondant aux trois domaines conceptualisés, à savoir la haie seule, la culture seule et la zone d'interaction.



## 5 Discrétisation latérale des couches de sol des mailles double couvert

### 5.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que le modèle surestimait la compétition entre la haie et la culture associée avec l'augmentation de la Profondeur Moyenne du Toit de la Nappe (PMTN). Ce problème a été attribué à l'homogénéité latérale des couches de sol dans le modèle, qui ne permet pas d'affecter à chaque zone d'influence (haie seule, culture seule, interaction haie-culture) des valeurs propres d'humidité et de teneur en azote. Afin de pallier ce problème, les mailles double couvert ont été modifiées en discrétisant latéralement les couches de sol en trois compartiments qui correspondent à ces trois zones d'influence.

### 5.2 Description des processus et des variables affectées

Chaque couche de sol élémentaire a donc été divisée en trois compartiments indépendants les uns des autres. Cette séparation a également permis de différencier le développement de la culture sur la zone d'interaction avec la haie et sur la zone sans interaction (figure Figure 5.1).

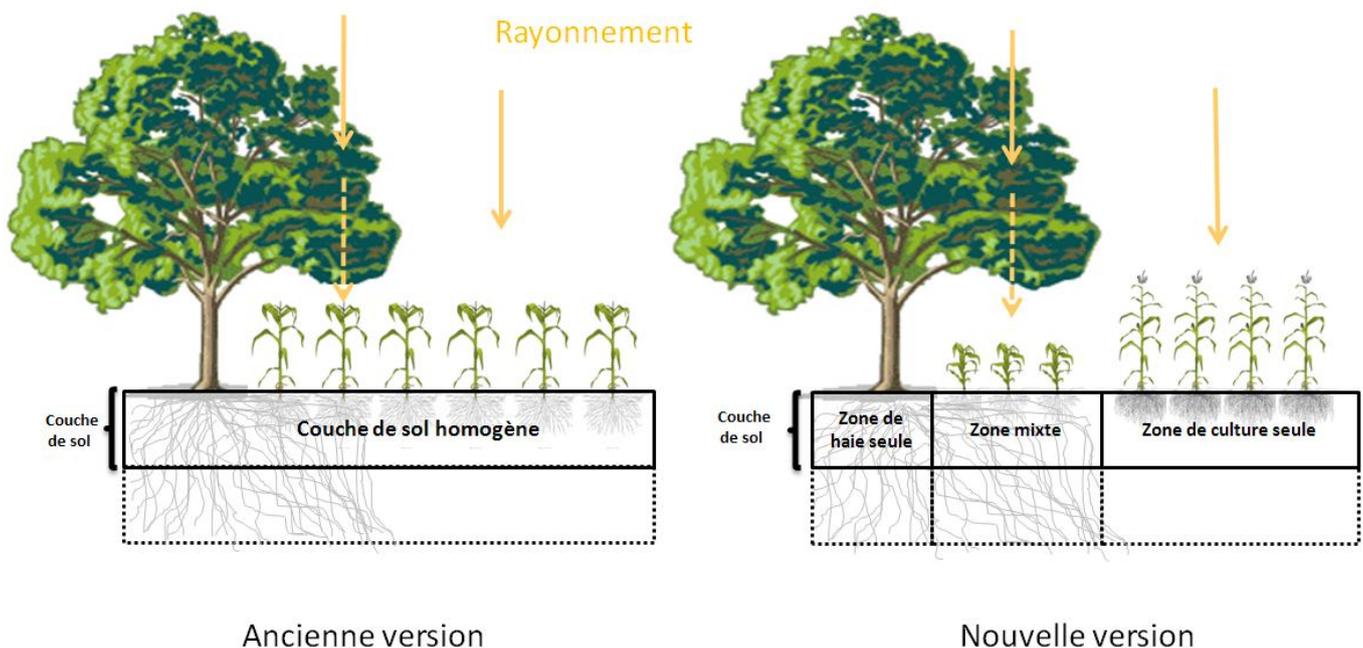


Figure 5.1 – Schéma de comparaison entre la maille double couvert de la version initiale avec les couches de sol homogènes, et la nouvelle version avec la discrétisation latérale des couches de sol en trois compartiments. La végétation n'est pas à l'échelle.

Chacun des compartiments d'une couche de sol va donc être caractérisé en fonction de différentes variables, telles que la teneur en eau et en azote de la réserve utile, la teneur en carbone et en azote de l'humus, la teneur en résidus et leur rapport C/N. Sur chacune des zones cultivées, la culture aura également des variables qui lui sont propre telles que le LAI, la masse sèche, la densité racinaire, les facteurs de stress.

De plus, les restitutions de matières organiques en surface de chaque zone d'influence seront fonction des prélèvements durant la phase de croissance des couverts associés. A noter que pour la

haie, la croissance, les besoins et les prélèvements par unité de surface sont identiques pour les deux zones sur lesquelles elle se développe (zones de haie seule et mixte).

## 5.3 Application de la nouvelle maille double couvert.

### 5.3.1 Schéma de modélisations

Deux schémas de modélisation ont été appliqués à la nouvelle maille double couvert. Pour le premier, on considère que la limite de la zone d'interaction haie-culture ne dépasse pas la limite de la canopée de la haie, comme cela est illustré dans la figure Figure 5.1. Ce schéma de modélisation sera par la suite nommé Zone d'Influence Réduite (ZIR). Pour le second schéma de modélisation, la largeur de la zone mixte est additionnée d'une largeur dite « équivalente ». Cette largeur équivalente a été définie par Crosbie et al. (2007). Elle correspond à une largeur obtenue à partir de la courbe de décroissance exponentielle d'influence du système racinaire au-delà de la canopée (figure Figure 5.2). Ce schéma de modélisation sera par la suite nommé Zone d'Influence Etendue (ZIE)

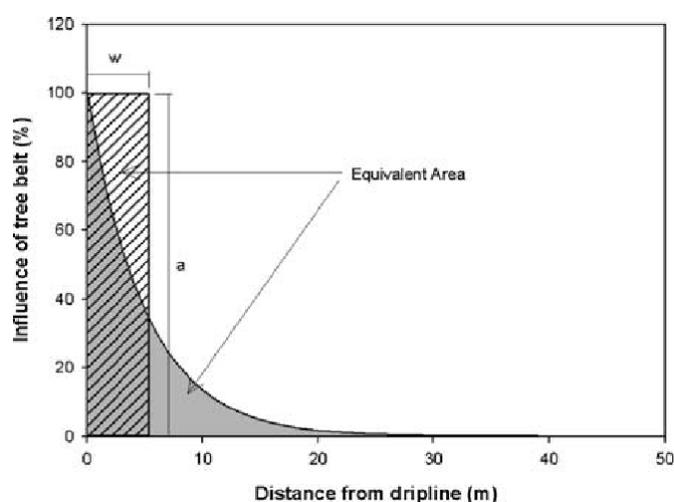


Figure 5.2 – Représentation de la zone d'influence de la haie diminuant exponentiellement à partir de la limite de la canopée de la haie. La largeur équivalente ( $w$ ), sur un côté de la haie, est déterminée à partir de l'aire de la surface grise présente sous la courbe. D'après Crosbie et al. (2007).

Les auteurs estiment que la largeur équivalente ( $w$ ) pour un côté de la haie peut être déterminée à partir de la hauteur ( $h$ ) de la haie selon la formule suivante :

$$w = \frac{2}{3} h$$

La hauteur moyenne des arbres d'un ensemble de haies a été estimée sur le bassin versant de Pleine Fougère (Bretagne) par Lotfi (2008). Cette hauteur moyenne est de 6 m. Elle a été utilisée pour calculer la largeur équivalente pour les 2 côtés de la haie ( $2w$ ) qui a donc été fixée à 8 m. La largeur de zone mixte, qui était de 5 m dans les précédentes simulations (avec les couches de Sol Homogènes "SH") est donc amenée à 13 m avec cette méthode et la zone d'influence de la haie à 16 m (zone mixte de 13 m plus zone de haie seule de 3 m, tableau Tableau 5.1). Cette extension de la zone mixte ne concerne que la zone d'interaction souterraine, la largeur de la canopée est conservée (figure Figure 5.3). L'interception du rayonnement solaire par la canopée de la haie au niveau de la zone mixte est donc pondérée par le rapport : surface de zone mixte / surface de zone mixte sous canopée.

	haie seule	haie + culture		culture seule
		sous canopée	sans canopée	
SH	3	5	0	12
ZIR	3	5	0	12
ZIE	3	5	8	4

Tableau 5.1 –Largeurs (m) de chaque zone d’influence en fonction du schéma de modélisation. SH pour Sol Homogène, ZIR pour Zone d’Influence Réduite, et ZIE pour Zone d’Influence Etendue.

Afin d’être cohérent avec la littérature, pour le schéma ZIE, les prélèvements en eau et azote de la haie par unité de surface ont été divisés par le rapport « surface racinaire / surface de canopée », soit par 2. De ce fait, le schéma ZIE répartit la compétition sur une surface plus importante (13 m de largeur), donc la rend moins intense, alors que le schéma ZIR concentre une compétition plus forte sur une surface plus faible (5 m de largeur).

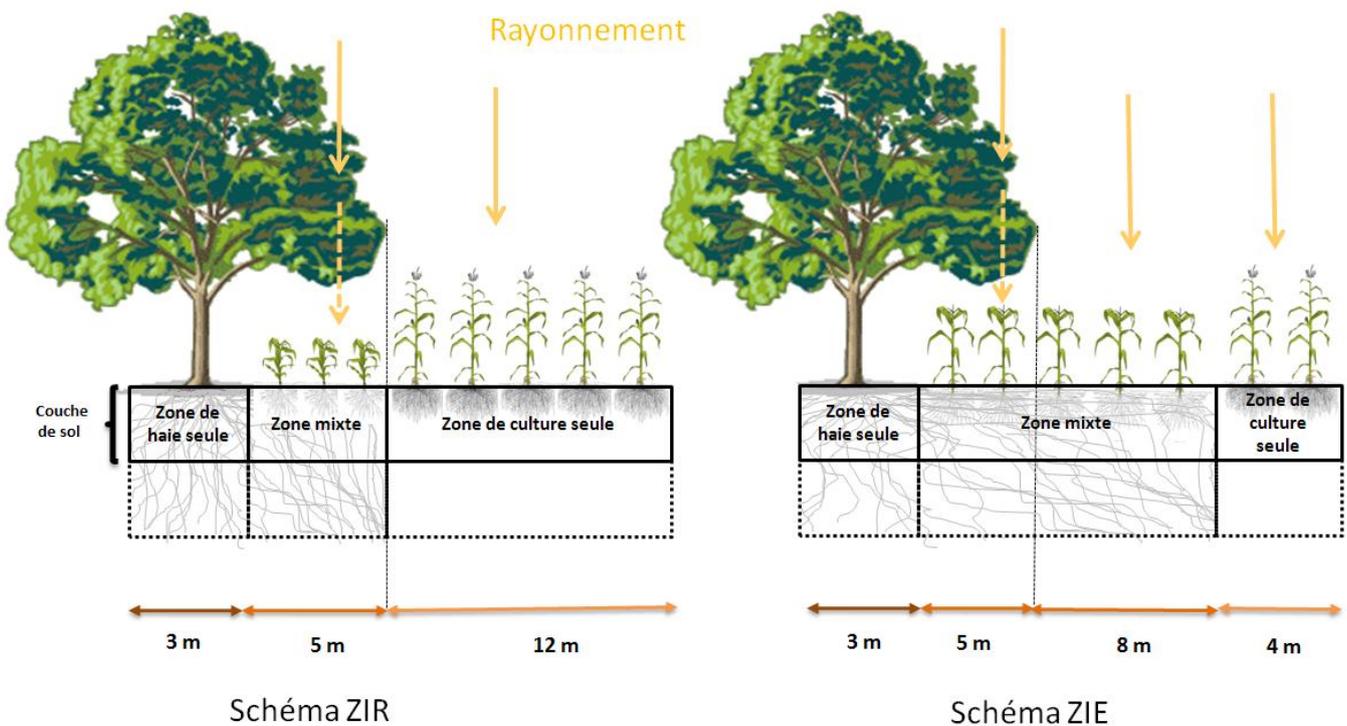


Figure 5.3 - Discrétisation latérale d’une couche de sol de la maille double couvert en trois compartiments, pour le schéma ZIR (Zone d’Influence Réduite) et ZIE (Zone d’Influence Etendue). La végétation n’est pas à l’échelle.

Ces deux schémas ont ensuite été appliqués au réseau de haies de 1999 (décrit dans le chapitre 4.1.5) pour tester l’effet de la longueur du linéaire de haie dans la maille sur les différents termes du bilan d’eau et d’azote. Cet effet allant globalement dans le même sens que pour le chapitre précédent, il n’a pas été commenté ici mais est présenté dans l’annexe 3.

Le même réseau de haies, mais en fixant la longueur du linéaire dans chaque maille à 20 m, a également été utilisé pour tester l’effet de la PMTN (assimilée à la position de la haie sur le bassin versant) sur les interactions haie-culture.

### 5.3.2 Effet de la modification des mailles double couvert sur les termes du bilan hydrique.

#### 5.3.2.1 Effet de la position sur le bassin versant

La figure Figure 5.4 présente la transpiration moyenne de la haie selon la PMTN, pour le schéma de la version précédente (SH), pour le schéma ZIR et ZIE. Pour le schéma ZIE la transpiration par unité de surface est donnée par rapport à la surface de canopée pour pouvoir comparer les prélèvements de la haie dans les trois schémas de modélisation selon la même surface (les prélèvements par unité de surface racinaire étant différents). La transpiration de la haie reste inchangée quelle que soit la PMTN, entre le schéma SH et le schéma ZIE. Le schéma ZIR ne modifie pas non plus la transpiration de la haie, par rapport au modèle initial, lorsque la PMTN est faible, mais la réduit fortement pour les PMTN plus élevées. La zone d'influence racinaire de la haie (haie seule et mixte) est plus petite dans le schéma ZIR que dans le schéma ZIE, ce qui entraîne une diminution de la réserve en eau potentiellement accessible et donc une transpiration plus faible.

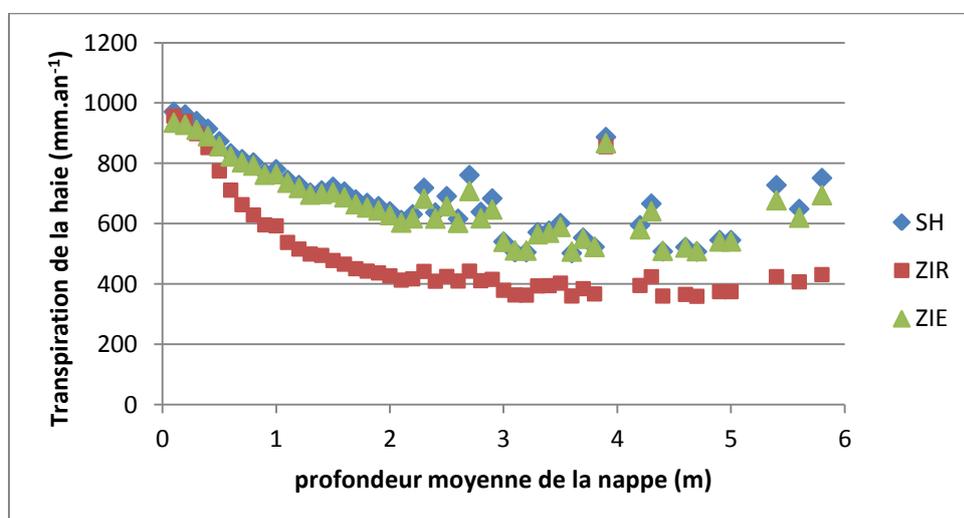


Figure 5.4 – Transpiration moyenne de la haie (ramenée à la surface de canopée), selon la PMTN, pour les trois scénarios. Avec SH pour Sol Homogène, ZIR pour Zone d'Influence Réduite (scénario 1) et ZIE pour Zone d'Influence Étendue (scénario 2).

En ce qui concerne l'humidité du sol, on constate pour la zone de culture seule que la teneur en eau moyenne de la réserve utile est identique quel que soit le schéma de modélisation (figure Figure 5.5). Ce qui est logique car les cultures sont peu influencées par la haie. Les différences entre les schémas de modélisation apparaissent pour les deux autres zones (haie seule et mixte). Pour le schéma ZIR, les teneurs en eau dans ces deux zones sont quasiment similaires, et durant la période estivale toujours inférieures à la teneur en eau dans la zone de culture seule (figure Figure 5.5). Pour le schéma ZIE, la teneur en eau dans la zone mixte est également toujours plus faible que celle de la zone de culture seule. Cependant, durant la période estivale, le sol dans la zone de haie seule est parfois plus sec que celui de la zone de culture seule, et parfois plus humide en fonction des années, pour lesquelles le type de culture associé et la pluviométrie sont différents.

Durant la période estivale, la teneur en eau de la réserve utile des zones de haie seule et de culture seule sont plus faibles dans le schéma ZIR par rapport au schéma ZIE. Ces différences s'expliquent par l'étalement du système racinaire sur une surface plus importante dans le schéma ZIE qui entraîne une diminution des prélèvements dans le sol par unité de surface (la taille des compartiments de la zone mixte étant différente dans les deux schémas de modélisation).

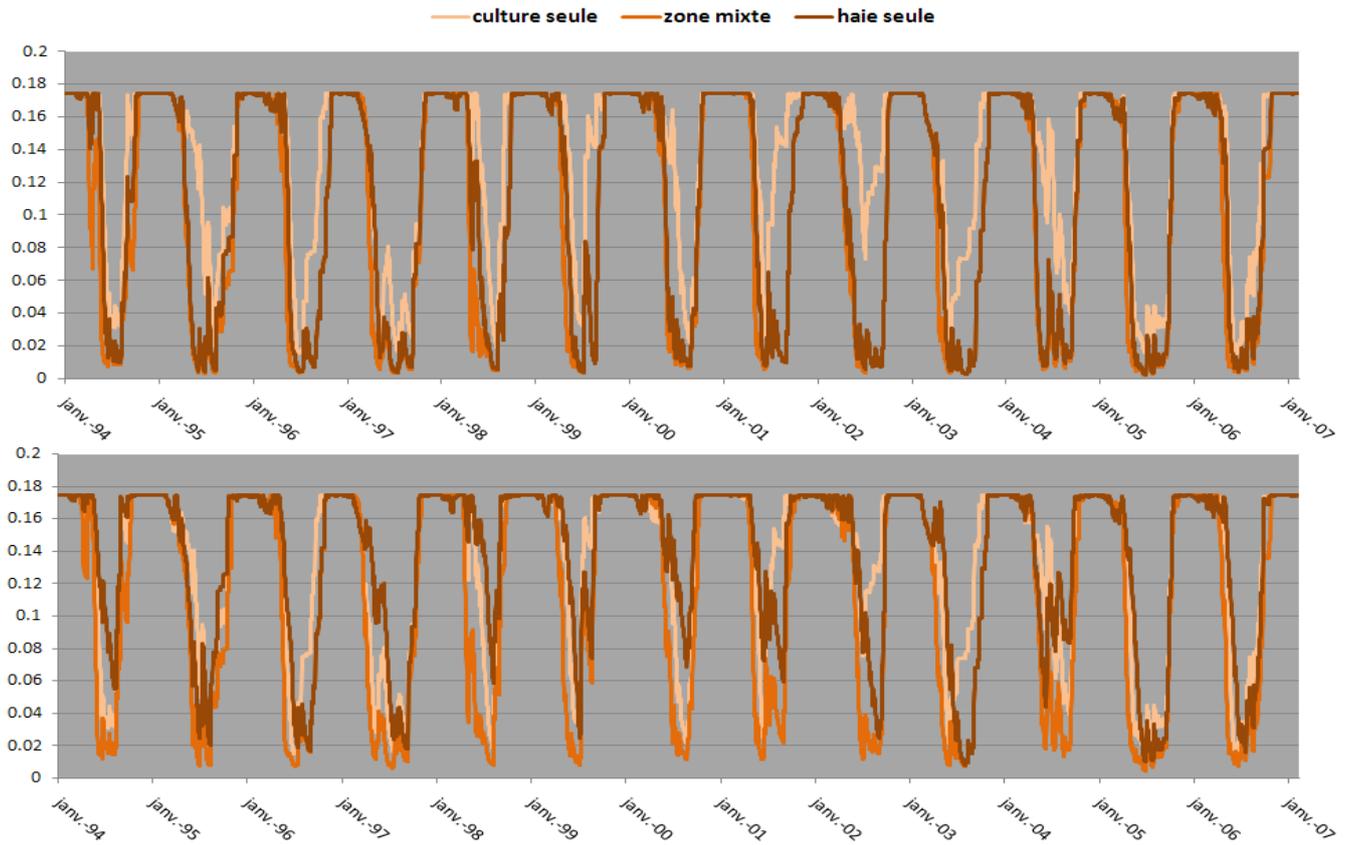


Figure 5.5 – Chronique de la teneur en eau du sol d’une maille double couvert du bassin versant pour les trois types de zone, avec en haut le schéma ZIR et en bas le schéma ZIE. Cette maille est située sur un sol intermédiaire.

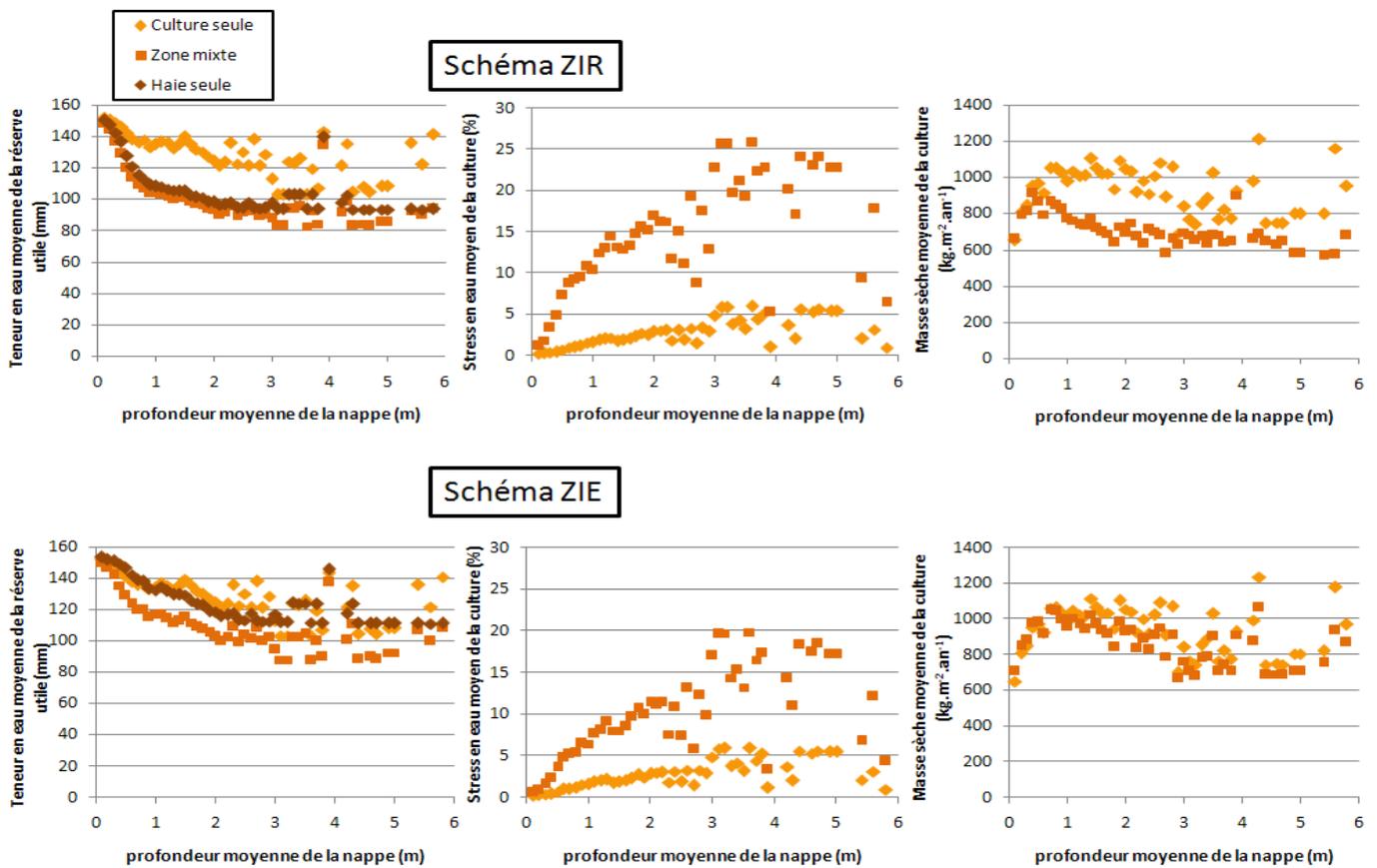


Figure 5.6 – Evolution de la teneur en eau moyenne de la réserve utile, du stress en eau moyen et de la masse sèche moyenne de la culture en fonction de la PMTN, pour les différentes zones des mailles double couvert et pour les deux scénarios.

### 5.3 Application de la nouvelle maille double couvert.

La figure Figure 5.6 montre, de ce fait, que le stress en eau de la culture dans la zone mixte est plus important dans le cas du schéma ZIR que dans le cas du schéma ZIE. De ce fait la masse sèche de la culture dans la zone mixte pour le second scénario est moins influencée par la présence de haie.

Les différences de teneur en eau mises en évidence entre les trois zones, pour les deux schémas de modélisation vont vraisemblablement, lors de la reprise des écoulements, entraîner des percolations différentes d'eau et d'azote vers la nappe. En effet l'apport d'eau par les précipitations percolera plus vite dans les zones où la teneur en eau est la plus forte.

Les valeurs des différentes variables de chaque maille, obtenues par la pondération de chaque zone par leur surface, ont ensuite été calculées. Dans le cas du schéma ZIE et pour les PMTN élevées, on a finalement une diminution de la transpiration moyenne de la culture en présence de haie plus importante que pour le schéma ZIR (figure Figure 5.7). Pour les faibles PMTN, la diminution de l'effet d'anoxie en présence de haie est également plus prononcée dans le cas du schéma ZIE, ce qui entraîne une augmentation de la transpiration de la culture en présence de haie (valeurs négatives) plus importante que pour le schéma ZIR.

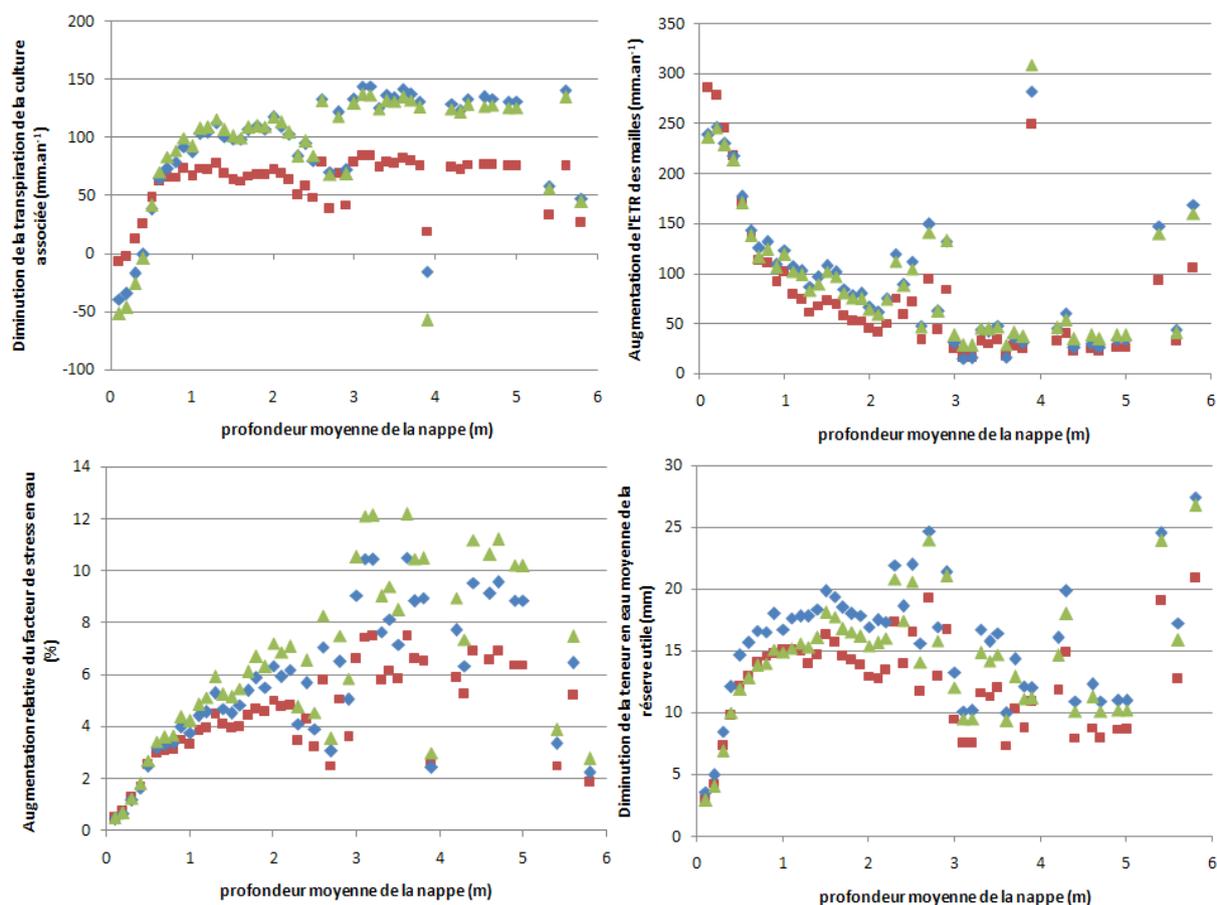


Figure 5.7 – Diminutions moyennes de la transpiration de la culture et de la teneur en eau moyenne de la réserve utile, et augmentations moyennes de l'ETR et du facteur de stress en eau des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haies, en fonction de la PMTN et pour les différents scénarios. Il s'agit de moyennes sur l'ensemble des mailles double couvert. Les losanges correspondent schéma SH, les carrés au schéma ZIR et les triangles au schéma ZIE.

Pour les deux schémas de modélisation (ZIR et ZIE), il y a une redistribution des prélèvements entre la haie et la culture. En effet, pour les PMTN supérieures à 0.5 m, la plus faible transpiration de la haie dans le schéma ZIR est compensée par une transpiration de la culture plus forte (diminution plus

faible en présence de haie). Au final, l'augmentation d'évapotranspiration réelle des mailles double couvert est globalement inchangée quel que soit le type de schéma de modélisation.

L'effet sur les termes du bilan hydrique du type de culture associé à la haie (prairie, blé, maïs), pour les schémas ZIR et ZIE, va globalement dans le même sens que les observations des mailles double couvert présentés dans ce chapitre. De même les différences sur les termes du bilan hydrique entre les trois types d'association sont qualitativement similaires à celles présentées dans le chapitre 4.2.5.2. Ces variations ne sont donc pas présentées ici mais sont illustrées dans l'annexe 4.

Les faibles différences d'évapotranspiration réelle sur les mailles double couvert entre les schémas de modélisation entraînent de faibles variations à l'échelle du bassin versant (tableau Tableau 5.2).

	Sans haie	48 m.ha <sup>-1</sup>			140 m.ha <sup>-1</sup>		
		SH	ZIR	ZIE	SH	ZIR	ZIE
Débit (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	1.66	1.58	1.59	1.59	1.49	1.5	1.51
Evapotranspiration (mm)	486	504	501	502	522	516	518

Tableau 5.2 – Valeurs moyennes annuelles d'évapotranspiration et de débit à l'exutoire du bassin versant.

### 5.3.2.2 Effet sur les termes du bilan hydrique de la position d'un réseau bocager sur le bassin versant

Afin de déterminer l'influence sur les composantes du bilan hydrique de la position d'un réseau bocager au sein du bassin versant, des simulations ont été effectuées avec trois réseaux bocagers fictifs de 24 m.ha<sup>-1</sup>, soit 596 mailles double couvert avec une longueur de haie identique de 20 mètres dans chaque maille double couvert. Pour le premier réseau (RH) l'ensemble des haies sont positionnées dans les fonds de vallées sur des sols hydromorphes, pour le second réseau (RI) elles sont positionnées sur les sols intermédiaires et pour le troisième réseau (RD) sur les sols drainants (figure Figure 5.8). Dans ces simulations les mailles double couvert sont discrétisées latéralement en fonction du schéma ZIE.

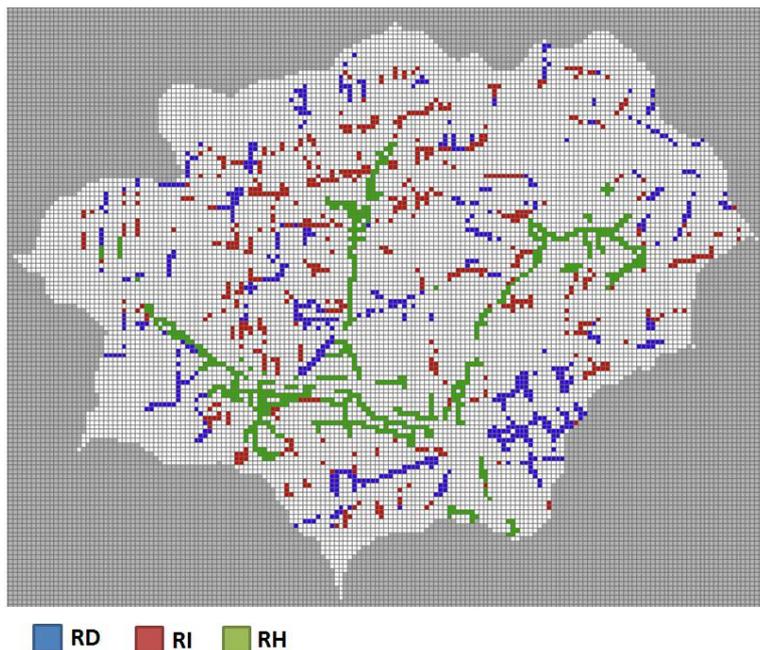


Figure 5.8 – Représentation des mailles double couvert des trois réseaux bocagers fictifs positionnés sur les sols drainants (RD) sur les sols intermédiaires (RI) et sur les sols hydromorphes (RH) du bassin versant.

### 5.3 Application de la nouvelle maille double couvert.

Les variations moyennes du toit de la nappe pour les mailles double couvert des trois réseaux ont été comparées avec celles obtenues pour les mêmes mailles en absence de haie (figure Figure 5.9). On observe que les haies ont une influence plus importante sur la nappe en bas de versant (sur les sols hydromorphes) par rapport aux positions plus hautes dans le versant. En effet durant les périodes sèches la présence des haies abaisse le niveau de la nappe d'environ 40 cm en bas de versant contre 10 cm pour les positions plus hautes sur le versant. Les remontées capillaires plus importantes en bas de versant expliquent cette différence.

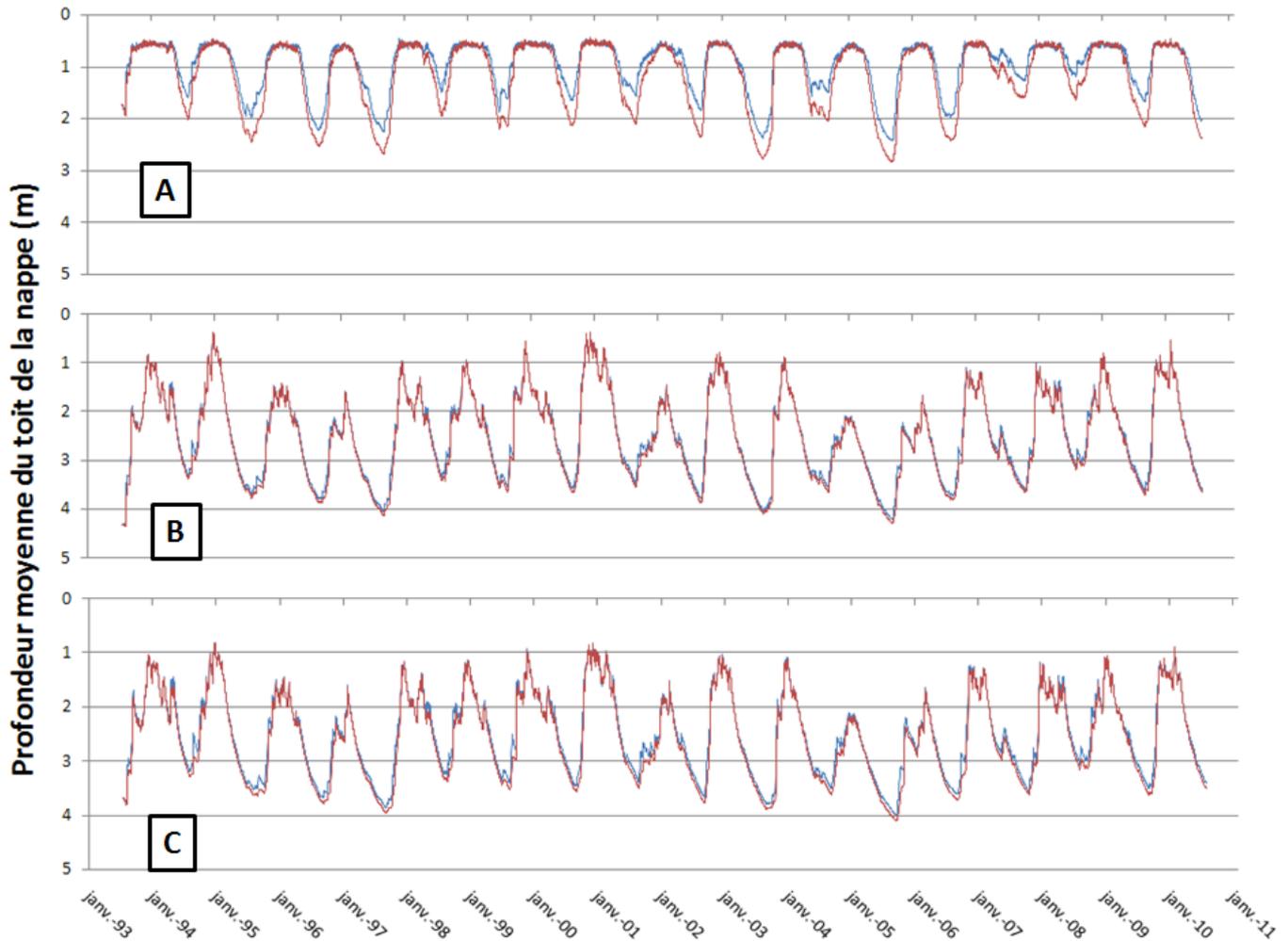


Figure 5.9 – Variations annuelles de la profondeur moyenne du toit de la nappe : en rouge pour les mailles double couvert des réseaux RH (A), RI (B) et RD (C), en bleu pour les mêmes mailles sans haies.

Le tableau Tableau 5.3 présente les valeurs annuelles moyennes d'évapotranspiration, de transpiration de la haie et de la culture, d'évaporation du sol ainsi que la teneur en eau de la réserve utile. L'évapotranspiration moyenne sur les mailles double couvert augmente nettement entre les configurations avec et sans haies pour les trois réseaux bocagers fictifs. L'augmentation absolue de l'évapotranspiration est plus importante en bas de versant, avec 159 mm contre respectivement 113 et 107 mm pour les positions plus hautes du bassin versant. Par contre, l'augmentation relative de l'évapotranspiration est très semblable pour les trois réseaux, soit 24.7 % pour le réseau situé sur les sols hydromorphes, de 22.9 % pour le réseau situé sur les sols intermédiaires et de 21.7 % pour le réseau situé sur les sols drainants par rapport aux mêmes mailles sans haie sur le bassin.

Position sur le versant	Avec haies			Mêmes mailles sans haie			Différences		
	RH	RI	RD	RH	RI	RD	RH	RI	RD
Evapotranspiration	800	609	599	642	495	491	159	113	107
Transpiration de la haie	857	741	753	-	-	-	-	-	-
Transpiration de la culture	360	232	214	465	375	365	-105	-143	-152
Evaporation du sol	151	115	115	246	176	181	-96	-62	-66
Teneur en eau moyenne de la réserve utile	132	119	130	142	132	145	-10	-13	-15

Tableau 5.3 - Valeurs annuelles moyennes (en mm) de l'évapotranspiration, de la transpiration de la haie et de la culture, de l'évaporation du sol et de la teneur en eau de la réserve utile, pour les mailles double couvert des réseaux bocagers RH, RI et RD, ainsi que pour les mêmes mailles sans haies.

A l'échelle du bassin versant, les différentes positions des trois réseaux bocagers fictifs RH, RI, RD, ont très peu d'influence sur les débits annuels à l'exutoire et sur l'évapotranspiration annuelle du bassin versant. En effet pour ces deux flux les différences entre les trois réseaux bocagers sont inférieures à 1 % (tableau Tableau 5.4). Ces faibles différences peuvent s'expliquer par des profondeurs moyennes du toit de la nappe très proches, autour de 150 cm, entre les réseaux de haut et de bas de versant (figure Figure 5.9).

	Valeurs absolues				Différence relative (%)		
	Sans haie	RH	RI	RD	RH	RI	RD
Débit ( $10^6 \text{ m}^3$ )	1.659	1.626	1.637	1.638	1.99	1.34	1.26
Evapotranspiration (mm)	487	494	491	491	-1.43	-0.96	-0.91

Tableau 5.4 - Valeurs annuelles moyennes de débit à l'exutoire et d'évapotranspiration du bassin versant pour des simulations avec les réseaux RH, RI et RD, ainsi que pour un bassin versant sans haie. Les différences relatives par rapport au bassin versant sans haie sont indiquées pour les trois réseaux fictifs.

### 5.3.3 Impact de la discrétisation latérale des couches de sol sur les termes du bilan d'azote.

La figure Figure 5.10 montre que les prélèvements en azote des haies estimés avec le schéma SH sont inférieurs aux prélèvements estimés avec le schéma ZIE et supérieurs aux prélèvements estimés avec le schéma ZIR et cela quelle que soit la PMTN.

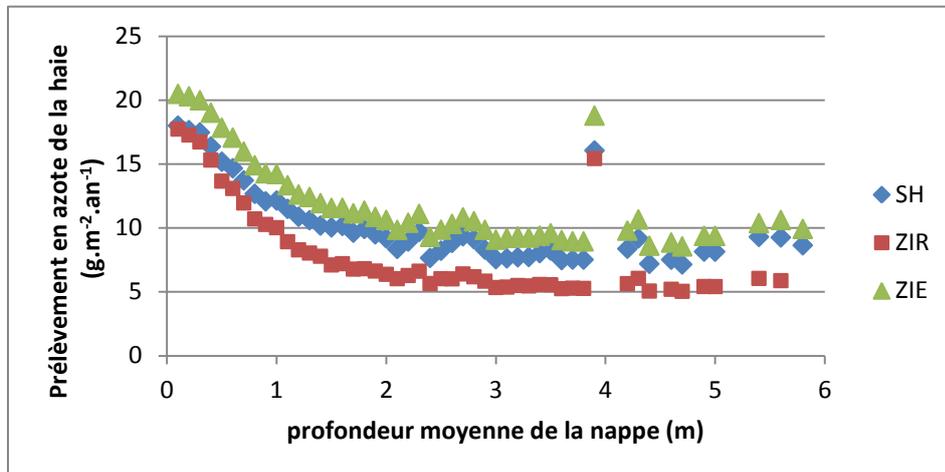


Figure 5.10 Prélèvements moyens en azote de la haie (ramenés à la surface de canopée), selon la PMTN et le schéma de modélisation utilisé.

Cela met en évidence l'effet de l'extension du système racinaire. En effet, dans le schéma ZIR, la part du système racinaire présent dans la zone d'interaction haie-culture est plus faible que dans le cas du schéma ZIE soit respectivement 63 % contre 81 %. La part du système racinaire qui a accès aux intrants destinés à la culture est donc plus importante dans le cas du schéma ZIE. Cette configuration du système racinaire est donc plus favorable aux prélèvements des intrants.

Pour la culture associée à la haie, la diminution des prélèvements moyens en azote par rapport aux mêmes mailles sans haie, est plus faible avec le schéma ZIR qu'avec le schéma SH, et plus forte dans le cas du schéma ZIE (figure Figure 5.11). Ces différences sont la conséquence du stress en eau de la culture liée à la compétition avec la haie (figure Figure 5.7), qui est plus important dans le cas du schéma ZIE.

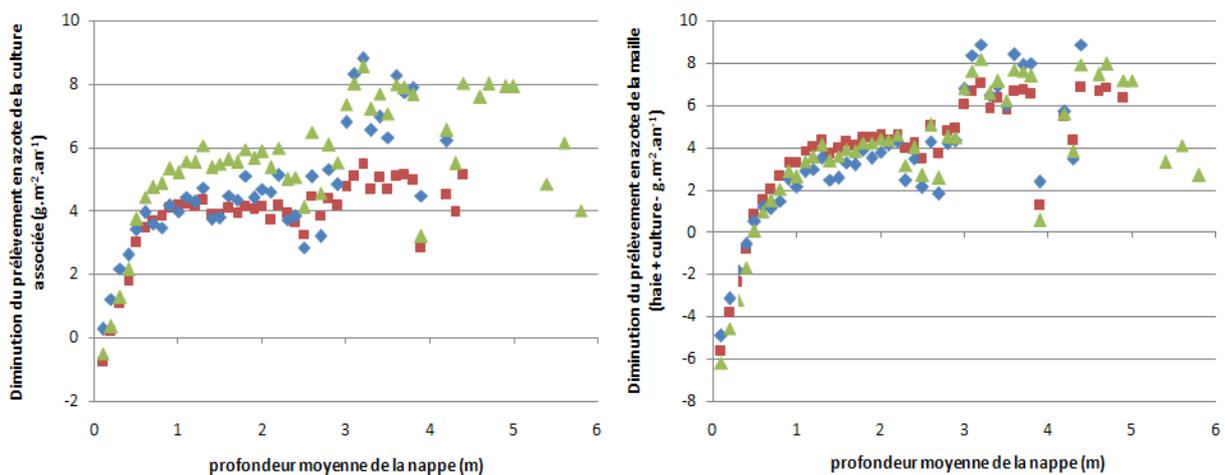


Figure 5.11 – Diminution du prélèvement en azote de la culture associée et du prélèvement total (haie plus culture) des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haies, selon la PMTN et pour les différents scénarios (losanges pour SH, carrés pour ZIR, triangles pour ZIE).

Les prélèvements de chaque zone pondérés par leur surface entraînent au final une diminution des prélèvements moyens en azote (haie plus culture) des mailles double couvert qui est globalement inchangée quel que soit le type de schéma de modélisation (figure Figure 5.11).

Comme pour l'eau il y a une redistribution de la quantité d'azote prélevée entre la haie et la culture associée pour les PMTN supérieures à 0.5 m. En effet, pour le schéma ZIR, le prélèvement en azote de la haie plus faible que pour le schéma ZIE est compensé par un prélèvement en azote de la culture plus important (diminution en présence de haie plus faible).

La figure Figure 5.12 montre que, dans les deux schémas, la teneur en azote moyenne de la réserve utile dans la zone de haie seule tend à diminuer vers un palier avec l'augmentation de la PMTN. En effet, dans la zone de haie seule, la réserve utile est uniquement enrichie en azote par les restitutions de la haie et par les dépôts atmosphériques en surface, et par la nappe via les remontées capillaires. L'augmentation de la PMTN qui tend à diminuer les remontées capillaires diminue les apports en azote par la nappe. De plus, les prélèvements d'azote par la haie étant plus faibles en haut de versant, les restitutions lors de la chute des feuilles le sont également. La figure Figure 5.13 montre également que la minéralisation nette est plus forte en bas de versant. La teneur en azote de la réserve utile dans la zone de haie seule semble d'ailleurs fortement influencée par le taux de minéralisation nette.

Pour la zone mixte on observe une teneur en azote de la réserve utile qui tend à être supérieure à celle de la zone de culture seule avec l'augmentation de la PMTN dans le cas du schéma ZIR (figure Figure 5.12). Au contraire pour le schéma ZIE les teneurs dans la zone mixte tendent à être légèrement inférieures aux teneurs dans la zone de culture seule, à l'exception des PMTN supérieures à 3 mètres. Cependant la grande majorité des mailles sont associées à des PMTN inférieures à 3 m (figure Figure 4.17).

### 5.3 Application de la nouvelle maille double couvert.

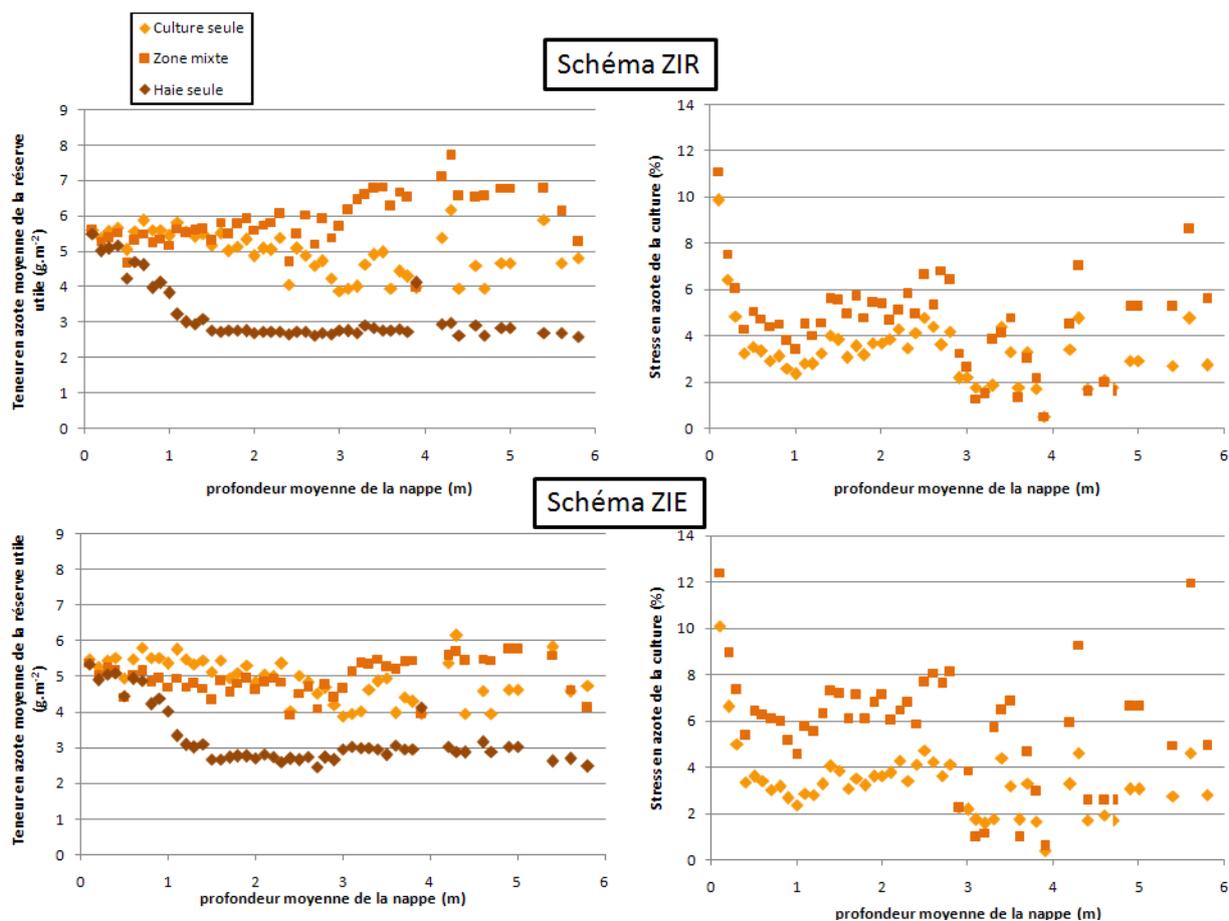


Figure 5.12 - Valeurs de la teneur en azote moyennes de la réserve utile et du stress azoté moyen de la culture selon la PMTN, pour les différentes zones des mailles double couvert et pour les schémas de modélisation ZIR et ZIE.

Sur la zone de culture seule et sur la zone mixte les apports d'intrants par unité de surface sont identiques. Les teneurs en azote de la réserve utile, plus faibles pour la zone mixte que pour la zone de culture seule, suggèrent donc une augmentation des prélèvements (haie et culture) auxquels s'ajoute une dénitrification, et/ou une diminution de la minéralisation nette.

En effet, la minéralisation nette est plus faible pour la zone mixte que pour la zone de culture seule, pour les deux scénarios et globalement pour toutes les positions dans le bassin versant (figure Figure 5.13). Ceci est dû à une teneur en eau du sol plus faible dans la zone mixte (figure Figure 5.6). Les prélèvements d'azote (haie plus culture) sont également plus importants dans la zone mixte pour les PMTN faibles (< 1 m). Ils tendent ensuite à être équivalents voire inférieurs aux prélèvements dans la zone de culture seule à mesure que la PMTN augmente.

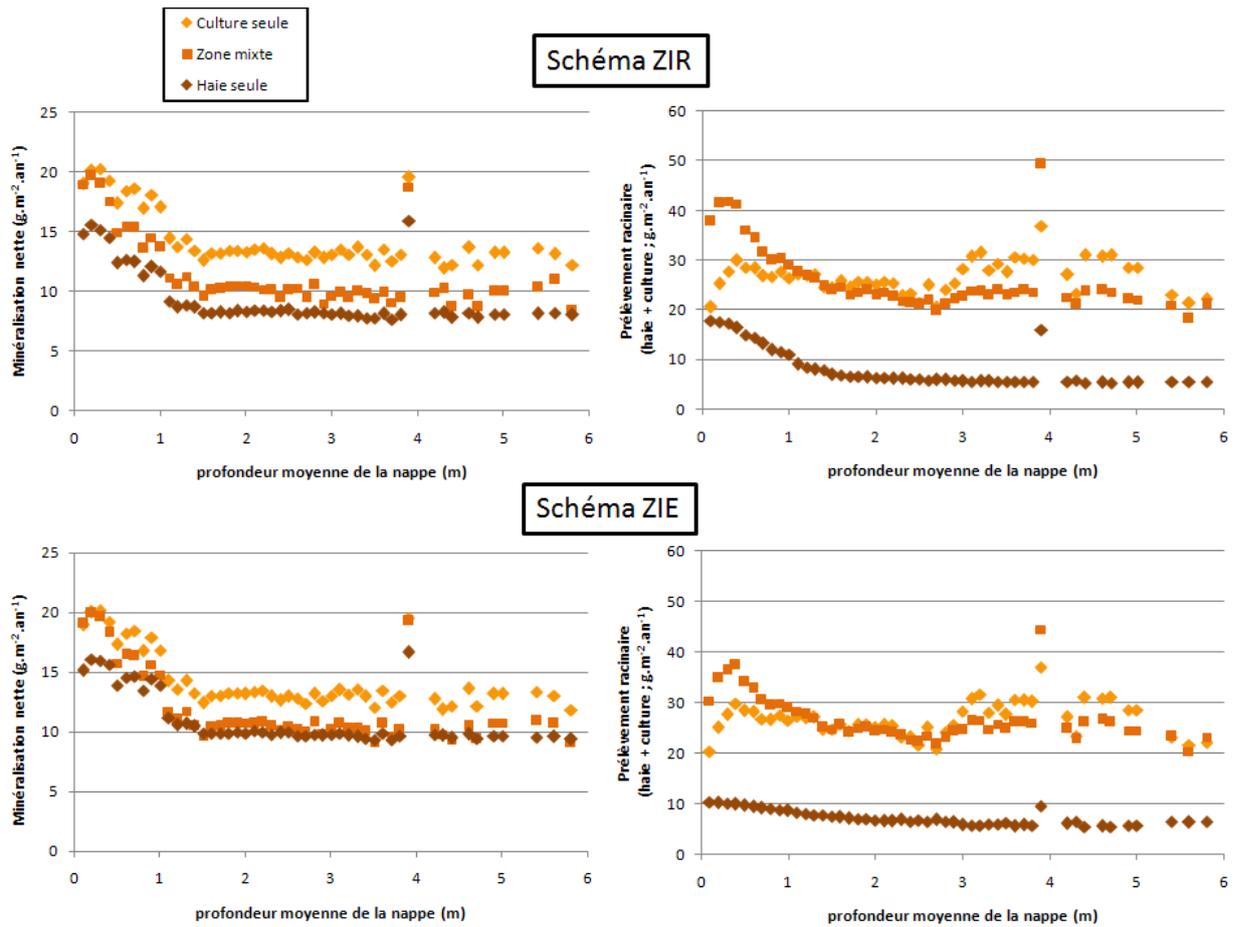


Figure 5.13 – Minéralisation nette et de prélèvements par la haie et la culture associée selon la PMTN, pour les différentes zones des mailles double couvert et pour les deux scénarios.

La dénitrification dans la zone mixte est plus faible que dans la zone de culture seule pour les PMTN supérieures à 0,5 m (figure Figure 5.14). Cette diminution est également due à une teneur en eau du sol plus faible dans la zone mixte (figure Figure 5.6).

La diminution de la teneur en azote de la réserve utile dans le cas du schéma ZIE est donc la conséquence de la diminution de la minéralisation plus importante que la diminution de la dénitrification pour les PMTN entre 0,5 et 2,5 m.

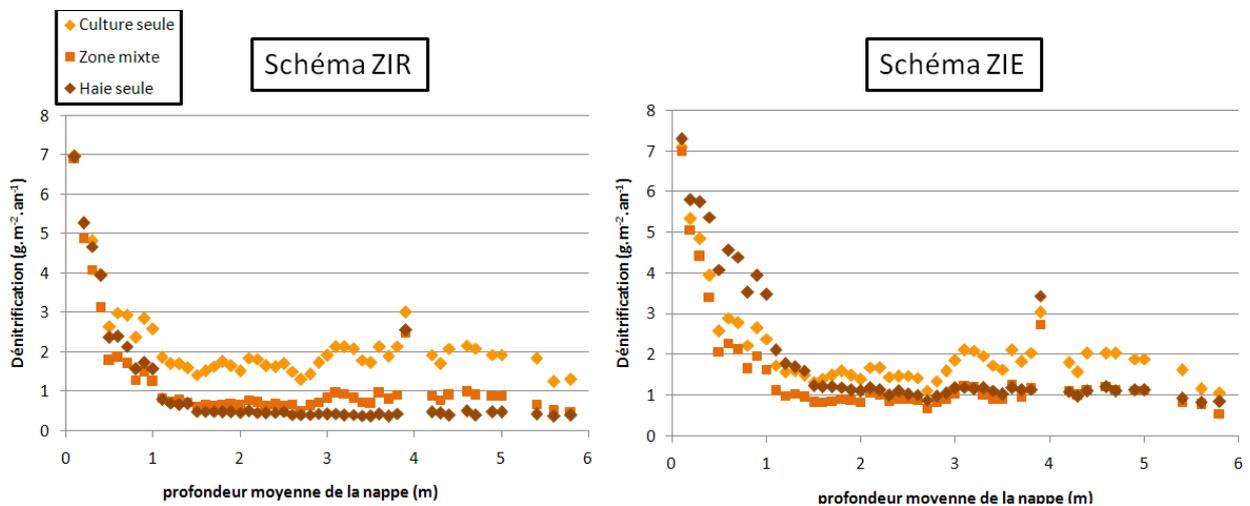


Figure 5.14 – Dénitrification moyenne selon la PMTN, pour les trois zones des mailles double couvert et pour les deux scénarios.

### 5.3 Application de la nouvelle maille double couvert.

Pour les PMTN inférieures à 0.5 m le taux de dénitrification semble équivalent quelle que soit la zone de la maille (figure Figure 5.14). Ceci est dû au fait que la position du toit de la nappe est identique dans toute la maille. En effet la nappe n'a pas été discrétisée selon les trois zones des mailles double couvert. L'effet de la haie sur le niveau de la nappe est donc global à l'ensemble de la maille. Les prélèvements en eau de la haie peuvent donc influencer la dénitrification sur la zone de culture seule.

Sur l'ensemble de la maille, il y a par contre une diminution de la dénitrification en présence de haie qui est plus importante en bas de versant par rapport aux mailles plus hautes dans le versant (figure Figure 5.15). Cette différence liée à la position des mailles sur le versant peut s'expliquer par les différences de teneur en eau de la réserve utile du sol (figure Figure 5.7).

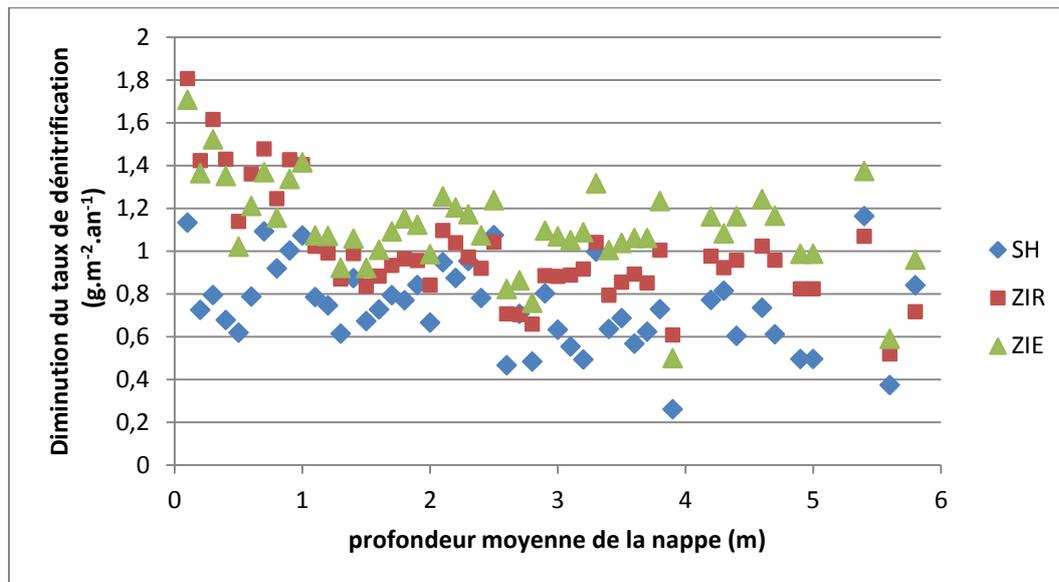


Figure 5.15 – Diminution de la dénitrification des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haies selon la PMTN. Avec SH pour Sol Homogène, ZIR pour Zone d'Influence Réduite et ZIE pour Zone d'Influence Étendue.

Sur les mailles double couvert, la dénitrification est d'ailleurs plus fortement influencée avec les couches discrétisées latéralement que pour le schéma SH, quelle que soit la position dans le versant (figure Figure 5.15). Pour les PMTN élevées la diminution de la dénitrification tend à être plus forte pour le schéma ZIE.

Pour les schémas ZIR et ZIE, l'ensemble de ces processus amènent au final à une diminution des teneurs en azote moyennes de la réserve utile des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haie (figure Figure 5.16). Cette diminution tend à s'annuler pour les PMTN supérieures à 3 m. Ce résultat est contraire au schéma SH avec lequel il y a une augmentation de la teneur en azote de la réserve utile (figure Figure 5.16).

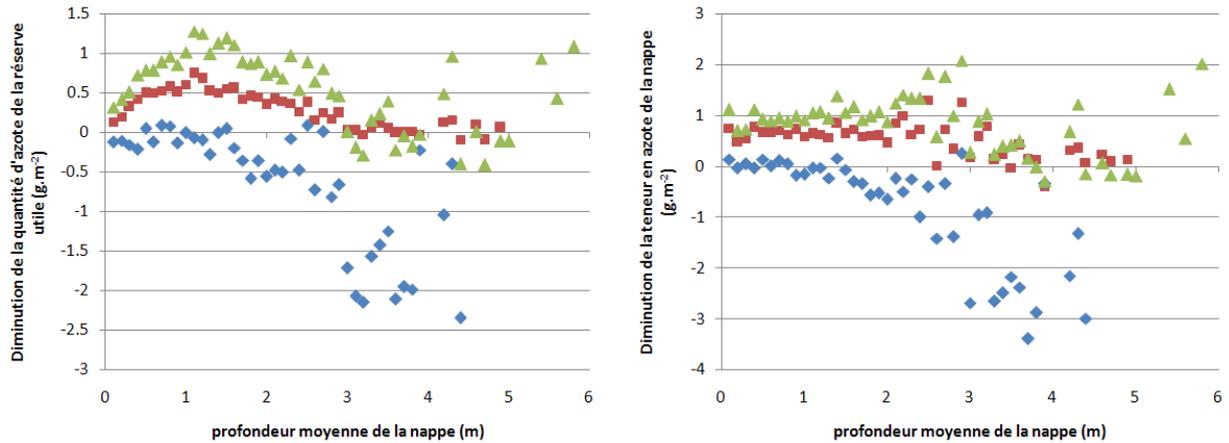


Figure 5.16 – Diminution de la teneur en azote moyenne de la réserve utile et de la nappe sur les mailles doubles couvert par rapport aux mêmes mailles sans haies selon la PMTN (losanges pour SH, carrés pour ZIR, triangles pour ZIE).

Cette diminution de la teneur en azote de la réserve utile explique la diminution de la teneur en azote de la nappe (figure Figure 5.16). Celle-ci est plus importante dans le schéma ZIE. Elle semble par contre indépendante de la position dans le versant pour les PMTN inférieures à 3 m.

A l'échelle du bassin versant, les valeurs annuelles moyennes des flux d'azote sont donc modifiées par rapport à la version du modèle avec les couches homogènes (tableau Tableau 5.5).

	Sans haie	48 m.ha <sup>-1</sup>			140 m.ha <sup>-1</sup>		
		SH	ZIR	ZIE	SH	ZIR	ZIE
Flux à l'exutoire	5.78	5.57	5.51	5.48	5.25	5.1	5.04
Dénitrification	3.59	3.22	3.2	3.17	2.98	2.91	2.88
Minéralisation nette	14.77	14.46	14.45	14.43	14.06	14.1	13.95
Perte de l'humus	5.01	4.64	4.82	4.73	4.3	4.75	4.54
Prélèvement de la haie	0.00	1.49	1.16	1.72	3.62	2.85	4.24
Prélèvement des cultures	22.72	22.44	22.46	22.4	21.65	21.73	21.15
Azote de la réserve utile	5.19	5.24	5.16	5.13	5.3	5.05	4.93
Azote de la nappe	15.15	15.22	15.02	14.96	15.39	14.75	14.53

Tableau 5.5 - Valeurs annuelles moyennes des flux d'azote du bassin versant : flux à l'exutoire, dénitrification, minéralisation nette, perte de l'humus, prélèvement de la haie et de la culture en g N.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> et valeurs moyennes de teneurs en azote (g N.m<sup>-2</sup>) de la réserve utile et de la nappe pour des simulations avec les réseaux de haies de 1999 (48 m.ha<sup>-1</sup>), de 1952 (140 m.ha<sup>-1</sup>) et sans haie.

On observe ainsi, avec le réseau de 1999 (48 m.ha<sup>-1</sup>), une diminution des flux d'azote à l'exutoire du bassin versant de respectivement 4,5 et 5,1 % pour les schémas ZIR et ZIE par rapport à une configuration sans haie. Avec le réseau de 1952 (140 m.ha<sup>-1</sup>) cette diminution est de respectivement de 11,6 et 12,7 %. La dénitrification diminue de respectivement 10,6 et 11,4 % pour le réseau de 1999 ; de 18,6 et 19,5 % avec le réseau de 1952. La minéralisation nette diminue de respectivement 2,1 et 2,2 % avec le réseau de 1999 ; de 5 à 5,1 % avec le réseau de 1952. Enfin, les pertes en azote de l'humus diminuent de respectivement 3,9 et 5,7 % avec le réseau de 1999 ; de 5,5 et 9,5 % avec le réseau de 1952.

Les teneurs en azote moyenne de la réserve utile et de la nappe sont plus faibles en présence de haie pour les schémas ZIR et ZIE, d'autant plus que la densité de haie augmente.

### 5.3.3.1 Effet sur les termes du bilan d'azote de la position d'un réseau bocager sur le bassin versant

Le tableau Tableau 5.6 présente les valeurs des différentes composantes du bilan d'azote pour les trois réseaux de haies fictifs RH (Réseau sur sol Hydromorphe), RI (Réseau sur sol Intermédiaire) et RD (Réseau sur sol Drainant) précédemment définis, dans le cas du second scénario. Pour les réseaux bocagers RI et RD, les prélèvements en azote des mailles double couvert sont moins importants que ceux des mêmes mailles sans haie, du fait de la diminution de la fertilisation. Au contraire en bas de versant (RH) on observe que les prélèvements en azote des mailles double couvert sont plus importants que ceux des mêmes mailles sans haie malgré la diminution des intrants et le plus faible taux de minéralisation. La présence de haies entraîne donc, sur les mailles de bas de versant, une augmentation de la quantité d'azote prélevée dans la nappe. Cette augmentation des prélèvements en présence de haie est en partie compensée par une diminution de la dénitrification. En bas de versant, le calcul des pertes relatives, montre cependant une augmentation de l'efficacité du double couvert à réduire la teneur en azote de la nappe. Au contraire, sur les sols drainants, les pertes relatives étant plus importantes en présence de haies, l'efficacité des prélèvements diminue.

En bas de versant, les prélèvements par la haie étant plus importants, les restitutions lors de la chute des feuilles sont donc plus fortes. Ceci entraîne une diminution plus faible des pertes en azote de l'humus. Cette diminution est par contre plus importante en haut de versant en valeur relative due à un taux de minéralisation plus faible.

Position sur le versant	Avec haies			Mêmes mailles sans haie			Diminutions par rapport aux mailles sans haie		
	RH	RI	RD	RH	RI	RD	RH	RI	RD
Prélèvement des mailles	28.6	24.6	23.9	27.6	26.7	26.5	-1.0 (-3.9 %)	2.1 (7.9 %)	2.6 (9.8 %)
Prélèvement de la haie	18.4	14.2	14.0				-	-	-
Prélèvement de la culture	24.5	21.9	21.1	27.6	26.7	26.5	3.1 (11.2 %)	4.9 (18.2 %)	5.4 (20.2 %)
Dénitrification	4.4	1.4	1.4	6.0	2.4	2.5	1.6 (27.3 %)	1.0 (42.2 %)	1.1 (45.5 %)
Perte en azote de l'humus	7.0	1.6	0.4	8.6	2.7	1.5	1.6 (18.6 %)	1.1 (40.7 %)	1.1 (72.8 %)
Minéralisation nette	19.6	12.2	11.0	21.9	14.7	13.8	2.2 (10.2 %)	2.5 (17.1 %)	2.8 (20.3 %)
Pertes relatives (%)	-1.2	23.7	24.8	8.7	24.4	23.8	9.8	0.7	-1

Tableau 5.6 – Valeurs moyennes annuelles ( $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ) du prélèvement racinaire en azote des mailles double couvert, de la haie, et de la culture, valeurs moyennes annuelles ( $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ) de la dénitrification, de la perte en azote de l'humus et de la minéralisation nette, sur les mailles double couvert et sur les mêmes mailles sans haie ; diminutions absolue et relative de toutes ces variables, entre les deux types de maille, en fonction de la position du réseau bocager (RD, RI, et RH).

A l'échelle du bassin versant, la position du réseau de haie (RH, RI et RD) semble avoir un effet plus important sur les flux d'azote que sur les flux d'eau (tableau Tableau 5.7). Les différences entre le réseau positionné sur les sols hydromorphes et les deux autres réseaux plus hauts dans le versant sont également plus importantes pour l'azote. En effet on observe avec le réseau de bas de versant, des flux d'azote à l'exutoire plus faibles de 2 % par rapport aux deux autres réseaux plus hauts sur le bassin versant. Cette diminution, en bas de versant, est le résultat d'un prélèvement plus important de la haie, d'une diminution de la compétition avec les cultures et d'une diminution de la

minéralisation nette. Ces processus compensent favorablement la diminution de la dénitrification avec le réseau de bas de versant. Enfin l'augmentation des prélèvements et la diminution de la minéralisation nette en bas de versant, entraînent une diminution des pertes en azote de l'humus.

	Valeurs absolues				Différences relatives (%)		
	Sans haie	RH	RI	RD	RH	RI	RD
Flux d'azote à l'exutoire	5.8	5.5	5.6	5.7	4.1	2.2	2
Dénitrification	3.6	3.5	3.5	3.5	2.8	1.9	2
Minéralisation nette	14.8	14.6	14.6	14.6	0.8	0.9	1
Perte en azote de l'humus	5	4.9	5	5	17	1.1	1.1

Tableau 5.7 - Valeurs à l'échelle du bassin versant (en  $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ) et différences relatives par rapport à un bassin versant sans haie, des flux d'azote à l'exutoire, de la dénitrification, de la minéralisation nette et des pertes en azote de l'humus, dans le cas des réseaux bocagers RH, RI et RD.

#### 5.3.4 Effet du type d'association haie-culture.

Les trois types d'associations, haie-prairie pâturée, haie-blé et haie-maïs (présentés dans le chapitre 4.2.5.2), ont été repris ici. Seul le schéma ZIE est présenté ici. Les résultats obtenus avec le schéma ZIR sont présentés dans l'annexe 5.

La figure Figure 5.17 montre que pour les PMTN inférieures à 1m, les prélèvements d'azote (haie plus culture) de la zone mixte sont supérieurs à ceux de la zone de culture seule. Cette augmentation des prélèvements est la conséquence d'une faible compétition entre les deux couverts en bas de versant. Pour les PMTN plus élevées, les prélèvements dans la zone mixte (haie plus blé, haie plus prairie, haie plus maïs) sont équivalents aux prélèvements du blé seul et inférieurs aux prélèvements de la prairie seule et du maïs seul. Pour l'association avec le blé, cela implique que la diminution des prélèvements par le blé dans la zone mixte est compensée par les prélèvements de la haie. Au contraire, pour les deux autres d'associations, la diminution des prélèvements par la prairie ou le maïs n'est pas totalement compensée par les prélèvements de la haie. Cette meilleure complémentarité entre la haie et le blé par rapport aux deux autres cultures, est la conséquence du décalage dans le temps entre les périodes de prélèvements d'azote des deux couverts.

### 5.3 Application de la nouvelle maille double couvert.

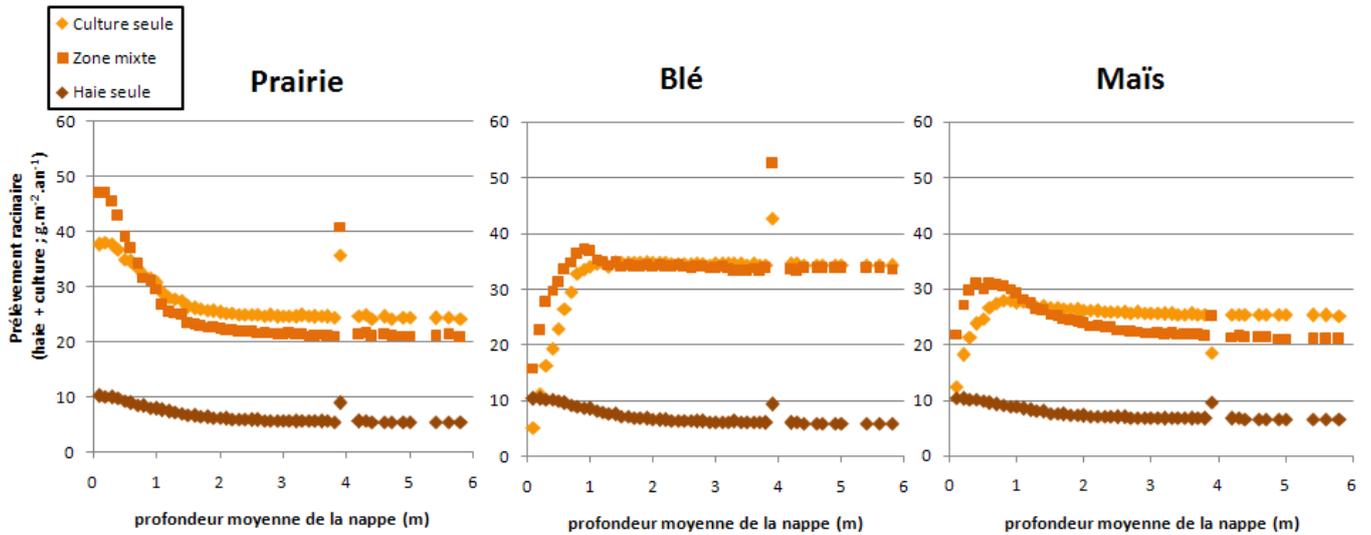


Figure 5.17 – Prélèvement racinaire (haie et/ou culture) pour les trois zones des mailles double couvert, pour les différents types d'association, en fonction de la PMTN.

Dans la zone mixte, le taux de dénitrification est inférieur au taux de dénitrification de la zone de culture seule quel que soit le type d'association. De plus, pour les trois types d'association, la différence entre ces deux zones est équivalente (figure Figure 5.18).

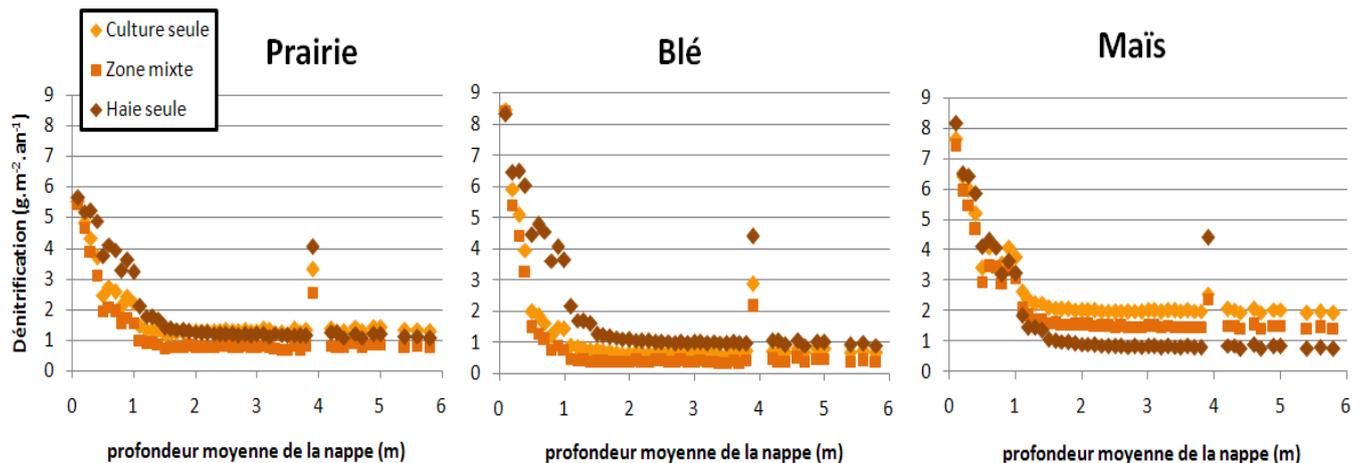


Figure 5.18 - Dénitrification pour les trois zones des mailles double couvert, pour les différents types d'association, en fonction de la PMTN.

Les différences du taux de minéralisation nette entre la zone mixte et la zone de culture seule sont au contraire très variables pour les trois types d'associations (figure Figure 5.19). En effet on observe qu'elles sont plus faibles pour l'association haie-maïs, intermédiaire pour l'association haie-prairie et plus importantes pour l'association haie-blé. Ces différences sont liées aux teneurs en eau moyennes de la réserve utile (chapitre 4.2.5.2).

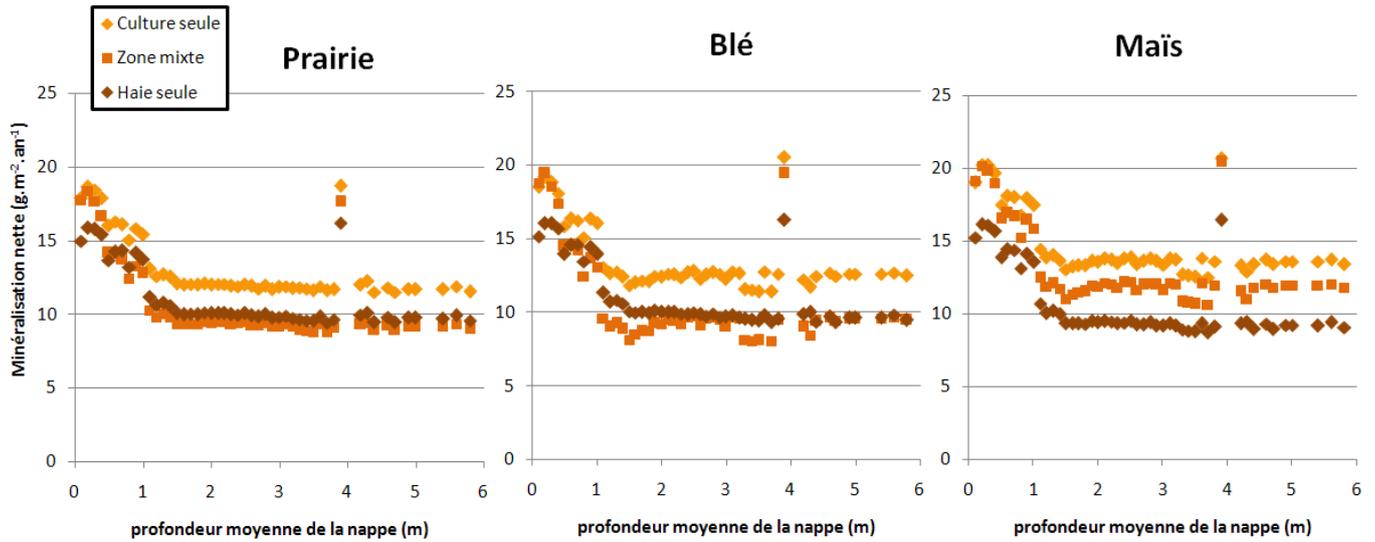


Figure 5.19 - Minéralisation nette pour les trois zones des mailles double couvert, pour les différents types d'association, en fonction de la PMTN.

Pour l'association avec le blé, les différences de prélèvements d'azote, de dénitrification et de minéralisation nette entraînent une diminution de la teneur en azote de la réserve utile dans la zone mixte par rapport à la zone de blé seule (figure Figure 5.20). Pour les PMTN supérieures à 1 m, les prélèvements étant équivalents entre les deux zones, c'est la diminution de la minéralisation nette qui l'emporte sur la diminution de la dénitrification. Pour les associations avec la prairie et le maïs, et pour les PMTN respectivement supérieures à 0.5 et 2 m, la teneur en azote de la réserve utile dans la zone mixte est supérieure à celle de la zone de culture seule. Pour ces deux types d'association, et aux PMTN élevées, la diminution de la dénitrification et des prélèvements de la culture et de la haie dans la zone mixte n'est pas compensée par la diminution de la minéralisation nette. La teneur en azote de la réserve utile de la zone de haie seule pour les PMTN supérieures à 1 m est globalement la même quel que soit le type de culture associé.

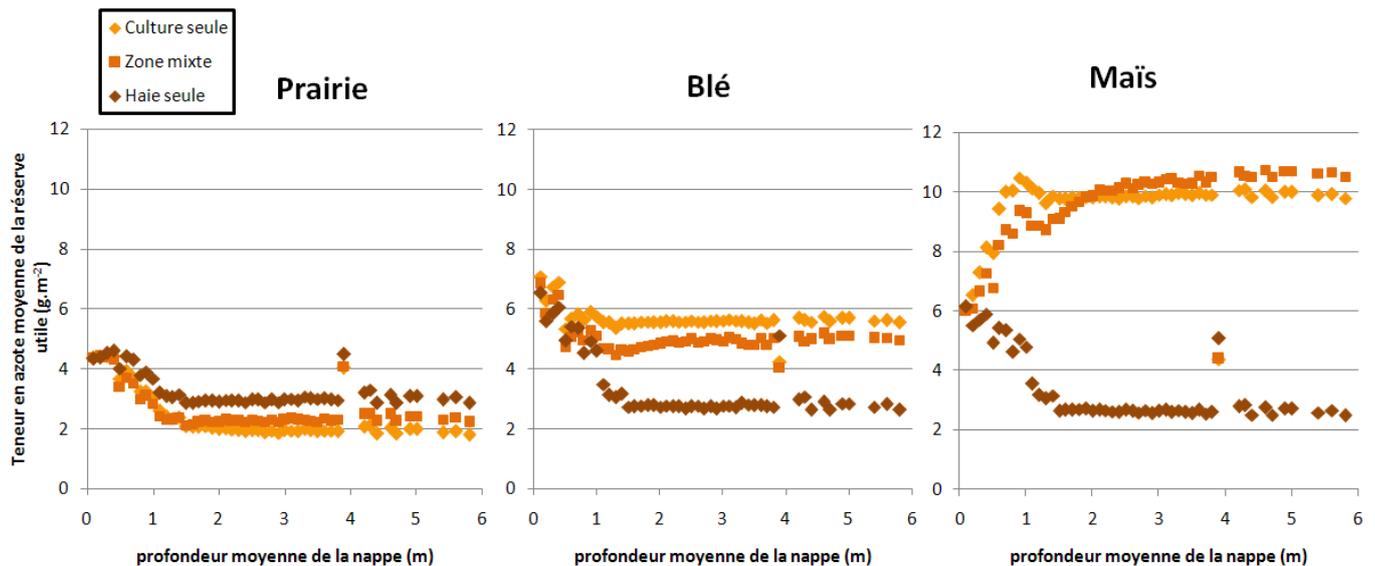


Figure 5.20 – Teneur en azote moyenne de la réserve utile pour les trois zones des mailles double couvert, pour les différents types d'association, en fonction de la PMTN.

### 5.3 Application de la nouvelle maille double couvert.

Au final, pour les mailles double couvert associées à des PMTN supérieures à 1 m, la diminution relative de la teneur en azote de la réserve utile en présence de haie est la plus forte pour une association avec du blé (figure Figure 5.21) liée à la bonne complémentarité des périodes de développement des deux couverts. Vient ensuite l'association avec le maïs, car l'augmentation de la teneur en azote de la réserve utile dans la zone mixte est compensée par de faibles teneurs dans la zone de haie seule. Enfin pour l'association avec la prairie, la teneur en azote tend à augmenter pour des PMTN supérieures à 2 m. En effet pour la prairie les teneurs en azote moyennes de la réserve utile sont déjà très faibles dû à un recyclage efficace de l'azote par ce couvert. Dans le modèle, la teneur en azote de la réserve utile de la zone de prairie seule est d'ailleurs plus faible que celle de la zone de haie seule. Cela s'explique également par l'activité racinaire permanente de la prairie tout au long de l'année contrairement aux arbres de la haie.

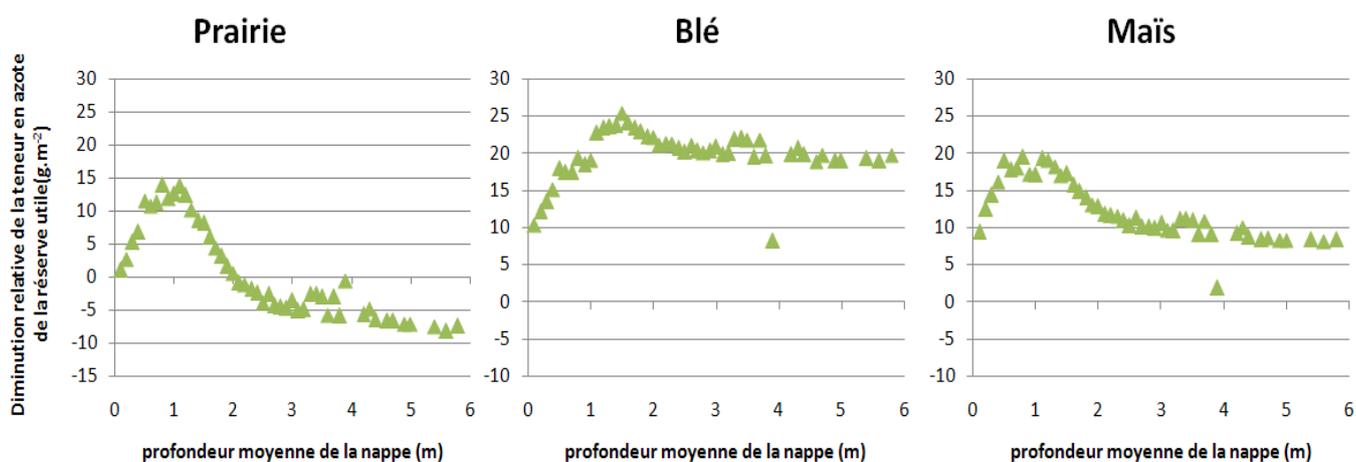


Figure 5.21 – Diminution relative moyenne de la teneur en azote de la réserve utile des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haie, pour les différents types d'association et en fonction de la PMTN.

Il convient de préciser que ces résultats dépendent de la largeur de la zone de haie seule qui est un paramètre du modèle.

## 5.4 Discussion et Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit et testé une nouvelle modification du modèle TNT2, en discrétisant latéralement les couches de sol des mailles double couvert selon trois zones : une zone de haie seule, d'interaction haie-culture, et de culture seule. Cela a permis de simuler les processus affectant les termes du bilan d'eau et d'azote de chaque zone de manière plus fine. Ce nouveau schéma de modélisation modifie certaines conclusions du chapitre précédent :

Dans les mailles double couvert, pour les PMTN supérieures à 1 m, les valeurs simulées de la teneur en azote moyenne de la réserve utile sont globalement plus faibles avec ce nouveau schéma de modélisation par rapport à celui de la version précédente (chapitre 4.3.3.1). Lorsque les couches de sol étaient homogènes, les apports d'intrants anthropiques étaient répartis sur toute la maille et donc « dilués » dans un plus grand volume de sol que dans le nouveau schéma où la zone de haie seule ne reçoit pas ces apports. Les cultures sont paramétrées pour avoir des prélèvements maximums qui peuvent atteindre 30 à 40  $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  selon l'espèce, alors que la haie a été paramétrée pour avoir un prélèvement maximum de 22  $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ . Avec la version précédente du modèle, les prélèvements par la culture étaient restreints à chaque pas de temps par le ratio de sa surface dans la maille double couvert. Cette diminution des prélèvements par la culture était alors moins compensée par ceux de la haie que dans le nouveau schéma de modélisation.

Pour les PMTN supérieures à 1 m, la teneur en azote de la réserve utile des mailles double couvert est donc plus faible que celle des mêmes mailles sans haie. Ceci est dû premièrement à une diminution des apports d'intrants, et deuxièmement à une diminution de la minéralisation nette liée à une teneur en eau du sol plus faible dans la zone d'interaction haie-culture. Cette diminution de la minéralisation est plus importante que la diminution de la dénitrification et la diminution éventuelle des prélèvements en azote des deux couverts dans la zone d'interaction dans le cas des associations haie-prairie et haie-maïs.

A l'échelle du bassin versant, les haies positionnées en bas de versant ont un effet plus important sur la rétention de l'azote et sur les débits à l'exutoire. La présence d'un réseau bocager de 24  $\text{m.ha}^{-1}$  dans les zones de bas de versant montre une efficacité de rétention d'azote quasiment équivalente au réseau bocager de 48  $\text{m.ha}^{-1}$  réparti sur tout le bassin versant. En effet, pour ces deux réseaux la diminution des flux d'azote à l'exutoire liée à la présence des haies est respectivement de 4.1 et 5.1 %, soit une différence de 1 % pour un réseau deux fois moins long. Cela s'explique par le fait qu'en haut et en bas de versant la présence des haies diminue le lessivage de l'azote, auquel s'ajoute en bas de versant seulement un prélèvement de l'azote de la nappe accessible aux racines des arbres.

Cependant, pour des PMTN élevées, au niveau de la zone d'interaction haie-culture des mailles double couvert, cette version du modèle ne simule toujours pas l'augmentation des prélèvements décrite dans la littérature (Allen et al., 2004; Lehmann et al., 1998b; Seyfried and Rao, 1991; van Noordwijk et al., 1996). La principale raison peut être liée à la structure du modèle. En effet le prélèvement racinaire ne peut s'effectuer que dans le réservoir « sol » dont l'épaisseur a été paramétrée à 0,8 m. La méthode utilisée pour simuler des prélèvements à des profondeurs de sol plus importantes a été d'augmenter les remontées capillaires. Cependant, cette méthode a ces limites pour des profondeurs de nappe élevées. En effet, le taux des remontées capillaires est très faible pour des PMTN supérieures à 1,5 m, voire quasiment nul pour des PMTN supérieures à 2,5 m

(figure Figure 5.22). Or, il n'est pas rare en haut de versant que la profondeur de nappe soit supérieure à 2,5 m. notamment durant la période estivale. Dans ce cas, le modèle ne simule pas de prélèvement en profondeur pour les arbres. On peut donc penser que l'effet du réseau bocager sur les prélèvements en eau et en azote est sous-estimé avec l'augmentation de la PMTN. De plus, le paramétrage utilisé pour la haie (assimilée à une rangée de chêne) fixant les prélèvements maximums à  $22 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$  peut-être sous-estimé. En effet, ce chiffre issu de la littérature a été mesuré dans le cas de forêts alluviales et pourrait être plus important dans le cas d'une haie associée à des cultures fertilisées. De même la capacité de prélèvements en azote des arbres étant fonction du type d'essence (Rowe et al., 1998), les résultats sont dépendant des espèces composant la haie.

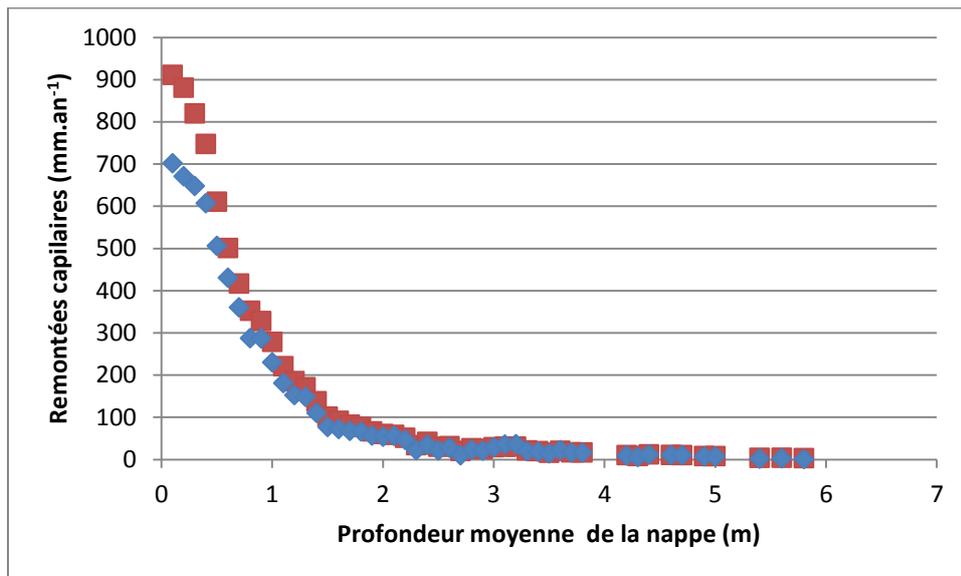


Figure 5.22 – Remontées capillaires annuelles moyennes, selon la PMTN, pour les mailles double couvert (carrés), ainsi que pour les mêmes mailles en absence de haie (losanges).

La discrétisation latérale de la couche de sol a été réalisée de deux manières : dans le schéma ZIR, la zone d'interaction entre la haie et la culture ne dépasse pas la limite de la canopée, tandis que pour le schéma ZIE elle s'étend au-delà de la limite de canopée. Dans chaque cas, les prélèvements en eau et en azote de la haie par unité de surface étant fonction de l'extension du système racinaire. Les différences entre ces deux schémas ont montré l'importance de l'extension latérale de la zone d'influence racinaire de la haie sur les interactions avec la culture associée, et sur la capacité de prélèvement des intrants dédiés à la culture.

Le système racinaire des arbres possède en outre une certaine plasticité qui lui permet d'augmenter sa densité racinaire en profondeur et donc de favoriser les prélèvements dans les couches plus profondes diminuant ainsi la compétition avec la culture associée (Rowe et al., 1998; Schroth, 1998). D'un autre côté, Smith et al. (1999) montrent que la complémentarité des deux systèmes racinaires le long du profil de sol, qui réduit la compétition entre la culture et les arbres en agroforesterie, est remise en cause lorsque les sols sont peu épais et que la profondeur de la nappe est importante. Dans ce contexte, les arbres ne disposent que d'une faible ressource en eau en profondeur et vont donc favoriser le développement de leur système racinaire dans les horizons de surface. La compétition pour l'eau de pluie stockée dans ces horizons est donc plus forte entraînant ainsi une forte diminution de la croissance de la culture associée et une diminution des rendements, en particulier lorsque les précipitations sont faibles (Smith et al., 1999).

Les simulations avec le schéma ZIE montrent que le déficit hydrique est plus faible dans la zone de haie seule que dans la zone de culture seule. Cependant ces résultats ne correspondent pas aux observations sur le terrain, car la haie n'est jamais vraiment composée seulement d'arbres mais comprend aussi une strate végétale sous la canopée qui augmente le déficit hydrique.

Sur les trois schémas de modélisation que nous avons testés, la version la plus réaliste semble être celle du schéma ZIE. D'un point de vue technique, la discrétisation des couches n'entraîne pas d'augmentation du nombre de variables mais augmente les temps de calculs d'environ 25 à 35 % (dans l'état actuel du modèle) en fonction de la densité de haie sur le bassin versant. Néanmoins cette discrétisation permettrait vraisemblablement d'obtenir des résultats plus stables dans le cas où l'on souhaiterait modifier la taille des mailles.



## Conclusion Générale

Les haies ont un effet direct ou indirect sur le cycle de l'eau et de l'azote à différentes échelles. Localement, les arbres ont un impact direct sur la teneur en eau et azote du sol par leurs prélèvements ou les restitutions, mais ont également un impact indirect par la modification des conditions physiques et géochimiques du sol. En modifiant l'état d'humidité et la teneur en carbone du sol, les haies influencent des processus tels que la minéralisation de la matière organique et la dénitrification qui interviennent dans le cycle de l'azote. Les haies influencent le développement des cultures qui leur sont associées, et donc leurs prélèvements en eau et en azote. Enfin, l'action de l'homme sur les haies au travers des tailles d'entretien va modifier les différentes interactions de la haie avec le sol et les cultures.

Le suivi expérimental du site de Pleine Fougères montre que le fonctionnement hydrique du sol varie en fonction de la proximité de la haie, de sa composition, de son entretien et de sa position sur le versant. Les arbres de la haie se différencient des autres types de végétation par un prélèvement d'eau plus important en profondeur. L'entretien des haies semble diminuer ces prélèvements, ce qui se traduit au cours de l'année par une moindre variation du stock d'eau en profondeur.

A proximité des haies un retard de réhumectation à la reprise des écoulements en automne est observé. Il est attribué à un dessèchement local plus important des sols en été et à l'interception d'une partie des précipitations par le houppier de l'arbre. Au printemps, le dessèchement des sols à proximité des haies est plus tardif ce qui s'explique par une reprise d'activité des arbres moins rapide que pour un couvert herbacé et par un effet d'ombrage.

La position de la haie sur le versant a son importance dans la dynamique hydrique locale du sol. Cette influence est d'abord liée à l'épaisseur variable des horizons de sol à l'amont de la haie selon sa position. Sur le site de Pleine Fougères le sol plus épais à l'amont de la haie de bas de versant entraîne une augmentation de la réserve utile autorisant donc de plus fortes variations de la teneur en eau. De plus, la proximité de la nappe en bas de versant tamponne le dessèchement du sol en profondeur qui est moins important que pour les haies plus hautes dans le versant. Cette proximité de la nappe, qui favorise les remontées capillaires à travers le sol jusqu'aux horizons de surface, fournit à la haie une réserve d'eau supplémentaire.

Le suivi piézométrique du site de Pleine Fougères tend à conclure à un effet différent des haies sur la dynamique de recharge de la nappe selon leur position sur le versant. Cependant, il paraît difficile de distinguer quelle est la part de la haie dans cette dynamique et quelle est la part de la structure géologique du versant, très complexe sur ce site. Ces résultats sont encore à consolider du fait des variabilités pédologiques, climatiques et paysagères, qui rendent les interprétations difficiles. De plus le manque de répliques à chaque niveau du versant, ainsi que l'étude d'une seule année de mesure, ne permettent pas de généraliser nos observations.

Cependant, ces observations sur le site d'étude et les connaissances acquises à travers la bibliographie, ont permis de poser de nouvelles hypothèses sur le fonctionnement hydrologique des haies et sur l'effet de la haie sur la qualité des eaux à une échelle cohérente qui est celle du bassin versant. La modélisation semble être l'outil le plus adapté pour l'étude de l'effet d'un réseau bocager sur le cycle de l'eau et de l'azote à cette échelle. Un nouveau module de fonctionnement de la haie a

donc été introduit dans le modèle agro-hydrologique TNT2, afin d'étudier les conséquences de la présence de la répartition spatiale et de la gestion d'un réseau bocager sur un petit bassin versant. Sur le plan de la modélisation, trois apports ont été fait :

- Le concept de maille double couvert, qui a permis de prendre en compte de manière fine le réseau bocager d'un bassin versant, ses interactions avec les cultures, ainsi que l'effet de son entretien. L'introduction d'une maille double couvert permettra également par la suite de modéliser les bassins versants avec un maillage indépendant de la longueur du linéaire de haie et de leur zone d'influence.
- La modification des écoulements en fonction du gradient hydraulique de la nappe. Cette modification a permis de pouvoir prendre en compte les gradients inverses par rapport à la topographie.
- Un nouveau schéma de discrétisation qui a permis d'affiner les résultats

Dans une maille double couvert, les résultats de simulations montrent que l'effet de la haie sur le bilan d'eau et d'azote est fonction de sa position sur le bassin versant et de la culture qui lui est associée. A condition climatique équivalente la profondeur moyenne de la nappe ou plutôt l'intensité des remontées capillaires a un effet important sur la majorité des processus influencés par la haie.

Les ressources en eau et en azote à quantité d'intrant équivalent sont fonction de la proximité de la nappe et de l'intensité des remontées capillaires. En bas de versant les besoins des couverts végétaux sont globalement satisfaits, notamment par un apport de la nappe. La compétition pour les ressources en eau et en azote entre la haie et la culture associée est donc faible. Avec l'augmentation de la profondeur de la nappe, les ressources diminuent, la compétition entre la haie et la culture augmente, et le prélèvement de chacun de ces deux couverts est réduit. Dans le contexte agricole, où la disponibilité en azote est moins limitante que la disponibilité en eau, la compétition entre la haie et la culture associée se fait principalement par les prélèvements en eau. Le type de culture associé à la haie a son importance sur le rapport de compétition entre les deux couverts. Les périodes d'activité de la haie et de la culture associée, ainsi que les dates d'apports des intrants, vont influencer premièrement la croissance de la culture et deuxièmement la part des intrants qui va être prélevée par la haie. La pratique de la taille d'entretien va de plus modifier les interactions de compétition en haut de versant et les prélèvements dans la nappe en bas de versant. De même la forme du système racinaire va avoir son importance dans les interactions de compétition en haut de versant.

A l'échelle du bassin versant la présence de la haie va entraîner une augmentation de la profondeur moyenne de la nappe et du déficit moyen en eau du sol. Cet effet sur la nappe et sur la teneur en eau du sol est vraisemblablement responsable de la diminution du débit simulé à l'exutoire du bassin versant. Cette diminution du débit est d'ailleurs d'autant plus importante que la densité de haie sur le bassin versant est élevée, soit 4,2 % pour le réseau de 1999 (48 m.ha<sup>-1</sup>) et 9 % pour le réseau de 1948 (140 m.ha<sup>-1</sup>). Il y a un fort effet temporel dans la diminution des débits. En effet les réductions des débits en présence de haies sont les plus importantes lors de la reprise des écoulements et lors du tarissement de la nappe. Ces observations pourraient expliquer des défauts de simulations depuis longtemps repérés et devraient permettre de revisiter la dynamique des crues et inondations dans l'Ouest.

L'effet de la haie sur la teneur en eau du sol et sur la nappe a des conséquences sur la dénitrification et sur la minéralisation de la matière organique. La diminution de la dénitrification tend à favoriser la fuite des nitrates vers l'exutoire du bassin versant, tandis que la diminution de la minéralisation tend à favoriser le stockage dans le sol et donc à limiter les pertes.

L'effet hydrologique et hydrochimique des haies résulte donc de la combinaison complexe de processus aux effets parfois opposés. Cependant, à l'échelle du bassin versant, la présence des haies entraîne une diminution des flux d'azote à l'exutoire par rapport à un bassin sans haie. Cette diminution est d'autant plus importante que la densité de haie est élevée et que les haies sont positionnées en bas de versant. Elle est de 12,7 % pour le réseau de 1952 (140 m.ha<sup>-1</sup>), de 5,1 % pour le réseau de 1999 (48 m.ha<sup>-1</sup>) et de 4,1 % pour le réseau fictif de 24 m.ha<sup>-1</sup> positionné uniquement sur les sols hydromorphes. La diminution simulée des flux d'azote à l'exutoire en présence de haies est attribuée à plusieurs facteurs qui sont : une diminution du débit à l'exutoire du bassin versant, une diminution des apports d'intrants liée à la plus faible surface cultivée, une augmentation des prélèvements en azote des mailles double couvert en bas de versant, une diminution de la minéralisation qui favorise le stockage d'azote dans les sols.

Les résultats de simulation montre que dans les bassins versants agricoles, où les flux d'azote dans l'ensemble des compartiments sont élevés, l'épuration naturelle par les haies reste donc marginale avec les densités de réseau bocager actuelles et pour l'essence considéré (chêne). Les travaux effectués en agroforesterie pourraient donner des pistes pour sélectionner les essences les plus efficaces pour les prélèvements en azote et qui limitent la compétition avec les cultures voisines notamment en haut de versant.

En perspective, certaines modifications pourraient être apportée par la suite afin d'améliorer les résultats de simulation :

- La prise en compte de l'interception des précipitations semble être une étape importante.
- De même l'introduction de couches plus profondes pour le développement du système racinaire de la haie permettrait de reproduire plus finement les interactions de compétition avec la culture dans la zone d'interaction. Cependant, le système racinaire des arbres d'une haie est souvent dissymétrique. Cette dissymétrie peut être liée à plusieurs facteurs : la présence d'une pente, la présence d'un talus ou le caractère antiérosif des haies qui engendre la formation d'un épaissement des horizons de sol sur leur partie amont. Cet épaissement des horizons de surface est d'ailleurs sans doute plus important dans le cas d'un réseau bocager où la distance entre les haies est plus grande que dans le cas d'un système agroforestier. A notre connaissance, l'effet de cette dissymétrie sur les interactions avec la culture voisine n'a pas été étudié et le comportement du système haie-culture pourrait être différent de celui d'un système agroforestier classique. La non-prise en compte de la forme du système racinaire, dépendant de nombreuses variables (dynamique de la nappe, précipitations, compétition, pente, caractéristiques des sols) est également une limite du modèle.
- Des études plus précises sur les potentiels de dénitrification au voisinage de la haie ainsi que la prise en compte de l'ammonium dans le modèle permettraient une meilleure estimation du cycle de l'azote. De même la prise en compte de variables micrométéorologiques à proximité de la haie, telle que la température qui a une influence sur les vitesses de

dénitrification et de minéralisation permettrait d'affiner les résultats de simulation. Enfin une représentation plus fine de la continuité, de la densité, et de l'ensemble des essences d'arbres des haies dans le modèle donnerait des résultats plus réalistes.

La quantification de l'effet d'un réseau réel de haies sur le bassin versant de Kervidy-Naizin reste partielle, car le réseau simulé est loin d'être réaliste. Dans le modèle, il n'est en effet représenté actuellement que par une seule essence (Chêne), les haies sont uniformes, de même densité et en bonne santé. Les méthodes actuelles de télédétection apporteraient une contribution importante à travers une représentation du réseau bocager plus fine qui permettrait de considérer une surface de canopée plutôt que des longueurs de linéaire. De plus, si la méthode proposée est transposable à d'autres bassins versants, l'ordre de grandeur des effets peut être modifié en fonction du contexte pédoclimatique et des caractéristiques propres de ces bassins, notamment en termes de géométrie et de substrat géologique.

Bien que la conceptualisation de l'ensemble des connaissances actuelles sur la haie soit difficile, les phénomènes identifiés comme importants par les études de terrain et l'analyse de la littérature sont simulés et leurs variations en fonction des conditions climatiques et topographiques sont cohérentes. Les choix effectués sont donc satisfaisants et remplissent le cahier des charges fixé, à savoir une simulation réaliste des processus majeurs tout en restant simple. Le modèle donne des outils permettant de jauger qualitativement l'influence de la position des haies sur le bassin versant qui peuvent avoir leur importance dans les stratégies de gestion des paysages.

## Bibliographie

- Addy, K.L., Gold, A.J., Groffman, P.M., Jacinthe, P.A., 1999. Ground water nitrate removal in subsoil of forested and mowed riparian buffer zones. *Journal of Environmental Quality* 28.
- Agus, F., Cassel, D.K., Garrity, D.P., 1997. Soil-water and soil physical properties under contour hedgerow systems on sloping oxisols. *Soil & Tillage Research* 40, 185-199.
- Alegre, J.C., Rao, M.R., 1996. Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *Agriculture Ecosystems & Environment* 57.
- Allen, S.C., Jose, S., Nair, P.K.R., Brecke, B.J., Nkedi-Kizza, P., Ramsey, C.L., 2004. Safety-net role of tree roots: evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Forest Ecology and Management* 192.
- Aurousseau, P., 2003. Les flux d'azote et de phosphore provenant des bassins versants de la rade de Brest. Comparaison avec la Bretagne., *Océanis*, 27(2) :137-161.
- Aussenac, G., Levy, G., 1983. Influence of soil drying on the plant water relations and growth of pedunculate oak (*quercus-pedunculata* ehrl) and ash (*fraxinus-excelsior* l). *Annales Des Sciences Forestieres* 40.
- Baffet, M., 1984. Influence de la haie sur l'évolution des caractères physico-chimiques et hydrodynamiques des sols. Thèse, Univ. Limoges.
- Bardel, P., Maillard, J.L., Pichard, P., 2008. L'arbre et la haie. Mémoire et avenir du bocage. Presses universitaires de Rennes.
- Barré, C., 2001. Devenir de l'azote des pissats de vache émis sous prairie pâturée. Thèse de doctorat de l'ENSAR, Rennes, France.
- Baudry, J., Jouin, A., 2003. De la haie aux bocages : organisation dynamique et gestion. INRA Edition, Ministère de l'Ecologie et du Développement durable, Paris.
- Bayala, J., Teklehaimanot, Z., Ouedraogo, S.J., 2004. Fine root distribution of pruned trees and associated crops in a parkland system in Burkina Faso. *Agroforestry Systems* 60, 13-26.
- Bazin, P., Schmutz, T., Renaud, J., 1995. L'entretien courant des haies bocagères : Les grands modèles d'entretien des haies. Paris, IDF (Institut pour le développement forestier).
- Beaujouan, V., Durand, P., Ruiz, L., Aurousseau, P., Cotteret, G., 2002. A hydrological model dedicated to topography-based simulation of nitrogen transfer and transformation: rationale and application to the geomorphology-denitrification relationship. *Hydrological Processes* 16, 493-507.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., Schofield, N., Tagg, A.F., 1984. Testing a physically-based flood forecasting-model (TOPMODEL) for 3 UK catchments. *Journal of Hydrology* 69, 119-143.
- Bocher, E., 2005. Impacts des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager : essai de modélisation spatiale. Application au Bassin versant de Jaudy-Guindy-Bizien (22). Ph.D. thesis, Rennes 2, France.
- Bordenave, P., Oehler, F., Bioteau, T., Turpin, N., Serrand, P., Saint-Cast, P., Le Saos, E., 2005. Application de la modélisation numérique à l'évaluation sur le long terme des effets des pratiques agricoles sur les flux et concentration d'azote dans l'eau et dans l'atmosphère à l'échelle de trois bassins versants d'élevage. *Ingénieries-EAT* 44, 13-36.
- Braud, I., Dantasantonino, A.C., Vauclin, M., Thony, J.L., Ruelle, P., 1995a. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (sispat) development and field verification. *Journal of Hydrology* 166, 213-250.

- Braud, I., Dantasantonino, A.C., Vauclin, M., Thony, J.L., Ruelle, P., 1995b. A simple sol-plante-atmosphere transphere model (SISPAT) developement and field verification. *Journal of Hydrology* 166, 213-250.
- Breda, N., Cochard, H., Dreyer, E., Granier, A., 1993. Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of quercus-petraea and quercus-robur under water-stress. *Annales Des Sciences Forestieres* 50.
- Breda, N., Granier, A., Barataud, F., Moyne, C., 1995. Soil-water dynamics in an oak stand .1. Soil-moisture, water potentials and water-uptake by roots. *Plant and Soil* 172.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18, 309-332.
- Brisson, N., Mary, B., 2002. Stics Version 5.0. Notice concepts et formalismes.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delecolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- Brisson, N.L., F., 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. *Livre Vert du projet CLIMATOR*, 334 pages.
- Burel, F., Baudry, J., 2005. Habitat quality and connectivity in agricultural landscapes: The role of land use systems at various scales in time. *Ecological Indicators* 5, 305-313.
- Buresh, R.J., Tian, G., 1997. Soil improvement by trees in sub-Saharan Africa. *Agroforestry Systems* 38.
- Burgess, S.S.O., Adams, M.A., Turner, N.C., Ong, C.K., 1998. The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia* 115.
- Canadell, J., Jackson, R.B., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E., Schulze, E.D., 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108, 583-595.
- Cann, C., 1990. Transfer of nutrients in a region of intensive animal farming. *Hydrological research basins and the environment*.
- Carnet, C., 1978. Etudes des sols et de leur régime hydrique en région granitique de Bretagne: une approche du rôle du bocage. Thèse Univ. Rennes, U.E.R. Sciences Biologiques, mention Agronomie, 235p.
- Cassel, D.K., Nielsen, D.R., 1986. Field capacity and available water capacity. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*.
- Caubel, V., 2001. Influence de la haie de ceinture de fond de vallee sur les transferts d'eau et de nitrate, Ph.D. thesis, INRA, Rennes, France.
- Caubel, V., Grimaldi, C., Merot, P., Grimaldi, M., 2003. Influence of a hedge surrounding bottomland on seasonal soil-water movement. *Hydrological Processes* 17, 1811-1821.
- Cermak, J., Hruska, J., Martinkova, M., Prax, A., 2000. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. *Plant and Soil* 219.
- Chandrashekara, U.M., 2007. Effects of pruning on radial growth and biomass increment of trees growing in homegardens of Kerala, India. *Agroforestry Systems* 69, 231-237.
- Cheverry, C., 1998. Intensive farming and water quality. *Agriculture intensive et qualite des eaux*.

- Chiatante, D., Scippa, G.S., Iorio, A.d., Sarnataro, M., di Iorio, A., 2001. The stability of trees growing on slope depends upon a particular conformational structure imposed by mechanical stress in their root system. Proceedings International Conference Forest Research: a challenge for an integrated European approach, Thessaloniki, Greece, 27 August-1 September 2001, Volume II.
- Clément, J.C., 2001. Les zones humides de fond de vallée et la régulation des pollutions diffuses. Thèse de l'université de Rennes 1, mention sciences de l'environnement.
- Cole, D.W., Rapp, M., 1981. 6. Elemental cycling in forest ecosystems. Dynamic properties of forest ecosystems.
- Crosbie, R.S., Wilson, B., Hughes, J.D., McCulloch, C., 2007. The upscaling of transpiration from individual trees to areal transpiration in tree belts. *Plant and Soil* 297.
- Crosbie, R.S., Wilson, B., Hughes, J.D., McCulloch, C., King, W.M., 2008. A comparison of the water use of tree belts and pasture in recharge and discharge zones in a saline catchment in the Central West of NSW, Australia. *Agricultural Water Management* 95, 211-223.
- David, T.S., Ferreira, M.I., Cohen, S., Pereira, J.S., David, J.S., 2004. Constraints on transpiration from an evergreen oak tree in southern Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology* 122.
- De Montard, F.X., Rapey, H., Delpy, R., Massey, P., 1998. Competition for light, water and nitrogen in an association of hazel (*Corylus avellana* L.) and cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). *Agroforestry Systems* 43, 135-150.
- De Parcevaux, S., Guyot, G., 1980. Bioclimatologie et aménagement du bocage. *Bull. Tech. Inform. (FRA)* 353-355, 631-656.
- Dejong, E., Kowalchuk, T.E., 1995. The effect of shelterbelts on erosion and soil properties. *Soil Science* 159.
- Droppelmann, K.J., Ephrath, J.E., Berliner, P.R., 2000. Tree/crop complementarity in an arid zone runoff agroforestry system in northern Kenya. *Agroforestry Systems* 50.
- Ducnuigeen, J., Williard, K., Steiner, R.C., 1997. Relative Nutrient requirements of plants suitable for riparian vegetated buffer strips, ICPRB Report Number 97-4. Interstate Commission on the Potomac River Basin, Rockville, MD, p. 34.
- Dupraz, C., Fournier, C., Balvay, Y., Dauzat, M., Pesteur, S., Somorte, V., 1999. Influence de 4 années de culture intercalaire de blé et colza sur la croissance de noyers hybrides en agroforesterie. In *bois et forêts des agriculteurs, Actes du colloque Cemagref INRA*, 95-114.
- Durand, P., 2004. Simulating nitrogen budgets in complex farming systems using INCA: calibration and scenario analyses for the Kervidy catchment (W. France). *Hydrology and Earth System Sciences* 8.
- Durand, P., Akkal, N., Flechard, C., Drouet, J.L., Hamon, Y., Molenat, J., Hassouna, M., Cellier, P., 2010. Nitrogen fluxes and budgets in a NEU C4 site (Kervidy-Naizin, France) with high N surplus: measurements and modelling. 16th Nitrogen Workshop. 3-4 février 2010, Solothurn, CH.
- Eastham, J., Rose, C.W., Cameron, D.M., Rance, S.J., Talsma, T., Charlesedwards, D.A., 1990. Tree pasture interactions at a range of tree densities in an agroforestry experiment .2. water-uptake in relation to rooting patterns. *Australian Journal of Agricultural Research* 41, 697-707.
- Firestone, M.K., 1982. Biological denitrification. Nitrogen in agricultural soils.
- Follain, S., 2005. Effet du réseau bocager sur l'organisation des sols. Redistributions des sols et stockage en carbone organique., Ph.D. thesis, INRA, Rennes, France.
- Follain, S., Walter, C., Legout, A., Lemercier, B., Dutin, G., 2007. Induced effects of hedgerow networks on soil organic carbon storage within an agricultural landscape. *Geoderma* 142, 80-95.

- Forman, R.T.T., Baudry, J., 1984. Hedgerows and hedgerow networks in landscape ecology. *Environmental Management* 8.
- Franco, D., Perelli, M., Scattolin, M., 1996. Buffer strip to protect the Venice lagoon from non point source pollution. In *Proceeding of the International Conference on Buffer Zones, their Processes and Potential in Water Protection*, Heythrop (UK).
- Fustec, E., Lefeuvre, J.C., etColl., 2000. *Fonctions et valeurs des zones humides*. DUNOD, Paris.
- Ghazavi, G., 2008. Quantification spatiale et temporelle de l'impact d'une haie sur les différents termes du bilan hydrique, Ph.D. thesis, INRA, Rennes, France.
- Ghazavi, G., Thomas, Z., Hamon, Y., Marie, J.C., Corson, M., Merot, P., 2008. Hedgerow impacts on soil-water transfer due to rainfall interception and root-water uptake. *Hydrological Processes* 22, 4723-4735.
- Granier, A., 1996. Evaporation des forêts. *C.R. Académie d'Agriculture de France*, 8 : 119-132.
- Granier, A., Loustau, D., Breda, N., 2000. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science* 57.
- Grimaldi, C., Fossey, M., Thomas, Z., Fauvel, Y., Merot, P., 2012. Nitrate attenuation in soil and groundwater under a bottomland tree hedge in an European farming landscape. *Hydrological Processes*.
- Guyot, G., 1997. *Climatologie de l'environnement, De la plante aux écosystèmes*. Masson ed, Paris, 505p.
- Guyot, G., Seguin, B., 1975. Modification of land roughness and resulting microclimatic effects: a field study in Brittany. *Heat and mass transfer in the biosphere*. 1. Transfer processes in the plant environment., 467-478.
- Hall, G.F., 1983. *Pedology and geomorphology. Pedogenesis and Soil Taxonomy*. 1. Concepts and interactions.
- Haycock, N.E., Pinay, G., 1993. Groundwater nitrate dynamics in grass and poplar vegetated riparian buffer strips during the winter. *Journal of Environmental Quality* 22.
- Haynes, R.J., 1986. Uptake and assimilation of mineral nitrogen by plants. *Mineral nitrogen in the plant-soil system*.
- Henault, C., Germon, J.C., 2000. NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *European Journal of Soil Science* 51, 257-270.
- Hillel, D., 1980. *Applications of soil physics. Applications of soil physics.*, 385pp.
- Horton, J.L., Hart, S.C., 1998. Hydraulic lift: a potentially important ecosystem process. *Trends in Ecology & Evolution* 13.
- Houet, T., Hubert-Moy, L., 2006. Modelling and projecting land-use and land-cover changes with a cellular automaton in considering landscape trajectories: an improvement for simulation of plausible future states. *EARSel eProceedings* 5.
- Humbert, J., Najjar, G., 1992. *Influence de la forêt sur le cycle de l'eau En domaine tempéré - Une analyse de la Littérature Francophone*. Université Louis Pasteur, Strasbourg I.
- Imada, S., Yamanaka, N., Tamai, S., 2008. Water table depth affects *Populus alba* fine root growth and whole plant biomass. *Functional Ecology* 22.
- Jackson, N.A., Wallace, J.S., Ong, C.K., 2000. Tree pruning as a means of controlling water use in an agroforestry system in Kenya. *Forest Ecology and Management* 126, 133-148.
- Javelle, A., 2007. *Perceptions de la biodiversité par des agriculteurs sur une zone atelier dunord-est de la Bretagne et évaluation de leur rencontre avec des chercheurs enenvironnement*. UMR 6553, Ecobio. Rennes, Université de Rennes1. PhD: 356.

- Jones, M., Sinclair, E., Grime, V.L., 1998. Effect of tree species and crown pruning on root length and soil water content in semi-arid agroforestry. *Plant and Soil* 201, 197-207.
- Jordan, T.E., Correll, D.L., Weller, D.E., 1993. Nutrient interception by a riparian forest receiving inputs from adjacent cropland. *Journal of Environmental Quality* 22.
- Kiepe, P., 1995. Effect of cassia-siamea hedgerow barriers on soil physical-properties. *Geoderma* 66.
- Kirkby, M., Chorley, R.J., 1988. Throughflow, overlandflow and erosion. *Bulletin of International Association of Scientific hydrology*, 100, 315-339.
- Kozlowski, T.T., Pallardy, S.G., 1997. Physiology of woody plants. *Physiology of woody plants*.
- Kreuzwieser, J., Furniss, S., Rennenberg, H., 2002. Impact of waterlogging on the N-metabolism of flood tolerant and non-tolerant tree species. *Plant Cell and Environment* 25.
- Landsberg, J.J., 1999. Tree water use and its implications in relation to agroforestry systems. In: Landsberg JJ (ed) *The ways trees use water*. RIRDC, Canberra.
- Lawson, T.L., Kang, B.T., 1990. Yield of maize and cowpea in an alley cropping system in relation to available light. *Agricultural and Forest Meteorology* 52.
- Layer, B., 2000. Effet du système haie talus sur l'organisation des horizons et les sock de carbone dans des versants du Massif Armoricaïn, UMR-SAS, Rennes, France.
- Le Bissonnais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J., King, D., 2001. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena*, 46: 207-220.
- Le Caro, Y., 2001. Les usages récréatifs de l'espace agricole : exemple d'enjeux en Ille-et-Vilaine. RESO - Université de Rennes. ESO - UMR 6590, Travaux et documents, 79-84.
- Lehmann, J., Peter, I., Steglich, C., Gebauer, G., Huwe, B., Zech, W., 1998a. Below-ground interactions in dryland agroforestry. *Forest Ecology and Management* 111.
- Lehmann, J., Weigl, D., Droppelmann, K., Huwe, B., Zech, W., 1998b. Nutrient cycling in an agroforestry system with runoff irrigation in Northern Kenya. *Agroforestry Systems* 43.
- Lotfi, A., 2008. Durabilité écologique des paysages agricoles et production de bois, bocage et néobocage, Ph.D. thesis, ECOBIO, Rennes, France.
- Lotfi, A., Javelle, A., Baudry, J., Burel, F., 2010. Interdisciplinary Analysis of Hedgerow Network Landscapes' Sustainability. *Landscape Research* 35, 415-426.
- Lowrance, R., Todd, R., Fail, J., Hendrickson, O., Leonard, R., Asmussen, L., 1984. Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds. *Bioscience* 34.
- Lucot, E., Bruckert, S., 1992. Common oak (*Quercus-Robur*) root-system organization developed without restricting edaphic conditions (colluvial leached brown soil). *Annales Des Sciences Forestieres* 49, 465-479.
- Mary, B., Recous, S., Darwis, D., Robin, D., 1996. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. *Plant and Soil* 181, 71-82.
- Mary, B., Rémy, J., 1979. Essai d'appréciation de la capacité de minéralisation de l'azote des sols de grande culture. I. Signification des cinétiques de minéralisation de la matière organique humifiée. *Annales Agronomiques* 30, 513-527.
- Mayus, M., Van Keulen, H., Stroosnijder, L., 1998. Analysis for dry and wet years with the WIMISA model of tree-crop competition for windbreak systems in the Sahel. *Agroforestry Systems* 43, 203-215.
- McDowell, R.W., Moreau, P., Salmon-Monviola, J., Durand, P., Leterme, P., Merot, P., 2012. Contrasting the definition and spatial management of nitrogen and phosphorus at different scales for improved water quality: New Zealand and France, II international symposium on integrated crop-livestock systems, Porto Alegre.

- Merot, P., 1978. Bocage et eau Tome 1. Le bocage en Bretagne granitique. Une approche de la circulation des eaux., Ph.D. thesis, Université de Rennes,, Rennes, France.
- Merot, P., Arousseau, P., Gascuel-Oudou, C., Durand, P., 2009. Innovative assessment tools to improve water quality and watershed management in farming areas. *Integrated environmental assessment and management* 5, 158-166.
- Merot, P., Bruneau, P., 1993. Sensitivity of bocage landscapes to surfaces run-off - application of the Kirkby index. *Hydrological Processes* 7.
- Merot, P., Reyne, S., 1995. Rôle hydrologique et géochimique des structures linéaires boisées. Et. *Rech. Syst. Agraires Dév.*, 29, 83-100.
- Mette, R., Sattelmacher, B., 1994. Root and nitrogen dynamics in the hedgerow-field interface. Consequences for land use management. In *proceedings of the 7th Inter. Symp. of CIEC; Agroforestry and land use change in industrialized nations*, Berlin, Humboldt University, 275-284.
- Meynier, A., 1970. *Les paysages agraires*, Paris, Armand Colin, 192 p.
- Missonnier, M.J., 1976. *Les bocages, histoire, écologie, économie*. INRA, ENSA, CNRS, Université de Rennes.
- Mobbs, D.C., Crout, N.M.J., Lawson, G.J., Cannell, M.G.R., 1997. Structure and applications of the HyPAR model. *Agroforestry Forum* 8, 10-14.
- Molénat, J., 1999. Rôle de la nappe sur les transferts d'eau et de nitrate dans un bassin versant agricole. Etude expérimentale et modélisation. Thèse Géosciences INRA Rennes, 272p.
- Molénat, J., Gascuel-Oudou, C., 2002. Modelling flow and nitrate transport in groundwater for the prediction of water travel times and of consequences of land use evolution on water quality. *Hydrological Processes* 16, 479-492.
- Molénat, J., Gascuel-Oudou, C., Davy, P., Durand, P., 2005. How to model shallow water-table depth variations: the case of the Kervidy-Naizin catchment, France. *Hydrological Processes* 19, 901-920.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment: the state and movement of water in living organisms. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19, 205-234.
- Mourier, B., Walter, C., Merot, P., 2008. Soil distribution in valleys according to stream order. *Catena* 72.
- Nair, P.K.R., 1990. Classification of Agroforestry Systems. *Agroforestry: Classification and Management*. K. G. MacDicken and N. T. Vergara. New York, John Wiley and Sons: 382.
- Nair, P.K.R., 1993. *An Introduction to Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers.
- Nambiar, E.K.S., Sands, R., 1992. Effects of compaction and simulated root channels in the subsoil on root development, water-uptake and growth of radiata pine. *Tree Physiology* 10.
- Namirembe, S., Brook, R.M., Ong, C.K., 2009. Manipulating phenology and water relations in *Senna spectabilis* in a water limited environment in Kenya. *Agroforestry Systems* 75.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282-290.
- Nicolardot, B., Recous, S., Mary, B., 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C : N ratio of the residues. *Plant and Soil* 228, 83-103.
- Nicolas, E., Torrecillas, A., Dell'Amico, J., Alarcon, J., 2005. The effect of short-term flooding on the sap flow, gas exchange and hydraulic conductivity of young apricot trees. *Trees-Structure and Function* 19.

- Ocallaghan, J.F., Mark, D.M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation model data. *Computer Vision Graphics and Image Processing* 28, 323-344.
- Oehler, F., Bordenave, P., Durand, P., 2007. Variations of denitrification in a farming catchment area. *Agriculture Ecosystems & Environment* 120, 313-324.
- Oehler, F., Durand, P., Bordenave, P., Saadi, Z., Salmon-Monviola, J., 2009. Modelling denitrification at the catchment scale. *Science of the Total Environment* 407, 1726-1737.
- Penka, M., Vyskot, M., Klimo, E., Vasicek, F., 1985. Floodplain forest ecosystem. I. Before water management measures. *Floodplain forest ecosystem. I. Before water management measures.*, 468 pp.
- Pereira, A.R., Green, S., Nova, N.A., 2006. Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. *Agricultural Water Management* 83, 153-161.
- Perret, S., Michellon, R., Boyer, J., Tassin, J., 1996. Soil rehabilitation and erosion control through agro-ecological practices on Reunion Island (French overseas territory, Indian ocean). *Agriculture Ecosystems & Environment* 59.
- Peter, I., Lehmann, J., 2000. Pruning effects on root distribution and nutrient dynamics in an acacia hedgerow planting in northern Kenya. *Agroforestry Systems* 50, 59-75.
- Peterjohn, W.T., Correll, D.L., 1984. Nutrient dynamics in an agricultural watershed - observations on the role of a riparian forest. *Ecology* 65.
- Pihan, J., 1979. Risques climatiques d'érosion hydrique des sols en France. In: Colloque Strasbourg. T. and J. Vogt (eds.). 13-18 pp.
- Pinay, G., Troccaz, O., 1999. Influence de la structure du paysage et des zones humides de bas fond sur les flux d'azote en bassin versant agricole. Rapport finale Bretagne eau pure 2. UMR ECOBIO Université de Rennes 1.
- Quine, T.A., Walling, D.E., Chakela, Q.K., Mandiringana, O.T., Zhang, X., 1999. Rates and patterns of tillage and water erosion on terraces and contour strips: evidence from caesium-137 measurements. *Catena* 36.
- Rambal, S., 1984. Water-balance and pattern of root water-uptake by a quercus-coccifera I evergreen scrub. *Oecologia* 62.
- Ranger, J., Colin-Belgrand, M., nys, C., 1995. Le cycle biogéochimique des éléments majeurs dans les écosystèmes forestiers. Importance dans le fonctionnement des sols. *Etude et gestion des sols*, 2 (2) : 119-134.
- Reddy, K.R., Rao, P.S.C., Jessup, R.E., 1982. The effect of carbon mineralization on denitrification kinetics in mineral and organic soils. *Soil Science Society of America Journal* 46.
- Robertson, W.D., Blowes, D.W., Ptacek, C.J., Cherry, J.A., 2000. Long-term performance of in situ reactive barriers for nitrate remediation. *Ground Water* 38.
- Robinson, D., 1986. Limits to nutrient inflow rates in roots and root systems. *Physiol. Plant.*, 68 : 551-559.
- Rowe, E.C., Hairiah, K., Giller, K.E., Van Noordwijk, M., Cadisch, G., 1998. Testing the safety-net role of hedgerow tree roots by N-15 placement at different soil depths. *Agroforestry Systems* 43.
- Ryszkowski, L., Bartoszewicz, A., Kedziora, A., 1999. Management of matter fluxes by biogeochemical barriers at the agricultural landscape level. *Landscape Ecology* 14.
- Ryszkowski, L., Kedziora, A., 1993. Energy control of matter fluxes through land water ecotones in an agricultural landscape. *Hydrobiologia* 251, 239-248.
- Ryszkowski, L., Kedziora, A., 1995. Modification of the effects of global climate change by plant cover structure in an agricultural landscape. *Geogr. Polonica* 65, 5-34.

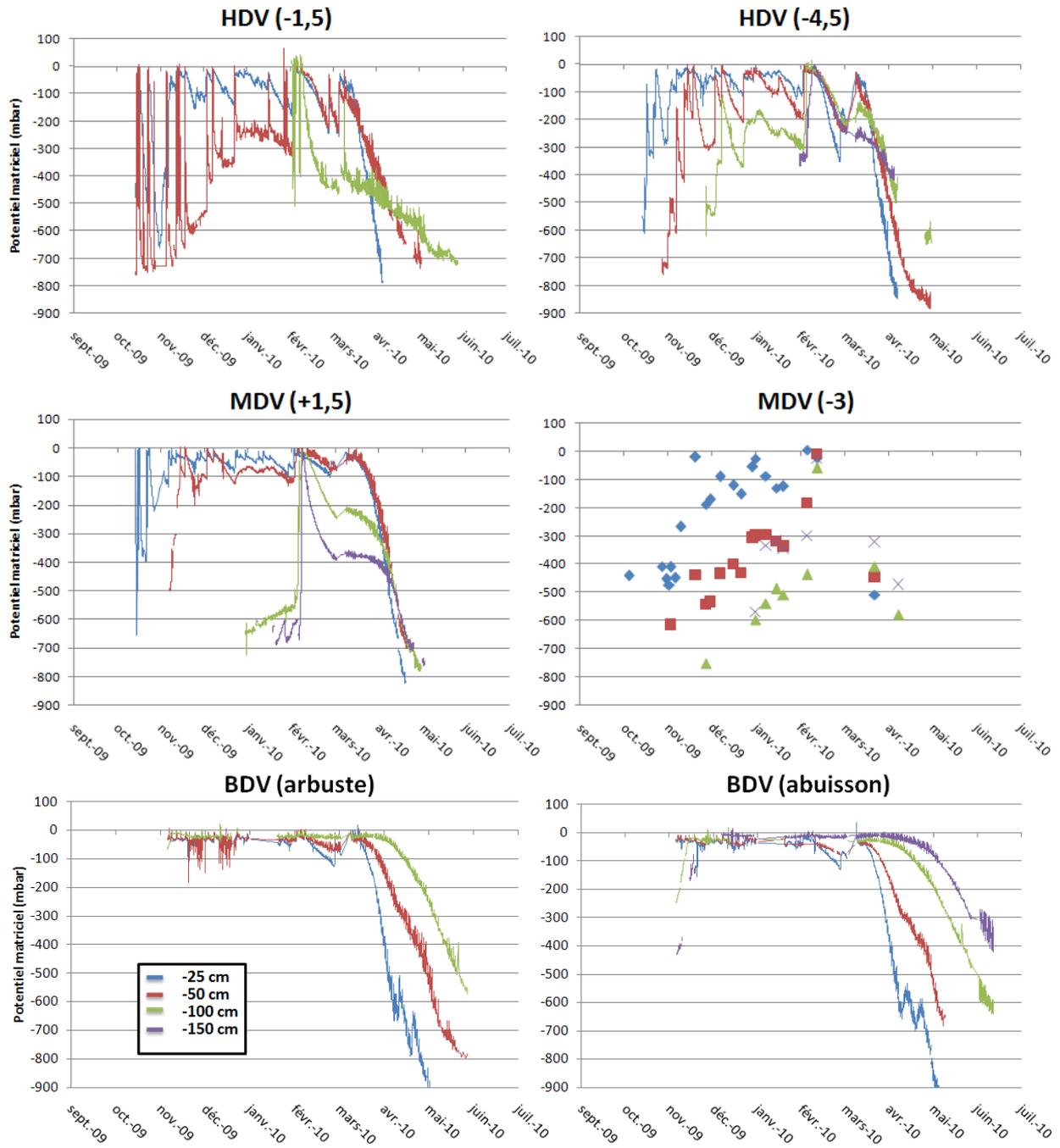
- Ryszkowski, L., Kedziora, A., 2007. Modification of water flows and nitrogen fluxes by shelterbelts. *Ecological Engineering* 29.
- Salmon-Monviola, J., Moreau, P., Benhamou, C., Durand, P., Merot, P., Oehler, F., Gascuel-Oudou, C., 2012. Impact of climate change on water and nitrate cycling in an intensive agricultural headwater catchment (western France). *Climatic Change (soumi)*.
- Sanchez Perez, J.M., Tremolieres, M., Takatert, N., Ackerer, P., Eichhorn, A., Maire, G., 1999. Quantification of nitrate removal by a flooded alluvial zone in the Ill floodplain (Eastern France). *Hydrobiologia* 410.
- Saugier, B., 1996. Evapotranspiration of grasslands and crops. *Comptes Rendus de l'Academie d'Agriculture de France* 82.
- Schroth, G., 1998. A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. *Agroforestry Systems* 43, 5-34.
- Seyfried, M.S., Rao, P.S.C., 1991. Nutrient leaching loss from 2 contrasting cropping systems in the humid tropics. *Tropical Agriculture* 68.
- Simek, M., Cooper, J.E., 2002. The influence of soil pH on denitrification: progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years. *European Journal of Soil Science* 53.
- Smith, D.M., Jackson, N.A., Roberts, J.M., Ong, C.K., 1999. Root distributions in a *Grevillea robusta*-maize agroforestry system in semi-arid Kenya. *Plant and Soil* 211.
- Smith, M.S., Tiedje, J.M., 1979. Effect of roots on soil denitrification. *Soil Science Society of America Journal* 43.
- Smucker, A.J.M., Aiken, R.M., 1992. Dynamic root responses to water deficits. *Soil Science* 154.
- Spruill, T.B., 2000. Statistical evaluation of effects of riparian buffers on nitrate and ground water quality. *Journal of Environmental Quality* 29.
- Sudmeyer, R.A., Hall, D.J.M., Eastham, J., Adams, M.A., 2002. The tree-crop interface: the effects of root pruning in south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 42.
- Sudmeyer, R.A., Speijers, J., Nicholas, B.D., 2004. Root distribution of *Pinus pinaster*, *P. radiata*, *Eucalyptus globulus* and *E. kochii* and associated soil chemistry in agricultural land adjacent to tree lines. *Tree Physiology* 24.
- Takahashi, H., Scott, T.K., 1993. Intensity of hydrostimulation for the induction of root hydrotropism and its sensing by the root cap. *Plant Cell and Environment* 16.
- Takano, M., Takahashi, H., Hirasawa, T., Suge, H., 1995. Hydrotropism in roots - Sensing of a gradient in water potential by the root cap. *Planta* 197.
- Tardieu, F., Bruckler, L., Lafolie, F., 1992. Root clumping may affect the root water potential and the resistance to soil-root water transport. *Plant and Soil* 140.
- Taylor, P.J., Nuberg, I.K., Hatton, T.J., 2001. Enhanced transpiration in response to wind effects at the edge of a blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation. *Tree Physiology* 21.
- Techer, J., 2009. Typologie des haies et caractérisation de l'extension spatiale de leur effet sur les transferts de l'eau. Mémoire de Stage. UMR-SAS, Rennes, France.
- Thenail, C., Baudry, J., 2004. Variation of farm spatial land use pattern according to the structure of the hedgerow network (bocage) landscape: a case study in northeast Brittany. *Agriculture Ecosystems & Environment* 101.
- Thenail, C., Codet, C., 2003. « Système technique de gestion des bordures de champs en exploitation agricole, et intégration des haies nouvelles », Rapport final du projet Bocagement, reconstitution et protection du bocage. Evaluation des politiques publiques de paysagement

- du territoire, coord. Lamarche H., Paris, CNRS, INRA, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable 25 p.
- Thenail, C., Joannon, A., Capitaine, M., Souchere, V., Mignolet, C., Schermann, N., Di Pietro, F., Pons, Y., Gaucherel, C., Viaud, V., Baudry, J., 2009. The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agriculture Ecosystems & Environment* 131.
- Thomas, A., 1966. In situ measurement of moisture in soil and similar substances by fringe capacitance. *Journal of Scientific Instrument* 43, 21-27.
- Thomas, Z., Ghazavi, G., Merot, P., Granier, A., 2012. Modelling and observation of hedgerow transpiration effect on water balance components at the hillslope scale in Brittany. *Hydrological Processes*.
- Thomas, Z., Molenat, J., Caubel, V., Grimaldi, C., Merot, P., 2008. Simulating soil-water movement under a hedgerow surrounding a bottomland reveals the importance of transpiration in water balance. *Hydrological Processes* 22, 577-585.
- Toky, O.P., Bisht, R.P., 1992. Observations on the rooting patterns of some agroforestry trees in an arid region of north-western india. *Agroforestry Systems* 18, 245-263.
- Torquebiau, E.F., 2000. A renewed perspective on agroforestry concepts and classification. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie Iii-Sciences De La Vie-Life Sciences* 323.
- Tsutsumi, D., Kosugi, K., Mizuyama, T., 2005. Three-dimensional modeling of hydrotropism effects on plant root architecture along a hillslope. *Vadose Zone Journal* 3.
- Tuteja, N.K., Beale, G., Dawesc, W., Vaze, J., Murphy, B., Barnett, P., Rancic, A., Evans, R., Geeves, G., Rassam, D.W., Miller, M., 2003. Predicting the effects of landuse change on water and salt balance - a case study of a catchment affected by dryland salinity in NSW, Australia. *Journal of Hydrology* 283, 67-90.
- van der Werf, W., Keesman, K., Burgess, P., Graves, A., Pilbeam, D., Incoll, L.D., Metselaar, K., Mayus, M., Stappers, R., van Keulen, H., Palma, J., Dupraz, C., 2007. Yield-SAFE: A parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems. *Ecological Engineering* 29, 419-433.
- van Noordwijk, M., Lawson, G., Soumare, A., Groot, J.J.R., Hairiah, K., 1996. Root distribution of tree and crop : Competition and / or complementarity. In Ong, C.K. et Huxley, P., éditeurs, *Tree-Crop Interaction*, pages 319-364, Oxon, UK. CAB International Edition.
- Van Noordwijk, M., Lusiana, B., 1998. WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 43, 217-242.
- Vannier, C., 2011. Observation et modélisation spatiale de pratiques agricoles territorialisées à partir de données de télédétection : Application au paysage bocager. Ph.D. thesis, UMR-6554, Rennes, France.
- Vannier, C., Vasseur, C., Hubert-Moy, L., Baudry, J., 2011. Multiscale ecological assessment of remote sensing images. *Landscape Ecology* 26, 1053-1069.
- Viaud, V., 2004. Organisation spatiale des paysages bocagers et flux de'eau et de nutriments. Approche empirique et modélisation. Ph.D. thesis, INRA, Rennes, France.
- Viaud, V., Caubel, V., Grimaldi, C., Baudry, J., Merot, P., 2001. The influence of hedgerow systems on water and pollutant fluxes: from the local to the catchment scale. *Hedgerows of the World: Their Ecological Functions in Different Landscapes*, 281-287.

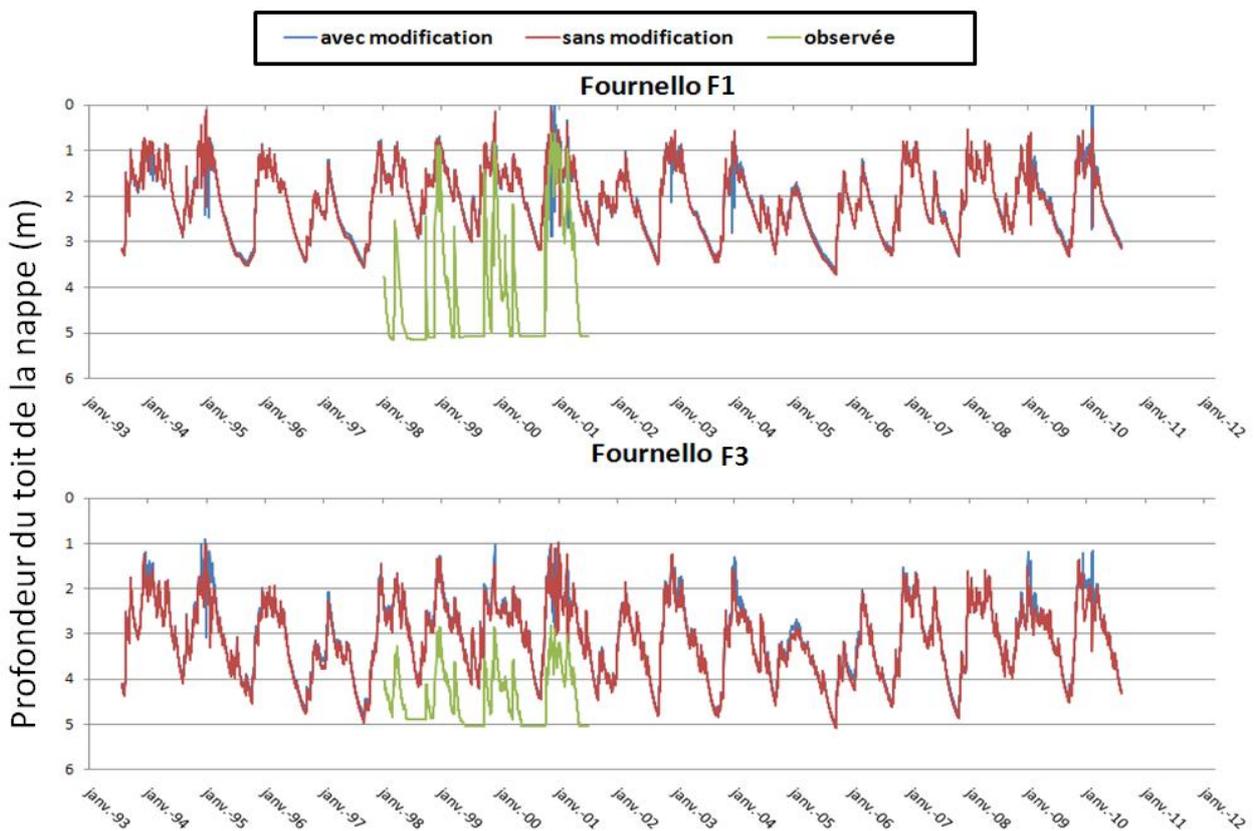
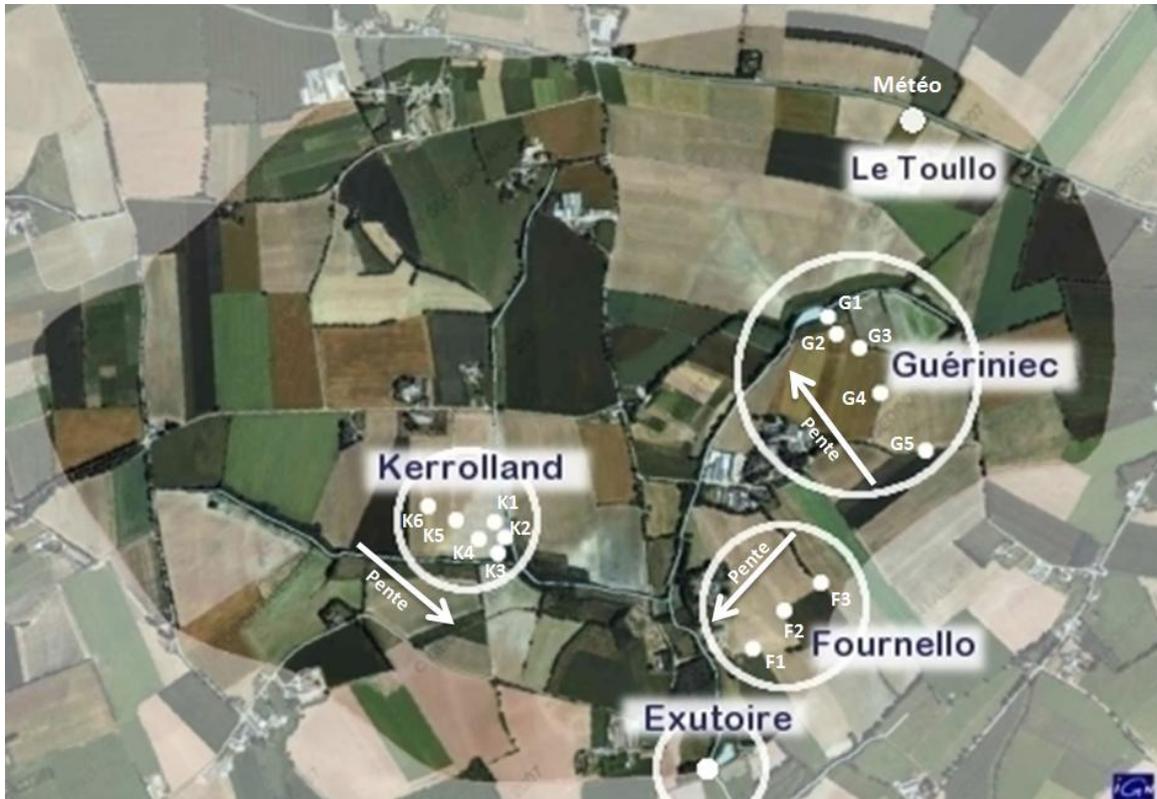
- Viaud, V., Durand, P., Merot, P., Sauboua, E., Saadi, Z., 2005. Modeling the impact of the spatial structure of a hedge network on the hydrology of a small catchment in a temperate climate. *Agricultural Water Management* 74, 135-163.
- Walter, C., Curmi, P., 1998. Les sols du bassin versant du Coët-Dan : organisation, variabilité spatiale et cartographie. In Cheverry C. (ed.). *Agriculture intensive et qualité des eaux*. Science Update: Paris:85-105.
- Walter, C., Merot, P., Layer, B., Dutin, G., 2003. The effect of hedgerows on soil organic carbon storage in hillslopes. *Soil Use and Management* 19, 201-207.
- White, D.A., Dunin, F.X., Turner, N.C., Ward, B.H., Galbraith, J.H., 2002. Water use by contour-planted belts of trees comprised of four Eucalyptus species. *Agricultural Water Management* 53.
- Xiao, Q.F., McPherson, E.G., Ustin, S.L., Grismer, M.E., Simpson, J.R., 2000. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. *Hydrological Processes* 14.
- Zencich, S.J., Froend, R.H., Turner, J.V., Gailitis, V., 2002. Influence of groundwater depth on the seasonal sources of water accessed by Banksia tree species on a shallow, sandy coastal aquifer. *Oecologia* 131.
- Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37, 701-708.

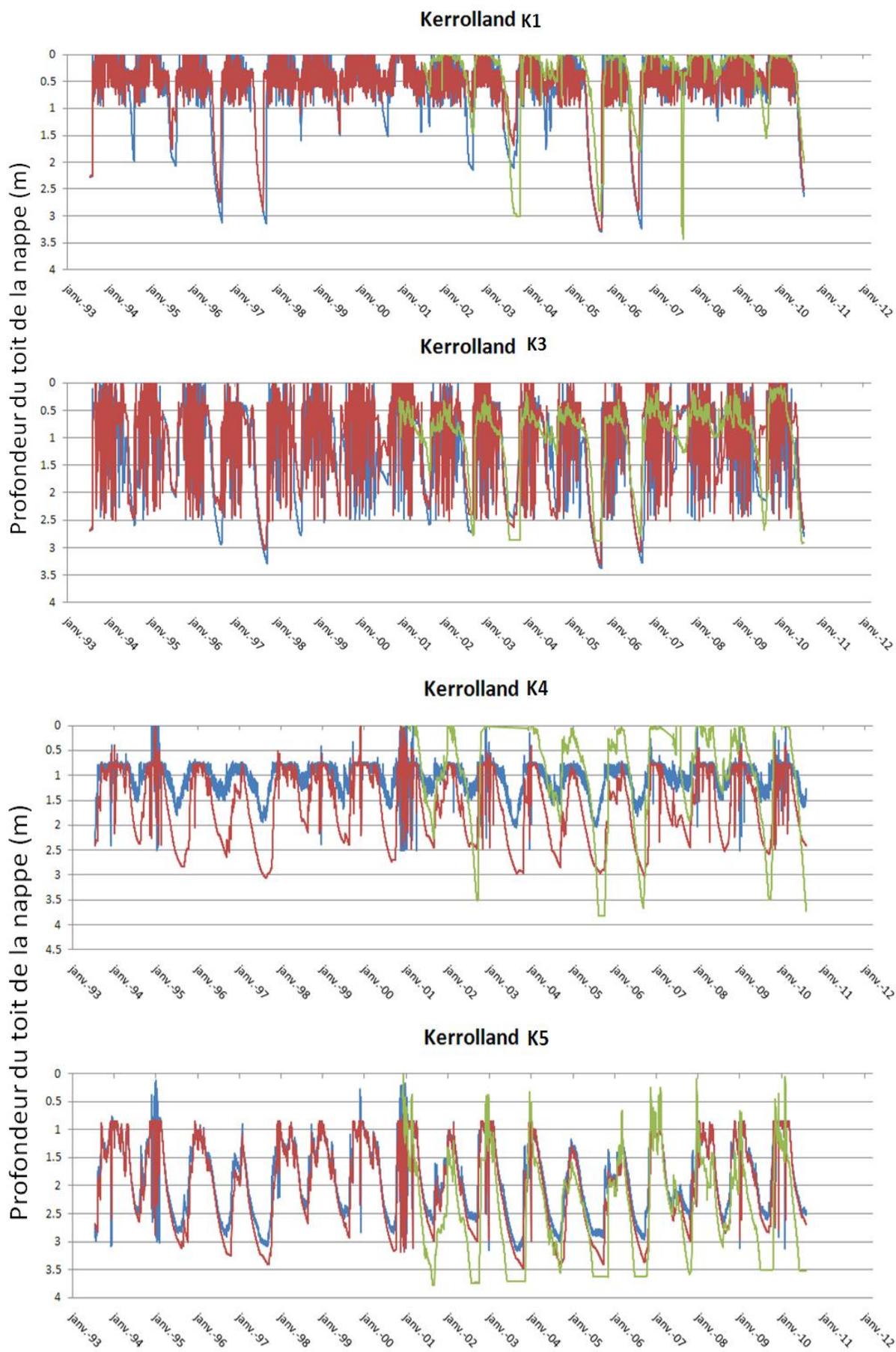
## Annexe

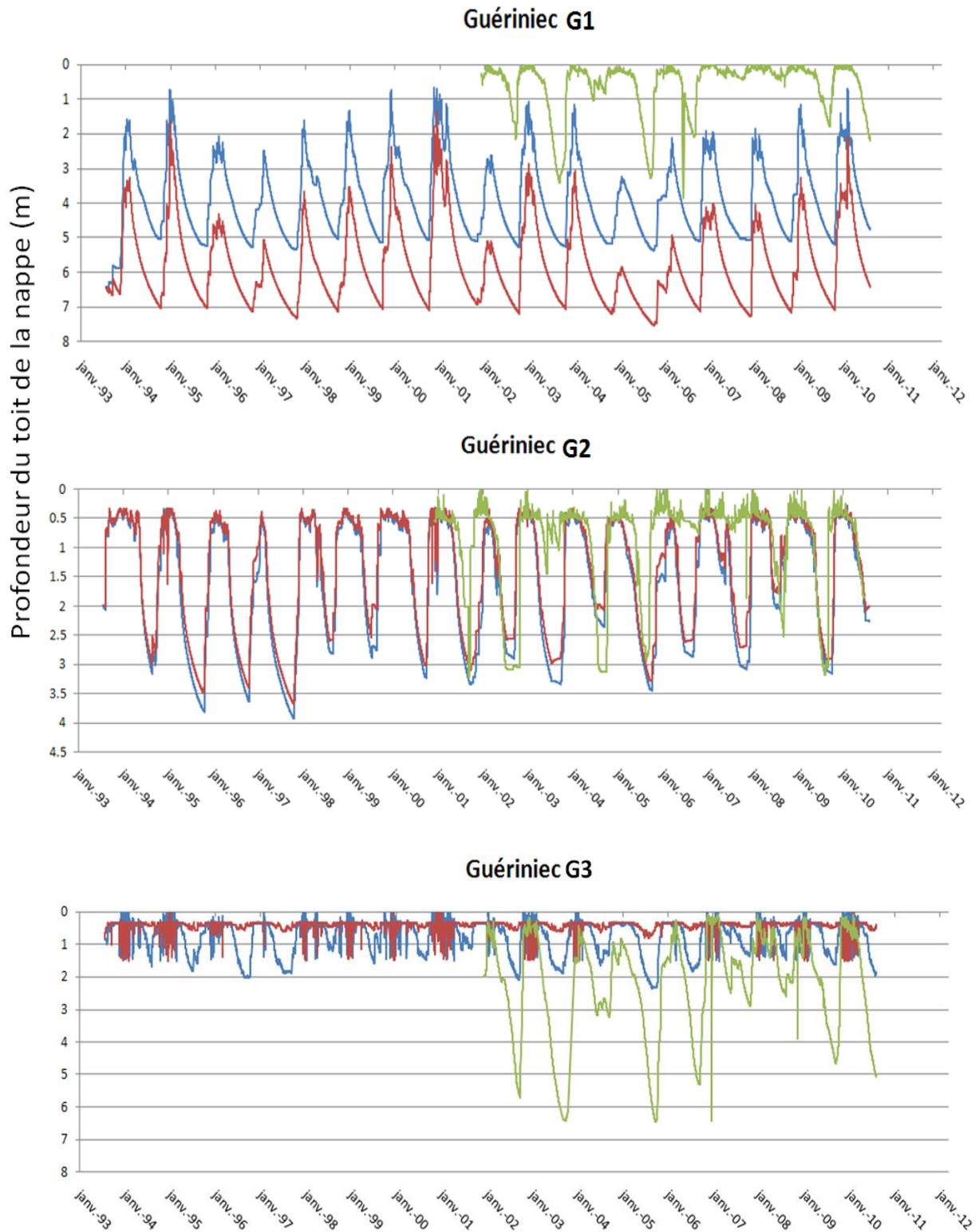
### 1- Chronique de potentiel matriciel à différentes position sur le site expérimental de Pleine Fougères (chapitre 2.5.3.1)

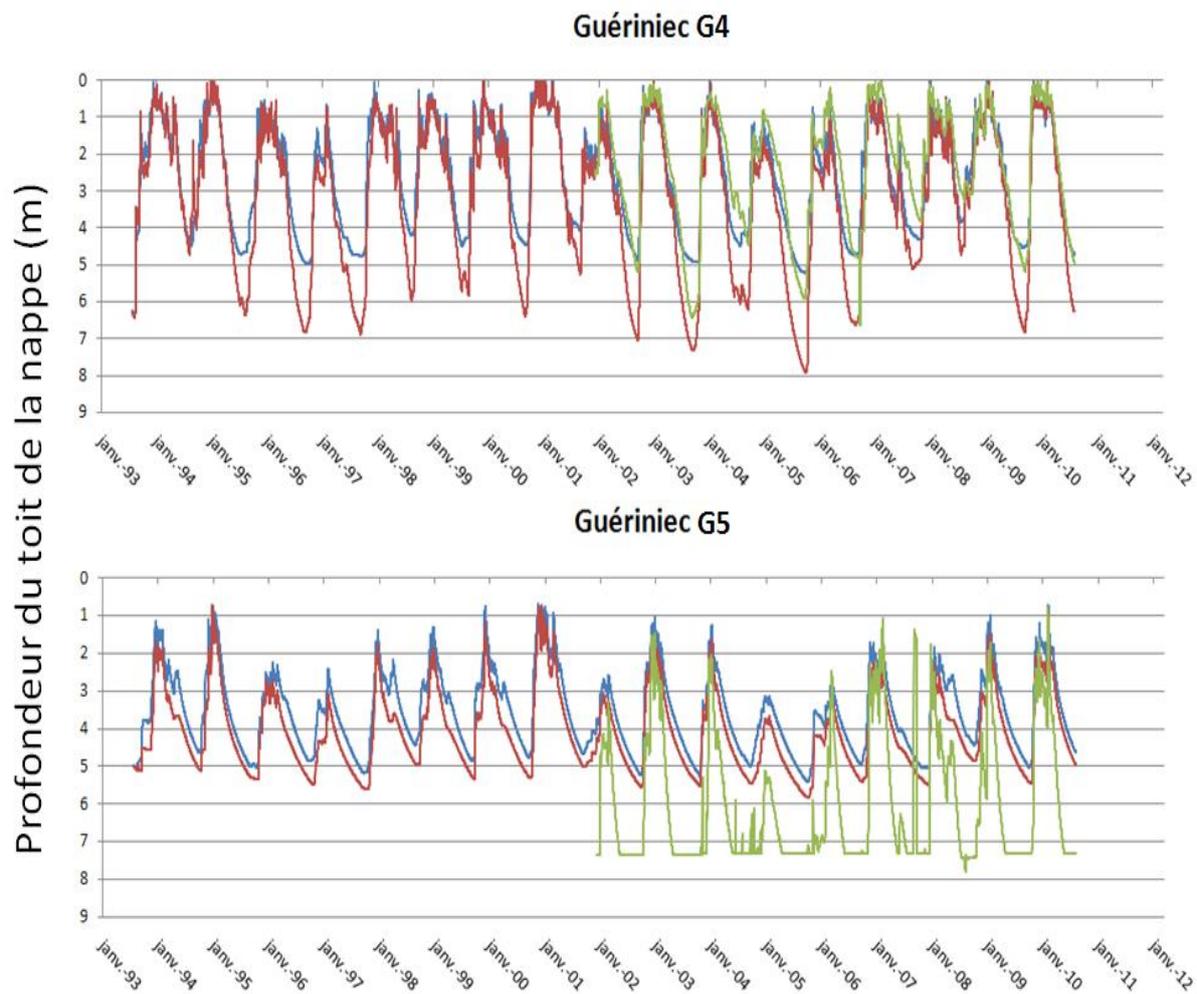


## 2- Profondeur de la nappe observée à différentes positions sur le bassin versant de Kervidy-Naizin et valeurs simulées avec et sans modification des écoulements (chapitre 4.2.7.1)

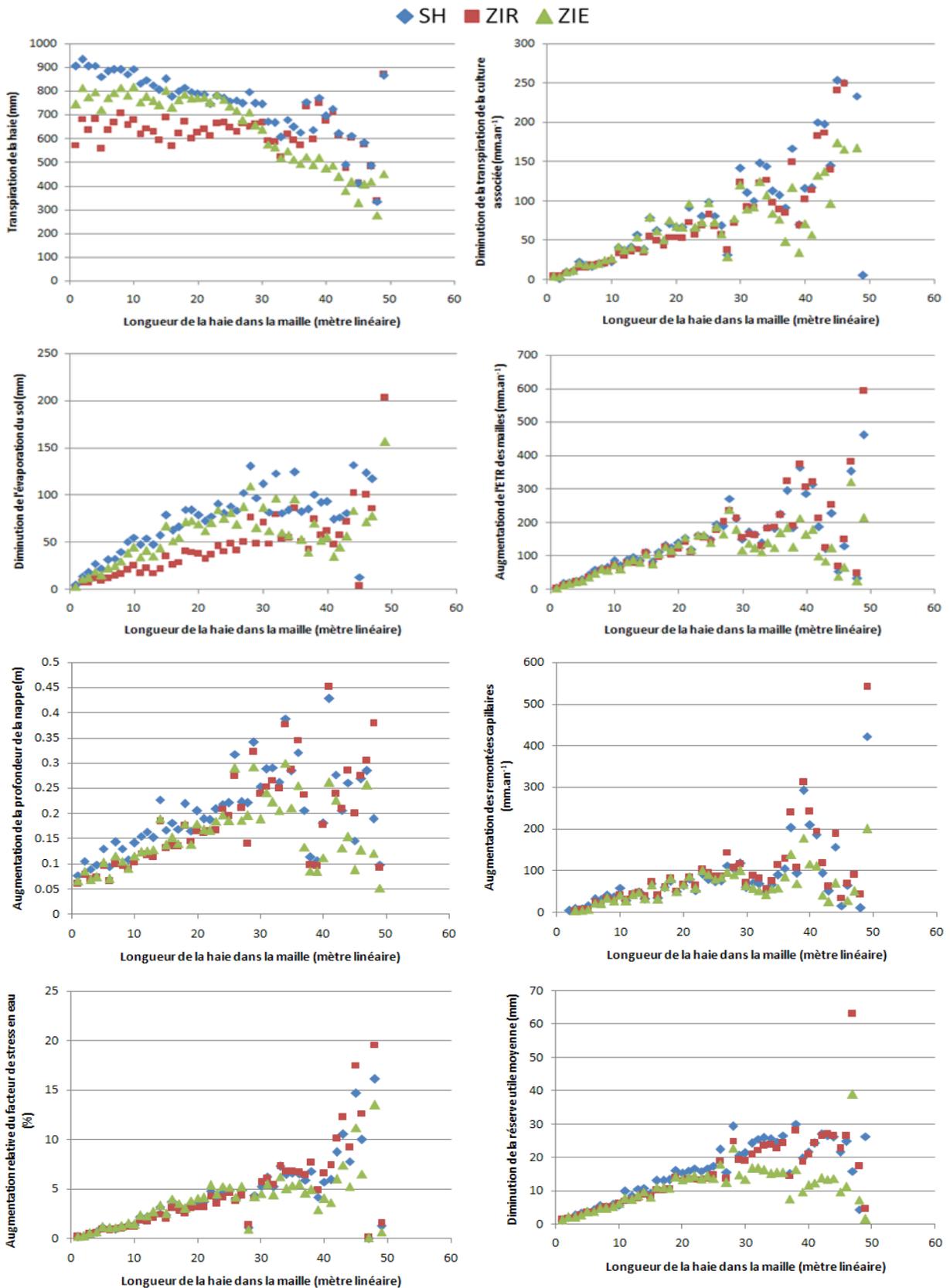


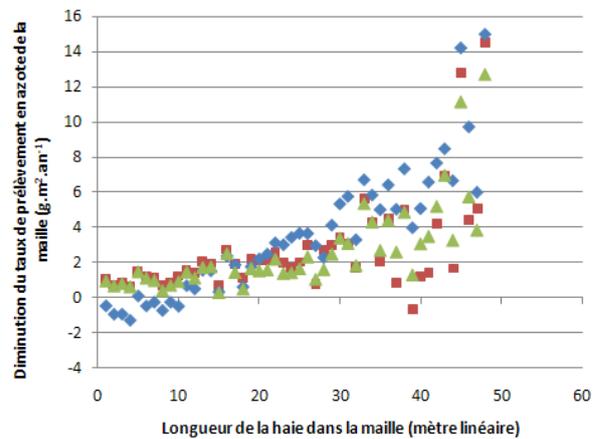
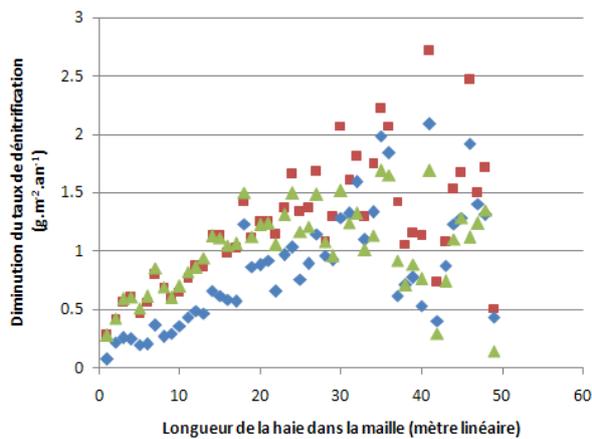
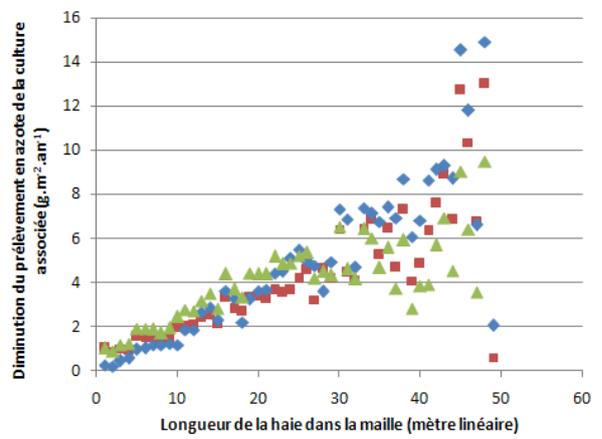
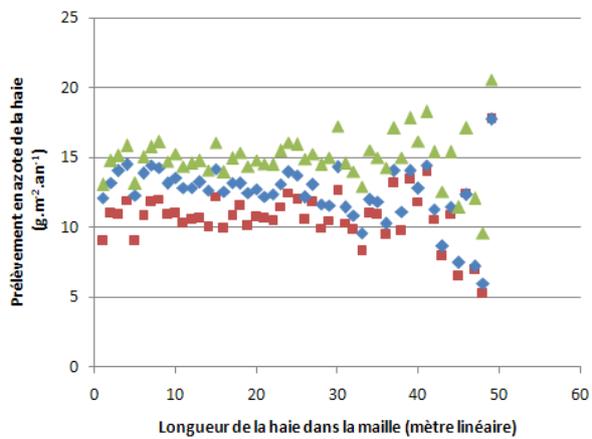
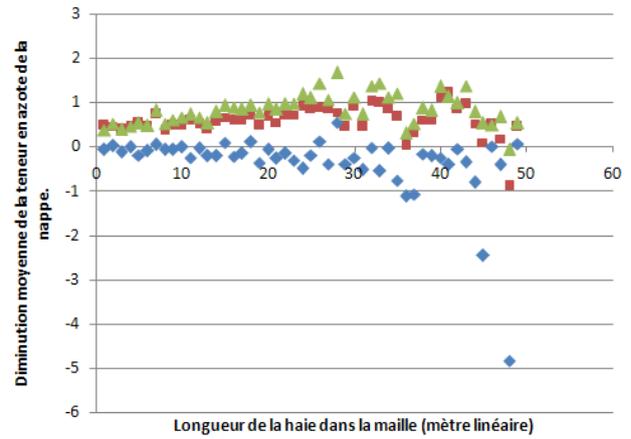
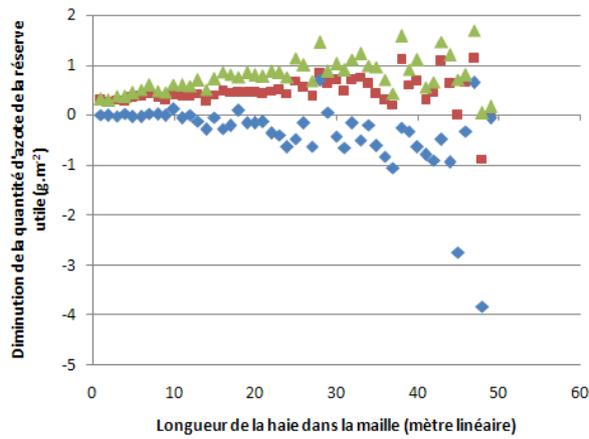
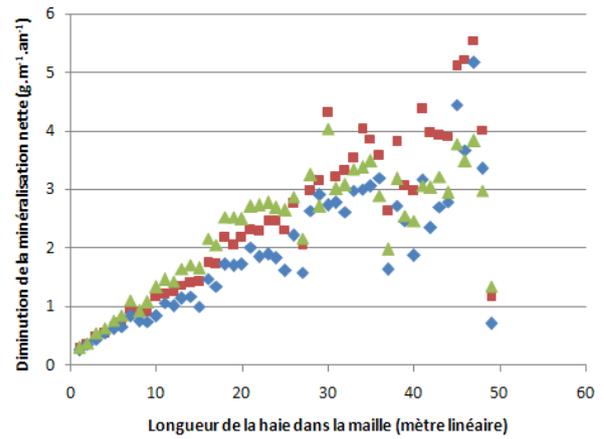
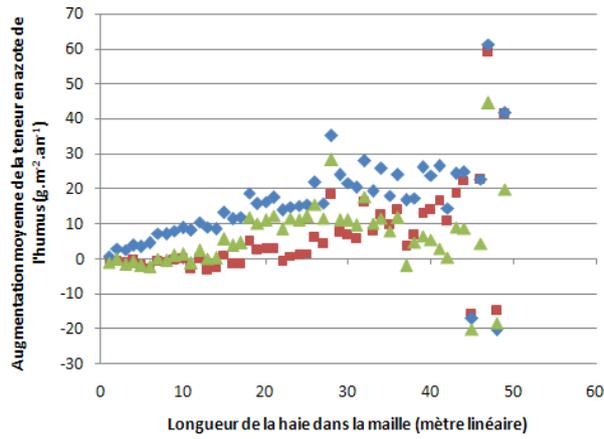


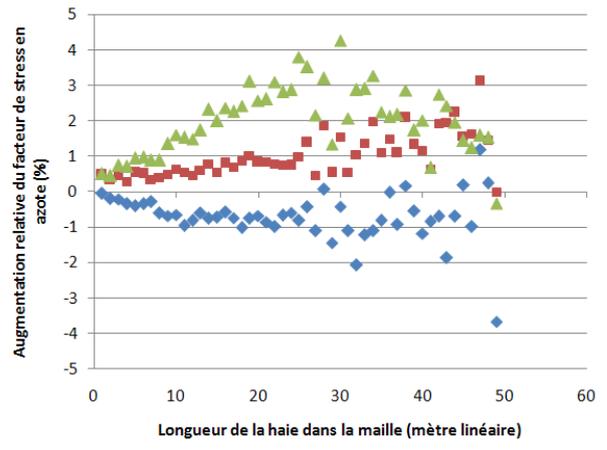
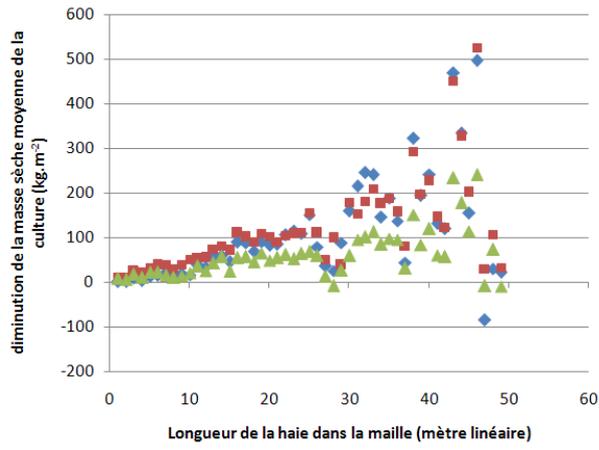




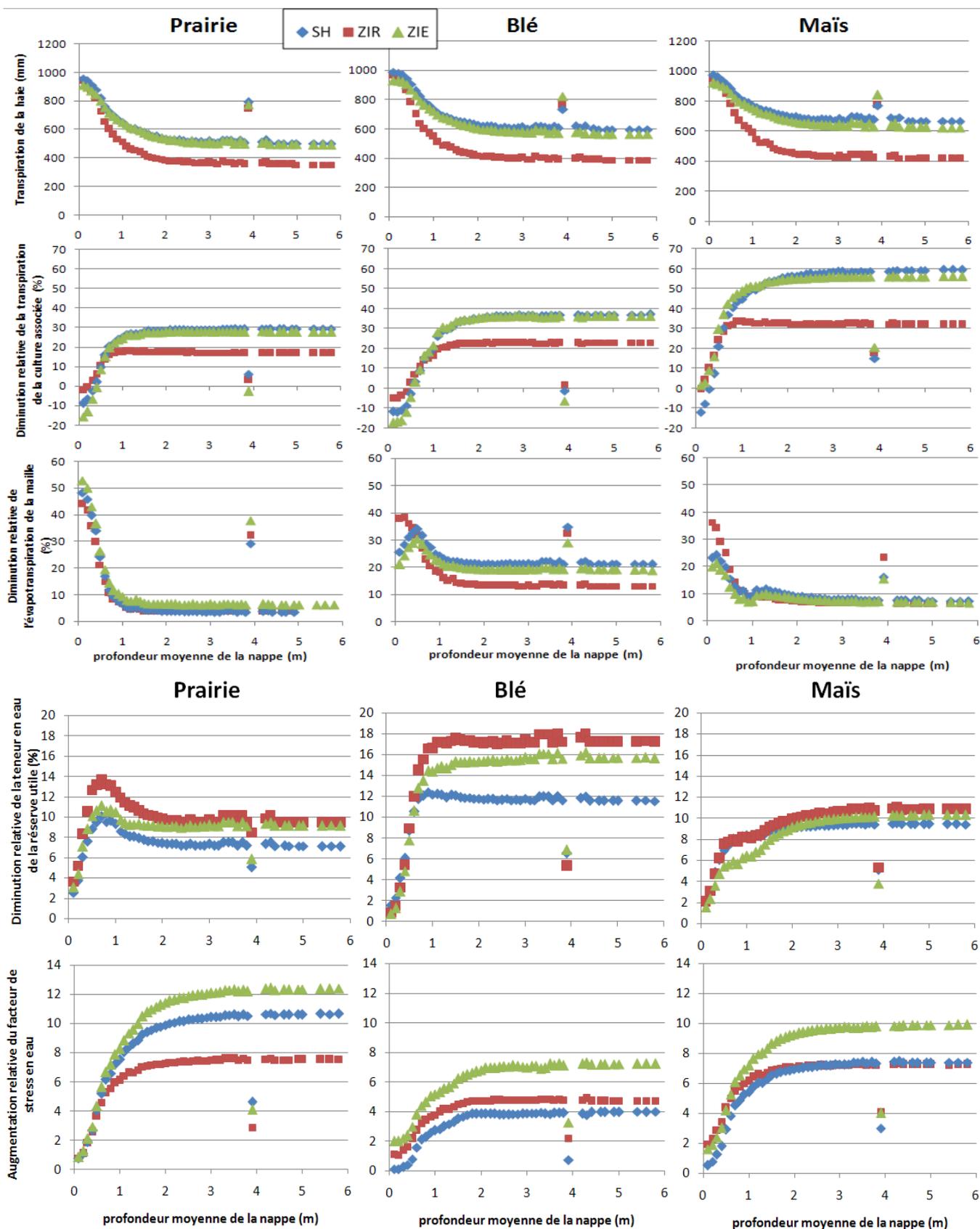
### 3- Valeurs moyennes des termes du bilan hydrique et azoté des mailles double couvert en fonction de la longueur du linéaire de haie dans la maille et selon les trois schémas de modélisation testés (chapitre 5.3.1).



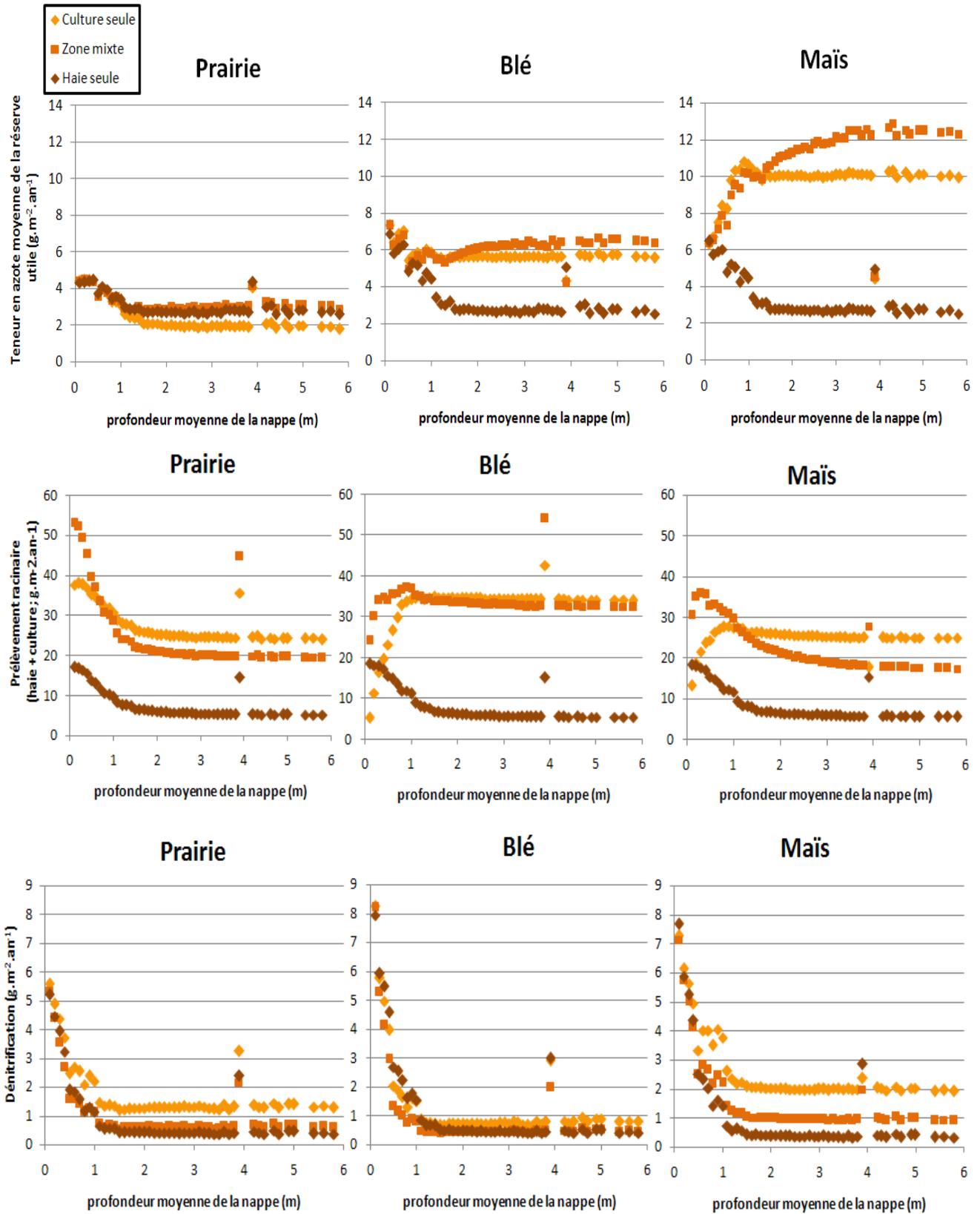


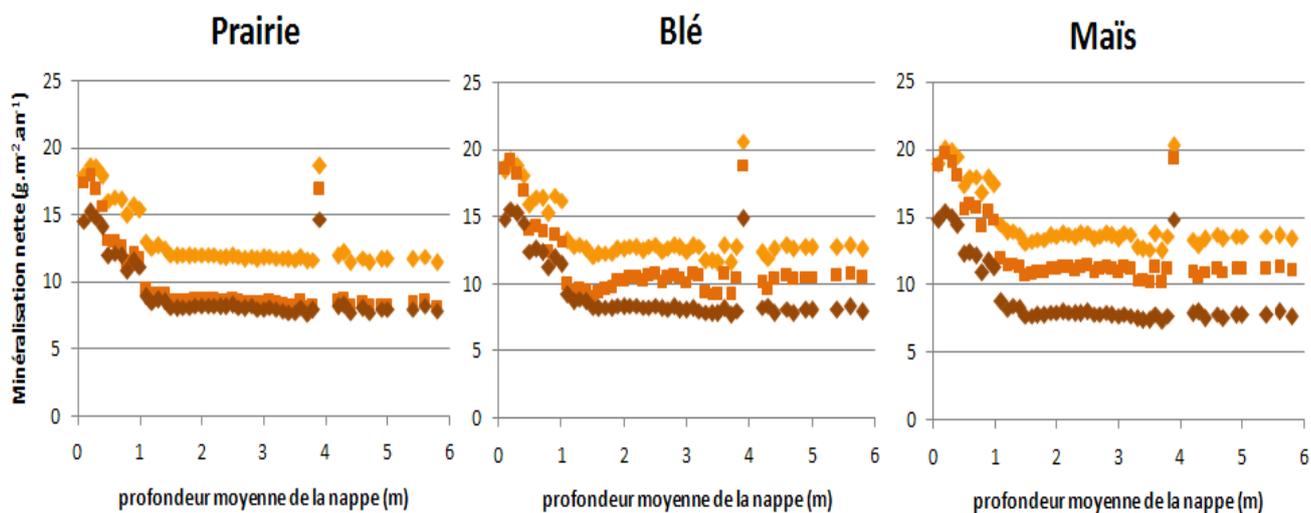


#### 4- Valeurs moyennes des termes du bilan hydrique en fonction de la profondeur moyenne du toit de la nappe, du type d'association haie-culture et pour les trois schémas de modélisation testés (chapitre 5.3.2.1).

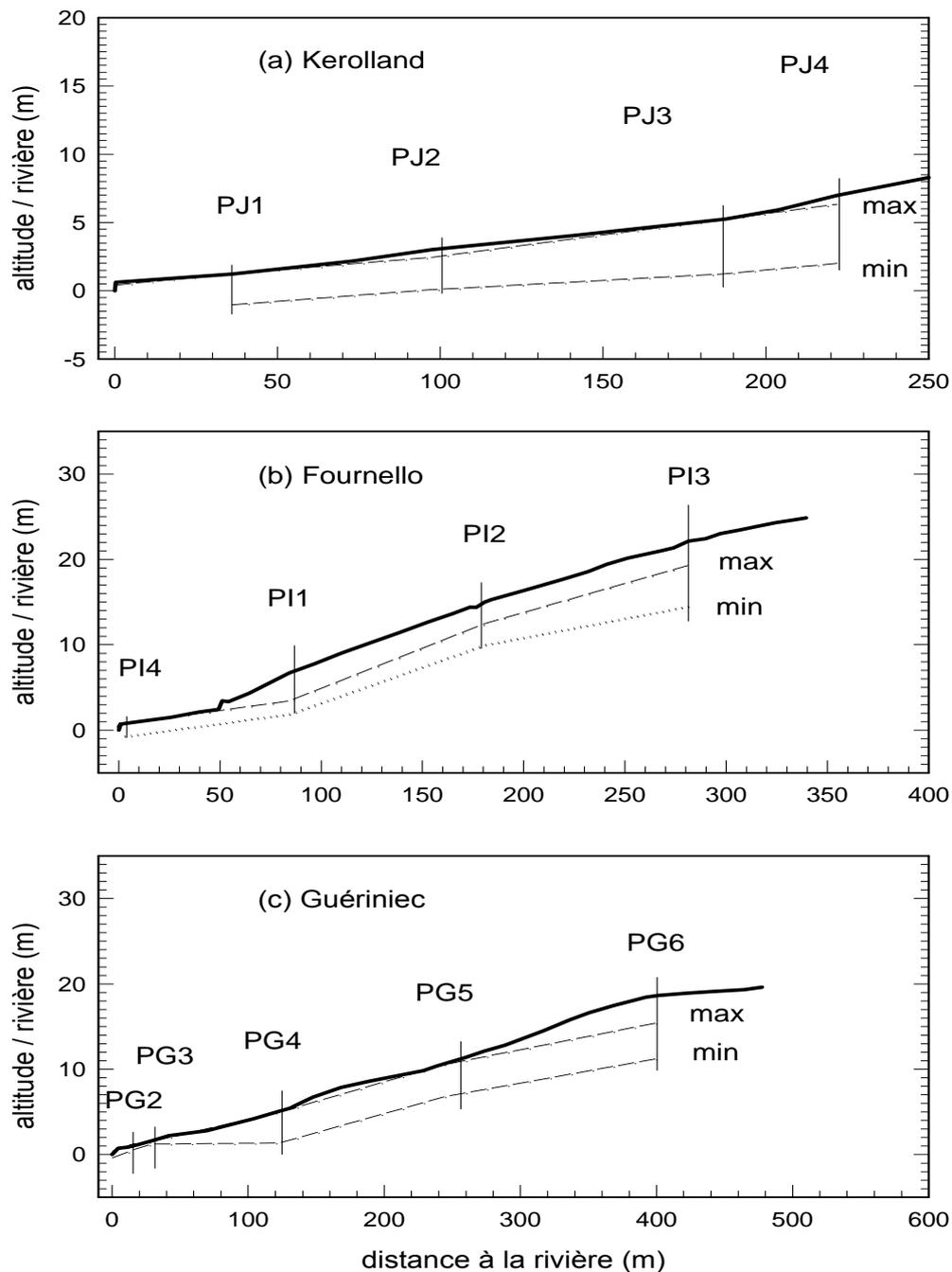


### 5- Valeurs des termes du bilan d'azote pour chaque zone des mailles double couvert en fonction de la profondeur moyenne du toit de la nappe et du type d'association haie-culture (chapitre 5.3.4).





## 6- Rôle de la topographie dans l'extension des surfaces saturées



*Profondeur de nappe le long de 3 versants du bassin versant de Kervidy-Naizin (56). L'extension des zones d'affleurement de nappe dépend de la profondeur moyenne de la nappe et de la forme du versant. Sur le versant de Kerolland, le point de rupture de pente (à + 200m de la rivière) est une limite de l'extension de la zone d'affleurement de nappe. Sur le versant de Fournello, la présence d'un talus (à + 50 m de la rivière) limite cette extension quelque soit la profondeur de la nappe. Sur le versant de Guériniec, la pente est uniforme et l'extension de la zone d'affleurement de nappe n'a pas de limite topographique, l'extension variera en fonction de la profondeur moyenne de la nappe. D'après Molénat et al. (2003)*

## Liste des figures

Figure 1.1 – Illustration de différents types de pratiques effectuées sur les haies : en haut à gauche, haie d’arbres émondés ; en haut à droite, arbres de haut jet ; au centre à gauche, haie élaguée de manière asymétrique ; au centre à droite, haie de cépée ou de taillis ; en bas, haie nouvellement plantée (Vannier, 2011). .....	6
Figure 1.2 – Les différentes notions d’évapotranspiration ( <a href="http://www.fao.org/index_fr.htm">http://www.fao.org/index_fr.htm</a> ) .....	9
Figure 1.3 - La gestion des haies diffère en fonction de l’occupation du sol des parcelles adjacentes (Vannier, 2011).....	23
Figure 2.1 – Localisation géographique du site expérimental de Pleine Fougères.....	28
Figure 2.2 – Positionnement du site sur le sous bassin versant de Pleine fougère. ....	28
Figure 2.3 – Instrumentation du site expérimental. ....	29
Figure 2.4 – Station météo positionnée à l’Ouest du site expérimental.....	29
Figure 2.5 – Coupe de sol du site expérimental de Pleine-Fougères (Layer, 2000). ....	30
Figure 2.6 – Photographies des coupes de sol des trois fosses. Les lettres désignent le nom des horizons qui sont distingués par des lignes.....	31
Figure 2.7 – Photographie d’un piézomètre et de son capteur « STS ».....	32
Figure 2.8 – Principe du tensiomètre. ....	33
Figure 2.9 – Schéma des deux transects et position des lots de tensiomètres avec en rouge les lots automatiques et en violet les lots manuels. Les chiffres indiquent la distance à l’arbre en mètre, avec en négatif la distance aval et en positif la distance amont. ....	33
Figure 2.10 – Photographie de la partie amont du transect 1. ....	34
Figure 2.11 – principe de fonctionnement du capteur de la sonde capacitive.....	34
Figure 2.12 – Photo de la sonde capacitive et du tube pvc de mesure placé dans le sol. ....	35
Figure 2.13 – Localisation des tubes pour la sonde capacitive pour les mesures (en blanc) et pour la calibration (en rouge). Les distances à la haie sont entre parenthèse, elles sont positives pour à l’amont et négative à l’aval. Les lettres distinguent des positions différentes par rapport à l’axe de la haie.....	36
Figure 2.14 – Photographie de lots de tensiomètres avec (gauche) ou sans (milieu) capteurs automatiques, et mesure avec un tensimètre (droite).....	37
Figure 2.15 – Banc d’étalonnage des capteurs de pression (STK 850).....	37
Figure 2.16 – Représentation schématique de tensiomètres automatiques SKT 850 (gauche) et manuels (droite).....	38
Figure 2.17 – Exemple de calibration de la sonde capacitive sur une large gamme d’humidité fournie par Sentek qui donne l’équation par défaut de l’appareil. ....	39
Figure 2.18 – Prélèvement des échantillons autour d’un des tubes tests à l’aide de cylindres de volume connu.....	40
Figure 2.19 – Densité apparente de la matrice de sol en fonction de la profondeur sur les différents profils prélevés. ....	41
Figure 2.20 – Relations entre la teneur en eau volumique de chaque type de sol déterminées au laboratoire et les mesures effectuées par la sonde capacitive. En violet les horizons de surface (0-20 cm) pour les profils situés en amont de la haie de bas et de mi-versant et en vert les horizons plus profond (>20 cm) des mêmes profils. En bleu les horizons de surface	

	(0-40cm) de l'aval de la haie de haut et de mi-versant et en rouge les horizons profonds à l'aval de la haie de haut de versant correspondant au schiste très altéré. ....	41
Figure 2.21 –	Granulométrie moyenne de la terre fine (<2mm) des sols des trois fosses du site expérimental avec écart-type sur les profondeurs. ....	42
Figure 2.22 –	Variations des potentiels matriciels (mm) durant l'année de mesure (sept. 2009 ; sept. 2010) en bas et à mi-versant pour des tensiomètres près de la haie (4.5 m à l'amont) et des tensiomètres loin de la haie (ou section sans haie). Les mesures ont débuté mi-septembre pour les lots dans la partie supérieure du versant et mi-novembre pour les lots dans la partie inférieure du versant. La pluviométrie (en mm) au pas de temps journalier n'a été disponible qu'à partir de début décembre. ....	44
Figure 2.23-	Variations des potentiels totaux durant l'année de mesure (sept. 2009 ; sept. 2010) en bas et à mi-versant pour des tensiomètres loin de la haie (ou section sans haie) et des tensiomètres près de la haie (4.5 m à l'amont). Les mesures ont débuté mi-septembre pour les lots dans la partie supérieure du versant et mi-novembre pour les lots dans la partie inférieure du versant. ....	45
Figure 2.24-	variation maximale de l'humidité volumique ( $\theta_{vmax} - \theta_{vmin}$ ) durant l'année de mesure 2009-2010 en fonction des profondeurs de mesure pour l'ensemble des tubes, avec en A les profils sans haie ou loin de la haie, en B la zone amont de la haie de milieu de versant, en C la zone aval de la haie de mi-versant et en D la zone amont de la haie de bas de versant en fonction du type de végétation.....	46
Figure 2.25 –	Variations d'humidité volumique ( $\theta_{vmax} - \theta_{vmin}$ ) mesurée par la sonde capacitive intégrée sur l'ensemble du profil des tubes durant l'année de mesure (2009-2010). ....	48
Figure 2.26	Cartes des isovaleurs de l'humidité volumique mesuré par la sonde capacitive à différentes dates sur un transect allant du haut de versant au bas de versant. Les profils et profondeurs de mesures sont représentés par des points rouges. ....	49
Figure 2.27 –	valeurs d'humidité volumique en fonction de la profondeur à trois mètres à l'amont de la haie de mi-versant et pour différentes dates. La figure A correspond à la période de reprise des écoulements et la figure B à la période de dessèchement. ....	50
Figure 2.28 –	Variation relative de l'humidité volumique par rapport à une date de référence (20/07/2010) à différentes profondeurs, pour des tubes placés loin de la haie ou à 4.5 m à l'amont en bas et à mi-versant.....	51
Figure 2.29 –	Variation de l'humidité volumique par rapport à une date de référence (20/07/2010) à différentes profondeurs, pour des tubes placés à 4,5 m à l'amont de la haie de bas de versant présentant différents types de végétation.....	52
Figure 2.30	Représentation des Variation de l'humidité volumique par rapport à une date de référence (03/09/2009), à proximité (3 m aval) de deux arbres de la haie de haut de versant, dont un, a été élagué en hiver. ....	53
Figure 2.31 –	Relation entre l'humidité volumique (%) mesurée grâce à la sonde capacitive et le du potentiel matriciel (mbar) mesuré grâce aux tensiomètres pour les profondeurs de 25, 50, 100 et 150 cm de différents profils de sols étudiés. Les graphiques de gauche correspondent aux mesures effectuées sur la partie supérieure du versant et les graphiques de droite aux mesures effectuées sur la partie inférieure du versant.....	54
Figure 2.32 –	Carte piézométrique relative à un point de référence situé au sommet du versant pour les dates du 19 octobre 2009 et du 4 mars 2010. Les traits verts représentent les haies et les points rouges les piézomètres. ....	55

Figure 2.33- Profondeurs de la nappe, relative à un point de référence situé au sommet du versant, le long d'une ligne parallèle à la pente et passant par les piézomètres à l'aval de la haie de HDV, à l'amont et à l'aval de la haie de MDV et à l'amont de la haie de BDV à différentes dates durant la reprise des écoulements. La haie de haut de versant est symbolisée par la position 0 sur l'axe des abscisses, la haie de mi-versant est située à environ 46 m et la haie de bas de versant à 96 m.....	57
Figure 3.1- Représentation schématique du fonctionnement du modèle TNT2 (Beaujouan et al., 2002) .....	61
Figure 3.2 – Représentation schématique d'une maille et de ses réservoirs. SD, ID, et RD sont respectivement les épaisseurs des réservoirs S, I et R.....	62
Figure 3.3 – Schéma de fonctionnement du modèle STICS. ....	64
Figure 3.4 – Représentation des écoulements multidirectionnels de la nappe d'une maille (au centre) en fonction de la topographie.....	65
Figure 3.5 – Principe de la modification des écoulements de nappes dans TNT2. ....	66
Figure 3.6 – Formation de mailles double couvert situées entre deux parcelles cultivées A et B.....	66
Figure 3.7 - Représentation schématique d'une maille double couvert, avec en marron le ratio de surface avec la haie seule ( $R_h$ ) qui correspond à l'intervalle entre deux champs (bois), en vert le ratio de surface avec la culture sous canopée de la haie ( $R_{ch}$ ) et en blanc le ratio de surface avec la culture seule ( $R_c$ ).....	67
Figure 3.8 – Représentation schématique de la variation interannuelle de la largeur de la canopée (A) et, inter et intra annuelle du LAI (B) entre deux tailles. ....	68
Figure 3.9 - Représentation schématique de la densité racinaire avec la profondeur inspirée de Braud (1995b). ....	70
Figure 4.1 - représentation spatiale des trois types de sol modélisés pour le bassin versant de Kervidy-Naizin, du réseau hydrographique, de la topographie, de la position de l'exutoire et des piézomètres installés (Salmon-Monviola et al., 2012 ). ....	78
Figure 4.2 – Représentation des linéaires de haie de 1952 et de 1999 sur le bassin versant de Kervidy-Naizin. Le quadrillage correspond au maillage du modèle. ....	79
Figure 4.3- Histogramme du nombre de mailles double couvert dans le bassin versant en fonction de la longueur de haie (en mètre) dans la maille.....	80
Figure 4.4 – Variations des débits journaliers ( $10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) observés (bleu) et simulés (rouge), à l'exutoire du bassin versant, durant la période de simulation allant septembre 1993 à septembre 2010. ....	82
Figure 4.5 – Représentation du bassin versant modélisé avec pour chaque maille un indicateur coloré du nombre d'occurrences où il n'y a pas d'écoulement vers l'aval (en jour). ....	83
Figure 4.6 – Représentation schématique de l'évolution du niveau de la nappe après la modification des écoulements dans TNT2. En fin de période d'écoulement la ligne continue représente la position de la nappe sans modification et la ligne pointillée avec modification. ....	84
Figure 4.7 - variations moyennes du toit de la nappe sur l'ensemble des mailles de sols hydromorphes (A) et sur l'ensemble des mailles de haut de versant (B), pour les simulations sans modification des écoulements (gris) et avec modification des écoulements (noir).....	84
Figure 4.8 – Diminution relative des débits avec la modification des écoulements sur les gradients de nappe. Pour la visibilité de la figure, ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997. Les précipitations correspondantes sont données dans les encadrées sous le graphe.....	85

Figure 4.9 - Chronique des valeurs moyennes quotidiennes, pour l'ensemble des mailles double couvert, de l'évapotranspiration réelle, de la teneur en eau du sol, et de la profondeur du toit de la nappe avec haie (bleu) et sans haie (rouge), entre septembre 1993 et septembre 2012.....	87
Figure 4.10- Transpiration de la haie, augmentation de l'ETR, diminution de l'évaporation du sol et de la transpiration de la culture des mailles double couvert, entre une configuration avec et sans haie, selon longueur du linéaire de haie dans une maille.....	89
Figure 4.11 - Augmentation de la profondeur du toit de la nappe et diminution de la teneur en eau de la réserve utile des mailles double couvert, entre une configuration avec et sans haie, selon longueur du linéaire de haie dans une maille.....	89
Figure 4.12 – Augmentation de l'évapotranspiration réelle journalière du bassin versant (A) et différence relative (B) entre une configuration sans haie et avec les réseaux de 140 m.ha <sup>-1</sup> (rouge) et 48 m.ha <sup>-1</sup> (bleu). Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997.....	90
Figure 4.13 – Diminution relative de la teneur en eau moyenne journalière de la réserve utile et augmentation relative journalière de la profondeur moyenne du toit de la nappe à l'échelle du bassin versant entre une configuration sans haie et avec les réseaux de 140 m.ha <sup>-1</sup> (rouge) et 48 m.ha <sup>-1</sup> (bleu). Les flèches noires indiquent le moment de la chute des feuilles. Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997. ....	91
Figure 4.14 – Diminution du débit journalier (A) et différence relative (B) à l'exutoire du bassin versant entre une configuration sans haie et avec les réseaux de 140 m.ha <sup>-1</sup> (rouge) et 48 m.ha <sup>-1</sup> (bleu). Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997.....	92
Figure 4.15- Variation relative de débit du bassin versant en fonction de la pluviométrie pour le réseau de 48 m.ha <sup>-1</sup> (noir) et de 140 m.ha <sup>-1</sup> (gris).....	93
Figure 4.16 – Représentation de la profondeur moyenne de la nappe pour l'ensemble du bassin versant de Kervidy-Naizin.....	94
Figure 4.17 – Histogramme de la répartition des mailles double couvert en fonction de la profondeur moyenne de la nappe.....	94
Figure 4.18 Variation moyenne de la transpiration de la haie, de la diminution de la transpiration de la culture, de la diminution de la teneur en eau de la réserve utile et de l'augmentation de l'ETR des mailles entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN. ....	95
Figure 4.19 – Diminution relative moyenne de la profondeur du front racinaire de la culture entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN.....	96
Figure 4.20 – Augmentation des remontées capillaires et diminution du ruissellement entre une configuration avec et sans haie selon la PMTN.....	96
Figure 4.21 – Transpiration moyenne annuelle de la haie, Diminution relative de la transpiration de la culture et augmentation relative de l'ETR de la maille entre une configuration avec et sans haie selon la PMTN et le type de culture associée à la haie (prairie, blé, maïs). ....	98
Figure 4.22 – Diminution relative moyenne de la quantité d'eau de la réserve utile, augmentation relative moyenne du facteur de stress en eau et diminution moyenne du ruissellement entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN et le type de culture associée à la haie. ....	99

Figure 4.23 – Illustration de l’effet de prélèvements différents des deux couverts sur la teneur en eau d’une couche de sol.....	102
Figure 4.24 – Variations des concentrations d’azote et des flux cumulés mesurées (rouge) et simulées (bleu) à l’exutoire du bassin versant de Kervidy-Naizin entre 1993 et 2010. Pour les valeurs mesurées les concentrations ne sont disponibles qu’entre 2000 et 2010. ....	104
Figure 4.25 – Diminution moyenne du prélèvement en azote dans la maille (haie plus culture) avec l’augmentation du linéaire de haie. ....	105
Figure 4.26 - Histogramme cumulé des flux annuels moyens sur le bassin versant de dénitrification, exportation par les cultures et immobilisation par les haies et bosquets de l’azote pour les simulations avec les réseaux de haie de 140 m.ha <sup>-1</sup> (1952) de 48 m.ha <sup>-1</sup> (1999) et sans haie.....	106
Figure 4.27 - Évolution des pertes relatives d’azote avec l’augmentation de la densité de haie.....	106
Figure 4.28 – Prélèvement en azote de la haie et augmentation de la quantité d’azote de la réserve utile entre une configuration avec et sans haie, en fonction de la longueur du linéaire de haie dans la maille.....	107
Figure 4.29 – Diminution moyenne du prélèvement en azote, du facteur de stress en azote et de la masse sèche de la culture associée entre une configuration avec et sans haie, et selon la longueur du linéaire de haie dans la maille. ....	108
Figure 4.30 – Augmentations moyennes de la teneur en carbone et azote de l’humus et diminutions moyennes de la minéralisation nette et du taux de dénitrification entre une configuration avec et sans haie, selon la longueur du linéaire de haie dans la maille.....	109
Figure 4.31 - Diminution de la dénitrification à l’échelle du bassin versant (A) et différence relative (B) entre une configuration sans haie et avec les réseaux de haies de 140 m.ha <sup>-1</sup> (rouge) et 48 m.ha <sup>-1</sup> (bleu). Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997.....	110
Figure 4.32 - Diminution du flux d’azote (A) et différence relative (B) à l’exutoire du bassin versant entre une configuration sans haie et avec les réseaux de haies de 140 m.ha <sup>-1</sup> (rouge) et 48 m.ha <sup>-1</sup> (bleu). Ces variations sont données pour trois années hydrologiques entre septembre 1994 et septembre 1997.....	111
Figure 4.33 – Prélèvement en azote de la haie (gauche) et diminution moyenne du prélèvement en azote de la maille entre une configuration avec et sans haie (droite), en fonction de la PMTN.....	112
Figure 4.34 –Diminution moyenne du prélèvement en azote, du facteur de stress et de la masse sèche de la culture associée et augmentations moyennes de la teneur en azote de la réserve utile entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN dans la maille...	112
Figure 4.35 – Augmentation de la teneur en azote de la nappe en présence de haie, selon la PMTN. ....	113
Figure 4.36 - Pertes relatives moyennes pour les mailles double couvert (vert) et les mêmes mailles sans haie (rouge), et diminutions des pertes relatives en présence de haie, selon la PMTN. ....	114
Figure 4.37 – Augmentation moyenne de la teneur en carbone et azote de l’humus et diminution moyenne de la minéralisation nette et du taux de dénitrification entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN. ....	115

Figure 4.38- Prélèvements en azote moyens de la haie et diminutions relatives moyennes du prélèvement de la culture et de la maille entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN, pour les associations de la haie avec la prairie, le blé, et le maïs. ....	117
Figure 4.39 – Augmentations relatives moyennes du facteur de stress en eau et diminutions relatives moyennes du facteur de stress en azote et de la masse sèche de la culture entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN, pour une association avec une prairie, du blé ou du maïs. ....	118
Figure 4.40 – Augmentations relatives moyennes de la teneur en azote de l’humus et diminutions relatives moyennes de la minéralisation nette et de la dénitrification entre une configuration avec et sans haie, selon la PMTN, pour une association avec une prairie, du blé ou du maïs. ....	119
Figure 4.41 – Diminutions relatives moyennes de la teneur en azote de la réserve utile et augmentations relatives moyennes de la teneur en azote de la nappe, selon la PMTN et pour les différents types d’association haie-culture. ....	120
Figure 4.42 – Pertes relatives moyennes pour les mailles double couvert (vert) et les mêmes mailles sans haies (rouge), et diminutions des pertes relatives moyennes en présence de haie, selon la PMTN et pour les différents types d’association haie-culture. ....	120
Figure 4.43 – Schéma de l’Influence du type de scénario de taille d’entretien (Canopée/2 ou LAI/2) sur l’interception du rayonnement dans le modèle. Rh correspond au ratio de surface où la haie est seule, Rc au ratio de surface où la culture est seule et Rch au ratio de la zone mixte. ....	122
Figure 4.44 – Schéma simplifié de circulation de l’azote simulé sur un bassin versant avec haies et sans haie. L’épaisseur des flèches indique l’importance relative des flux. ....	123
Figure 5.1 – Schéma de comparaison entre la maille double couvert de la version initiale avec les couches de sol homogènes, et la nouvelle version avec la discrétisation latérale des couches de sol en trois compartiments. La végétation n’est pas à l’échelle. ....	129
Figure 5.2 – Représentation de la zone d’influence de la haie diminuant exponentiellement à partir de la limite de la canopée de la haie. La largeur équivalente ( $w$ ), sur un côté de la haie, est déterminée à partir de l’aire de la surface grise présente sous la courbe. D’après Crosbie et al. (2007). ....	130
Figure 5.3 - Discrétisation latérale d’une couche de sol de la maille double couvert en trois compartiments, pour le schéma ZIR (Zone d’Influence Réduite) et ZIE (Zone d’Influence Etendue). La végétation n’est pas à l’échelle. ....	131
Figure 5.4 – Transpiration moyenne de la haie (ramenée à la surface de canopée), selon la PMTN, pour les trois scénarios. Avec SH pour Sol Homogène, ZIR pour Zone d’Influence Réduite (scénario 1) et ZIE pour Zone d’Influence Etendue (scénario 2). ....	132
Figure 5.5 – Chronique de la teneur en eau du sol d’une maille double couvert du bassin versant pour les trois types de zone, avec en haut le schéma ZIR et en bas le schéma ZIE. Cette maille est située sur un sol intermédiaire. ....	133
Figure 5.6 – Evolution de la teneur en eau moyenne de la réserve utile, du stress en eau moyen et de la masse sèche moyenne de la culture en fonction de la PMTN, pour les différentes zones des mailles double couvert et pour les deux scénarios. ....	133
Figure 5.7 – Diminutions moyennes de la transpiration de la culture et de la teneur en eau moyenne de la réserve utile, et augmentations moyennes de l’ETR et du facteur de stress en eau des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haies, en fonction de la	

PMTN et pour les différents scénarios. Il s'agit de moyennes sur l'ensemble des mailles double couvert. Les points bleus correspondent schéma SH, les points rouges au schéma ZIR et les verts au schéma ZIE. ....	134
Figure 5.8 – Représentation des mailles double couvert des trois réseaux bocagers fictifs positionnés sur les sols drainants (RD) sur les sols intermédiaires (RI) et sur les sols hydromorphes (RH) du bassin versant.....	135
Figure 5.9 – Variations annuelles de la profondeur moyenne du toit de la nappe : en rouge pour les mailles double couvert des réseaux RH (A), RI (B) et RD (C), en bleu pour les mêmes mailles sans haies. ....	136
Figure 5.10 Prélèvements moyens en azote de la haie (ramenés à la surface de canopée), selon la PMTN et le schéma de modélisation utilisé. ....	138
Figure 5.11 – Diminution du prélèvement en azote de la culture associée et du prélèvement total (haie plus culture) des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haies, selon la PMTN et pour les différents scénarios (en bleu SH, en rouge ZIR, en vert ZIE)...	138
Figure 5.12 - Valeurs de la teneur en azote moyennes de la réserve utile et du stress azoté moyen de la culture selon la PMTN, pour les différentes zones des mailles double couvert et pour les schémas de modélisation ZIR et ZIE. ....	140
Figure 5.13 – Minéralisation nette et de prélèvements par la haie et la culture associée selon la PMTN, pour les différentes zones des mailles double couvert et pour les deux scénarios. ....	141
Figure 5.14 – Dénitrification moyenne selon la PMTN, pour les trois zones des mailles double couvert et pour les deux scénarios.....	141
Figure 5.15 – Diminution de la dénitrification des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haies selon la PMTN. Avec SH pour Sol Homogène, ZIR pour Zone d'Influence Réduite et ZIE pour Zone d'Influence Etendue. ....	142
Figure 5.16 – Diminution de la teneur en azote moyenne de la réserve utile et de la nappe sur les mailles doubles couvert par rapport aux mêmes mailles sans haies selon la PMTN (en bleu SH, en rouge ZIR, en vert ZIE). ....	143
Figure 5.17 – Prélèvement racinaire (haie et/ou culture) pour les trois zones des mailles double couvert, pour les différents types d'association, en fonction de la PMTN. ....	146
Figure 5.18 - Dénitrification pour les trois zones des mailles double couvert, pour les différents types d'association, en fonction de la PMTN.....	146
Figure 5.19 - Minéralisation nette pour les trois zones des mailles double couvert, pour les différents types d'association, en fonction de la PMTN. ....	147
Figure 5.20 – Teneur en azote moyenne de la réserve utile pour les trois zones des mailles double couvert, pour les différents types d'association, en fonction de la PMTN. ....	147
Figure 5.21 – Diminution relative moyenne de la teneur en azote de la réserve utile des mailles double couvert par rapport aux mêmes mailles sans haie, pour les différents types d'association et en fonction de la PMTN. ....	148
Figure 5.22 – Remontées capillaires annuelles moyennes, selon la PMTN, pour les mailles double couvert (rouge), ainsi que pour les mêmes mailles en absence de haie (bleu). ....	150

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Absorption et restitution d'azote par des arbres en zone riparienne.....	16
Tableau 3.1 – Paramètres utilisés pour le système racinaire.....	71
Tableau 3.2 – Valeurs moyennes, minimales et maximales (en $\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$ ) de transpiration de la haie simulées en fonction de l'année de simulation.....	72
Tableau 3.3 – Valeurs moyennes, minimales et maximales (en $\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ ) de prélèvement d'azote par la haie simulées en fonction de l'année de simulation.....	74
Tableau 3.4 - Paramètres pour les résidus de culture (Nicolardot et al., 2001) attribués à la haie avec $N_{\text{res}}$ l'azote restitué par la haie. "njour" correspond au jour normalisé, soit une température de 15°C et une teneur en azote optimale.....	75
Tableau 3.5 – Valeur des autres paramètres utilisés pour la haie dans TNT2 .....	76
Tableau 4.1 - Valeurs des épaisseurs de sol et de porosité de chaque type de sol du modèle pour le bassin versant de Kervidy-Naizin.....	78
Tableau 4.2 – valeurs de la densité ( $\text{m}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), du nombre de maille double couvert et de la longueur totale (mètre linéaire) de haie dans le bassin versant pour les réseaux de 1952 et 1999.	80
Tableau 4.3 – Valeurs de la densité ( $\text{m}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), du nombre de maille double couvert et de la longueur totale (mètre linéaire) de haie pour chaque type de sol et pour les réseaux de 1952 et 1999.....	80
Tableau 4.4 - Valeurs de $m$ et $T_0$ pour chaque type de sol du modèle pour le bassin versant de Kervidy-Naizin.....	81
Tableau 4.5 – Augmentations moyennes du nombre d'occurrences sans écoulement vers l'aval entre un bassin versant sans haie et un bassin versant avec haies. Variation par maille et par an pour l'ensemble des mailles, pour les mailles double couvert ainsi que pour chaque type de sol. ....	86
Tableau 4.6 – Valeurs moyennes des débits annuels ( $10^6 \text{ m}^3$ ) à l'exutoire du bassin versant dans les configurations avec et sans haies, ainsi que pour des simulations avec et sans prise en compte des gradients inversés.....	86
Tableau 4.7 – Valeurs moyennes annuelles (en mm) et différences relatives de l'évapotranspiration, de la transpiration de la haie et de la culture, de l'évaporation du sol et de la teneur en eau de la réserve utile sur les mailles double couvert avec et en absence de haies, pour les réseaux de 1958 ( $140\text{m}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) et 1999 ( $48 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).....	88
Tableau 4.8 - Valeurs annuelles moyennes du débit à l'exutoire et de l'évapotranspiration sur le bassin versant pour des simulations avec les réseaux de haies de 1952 ( $140 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), de 1999 ( $48 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) et sans haie. ....	90
Tableau 4.9 - Valeurs moyennes annuelles (en mm) de l'évapotranspiration, de la transpiration de la haie et de la culture, de l'évaporation du sol et de la teneur en eau de la réserve utile à l'échelle des mailles double couvert pour les différents scénarios de taille.....	100
Tableau 4.10 - Valeurs moyenne annuelles du débit à l'exutoire et de l'évapotranspiration pour les différents scénarios de taille. ....	100
Tableau 4.11 - Valeurs moyennes en $\text{g N m}^{-2}\cdot\text{an}^{-1}$ de la dénitrification, de la minéralisation nette, des pertes en azote de l'humus et des prélèvements de la haie, des cultures et de la maille (haie plus culture), à l'échelle des mailles double couvert de 1999 ( $48 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) et 1952 ( $140\text{m}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), pour des simulations avec et sans haie. ....	107

Tableau 4.12 - Valeurs annuelles moyennes de flux d'azote dans le bassin versant en $\text{g N.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ pour des simulations sans haie, avec les réseaux de haies de 1999 ( $48 \text{ m.ha}^{-1}$ ) et de 1952 ( $140 \text{ m.ha}^{-1}$ ). .....	110
Tableau 4.13 – Date de semis, ainsi que le type, la date et la quantité d'azote apportée pour la prairie, le blé et le maïs.....	117
Tableau 4.14 – valeur moyenne en $\text{g N.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ de différents termes du bilan d'azote sur les mailles double couvert en fonction du type d'entretien appliqué à la haie. ....	121
Tableau 4.15 - Valeurs annuelles moyennes en $\text{g N.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ de flux d'azote en fonction du scénario d'élagage à l'échelle du bassin versant. ....	122
Tableau 5.1 – Largeurs (m) de chaque zone d'influence en fonction du schéma de modélisation. SH pour Sol Homogène, ZIR pour Zone d'Influence Réduite, et ZIE pour Zone d'Influence Etendue. ....	131
Tableau 5.2 – Valeurs moyennes annuelles d'évapotranspiration et de débit à l'exutoire du bassin versant.....	135
Tableau 5.3 - Valeurs annuelles moyennes (en mm) de l'évapotranspiration, de la transpiration de la haie et de la culture, de l'évaporation du sol et de la teneur en eau de la réserve utile, pour les mailles double couvert des réseaux bocagers RH, RI et RD, ainsi que pour les mêmes mailles sans haies. ....	137
Tableau 5.4 - Valeurs annuelles moyennes de débit à l'exutoire et d'évapotranspiration du bassin versant pour des simulations avec les réseaux RH, RI et RD, ainsi que pour un bassin versant sans haie. Les différences relatives par rapport au bassin versant sans haie sont indiquées pour les trois réseaux fictifs.....	137
Tableau 5.5 - Valeurs annuelles moyennes des flux d'azote à l'exutoire du bassin versant en $\text{g N.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ et valeurs moyennes de teneurs en azote ( $\text{g N.m}^{-2}$ ) de la réserve utile et de la nappe pour des simulations avec les réseaux de haies de 1999 ( $48 \text{ m.ha}^{-1}$ ), de 1952 ( $140 \text{ m.ha}^{-1}$ ) et sans haie.....	143
Tableau 5.6 – Valeurs moyennes annuelles ( $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ) du prélèvement racinaire en azote des mailles double couvert, de la haie, et de la culture, valeurs moyennes annuelles ( $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ) de la dénitrification, de la perte en azote de l'humus et de la minéralisation nette, sur les mailles double couvert et sur les mêmes mailles sans haie ; diminutions absolue et relative de toutes ces variables, entre les deux types de maille, en fonction de la position du réseau bocager (RD, RI, et RH). ....	144
Tableau 5.7 - Valeurs à l'échelle du bassin versant (en $\text{g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ) et différences relatives par rapport à un bassin versant sans haie, des flux d'azote à l'exutoire, de la dénitrification, de la minéralisation nette et des pertes en azote de l'humus, dans le cas des réseaux bocagers RH, RI et RD. ....	145



## Table des matières

Résumé.....	i
Abstract .....	iii
Sommaire .....	v
Liste de Sigles et Acronymes .....	vii
Introduction générale.....	1
1 Etat de l'art.....	3
1.1 Le bocage et son évolution.....	3
1.1.1 Définition du bocage et de la haie.....	3
1.1.1.1 Le bocage.....	3
1.1.1.2 La haie.....	3
1.1.2 Histoire du bocage.....	4
1.1.3 Les fonctions et valeurs du bocage. ....	5
1.1.4 Les pratiques de gestion des haies.....	5
1.2 Fonctionnement biophysique de l'arbre.....	7
1.2.1 Le système racinaire .....	7
1.2.2 Evapotranspiration .....	8
1.2.2.1 Définition .....	8
1.2.2.2 La transpiration des arbres.....	9
1.2.2.3 Rôle de l'humidité du sol.....	10
1.2.2.4 Rôle de la physiologie de l'arbre .....	11
1.2.2.5 Rôle de l'hétérogénéité du paysage.....	11
1.3 Influence locale de la haie sur l'organisation et le fonctionnement physique et chimique du sol	12
1.3.1 Effet sur les propriétés physiques et chimiques des sols.....	12
1.3.2 Effet sur le bilan hydrique des sols.....	13
1.3.2.1 L'interception .....	13
1.3.2.2 L'humidité des sols .....	13
1.3.3 Effet sur la nappe.....	14
1.3.4 Effet sur le bilan d'azote.....	14
1.3.4.1 Prélèvement de l'azote par les arbres.....	15
1.3.4.2 Restitution de l'azote par les arbres.....	15
1.3.4.3 Décomposition de la matière organique.....	15

1.3.4.4	Bilan de l'azote entre prélèvement et restitution.....	15
1.3.4.5	Effet sur la dénitrification hétérotrophe .....	16
1.3.4.6	Effet sur l'azote de la nappe.....	17
1.4	Influence à l'échelle du paysage.....	18
1.4.1	Effet sur le bilan hydrique .....	18
1.4.1.1	Rôle sur le ruissellement .....	18
1.4.1.2	Rôle sur l'évapotranspiration .....	18
1.4.1.3	Rôle sur la nappe .....	19
1.4.2	Effet sur le bilan d'azote.....	19
1.4.3	Effet sur l'organisation des sols.....	20
1.5	Interaction haie-culture.....	21
1.6	La gestion des haies.....	22
1.7	Les modèles sur le bocage et l'agroforesterie.....	24
1.8	Conclusion de l'étude bibliographique.....	25
2	Étude expérimentale du fonctionnement hydrique de différentes haies le long d'un versant....	27
2.1	Introduction.....	27
2.2	Site expérimental .....	27
2.3	Instrumentation .....	29
2.3.1	Climatologie.....	29
2.3.2	Observations pédologiques.....	30
2.3.3	Mesures hydrologiques .....	31
2.3.3.1	Piézométrie.....	31
2.3.3.2	Tensiométrie.....	32
2.3.3.2.1	Principe de fonctionnement.....	32
2.3.3.2.2	Disposition sur le site .....	33
2.3.3.3	Sonde capacitive.....	34
2.3.3.3.1	Principe de fonctionnement.....	34
2.3.3.3.2	Disposition sur le site .....	35
2.4	Etalonnage des capteurs de mesures.....	36
2.4.1	Etalonnage des capteurs des tensiomètres .....	36
2.4.2	Etalonnage de la sonde capacitive .....	39
2.5	Résultats .....	42
2.5.1	Analyse granulométrique .....	42
2.5.2	Données météorologiques .....	42

---

2.5.3	Humidité du sol .....	43
2.5.3.1	Potentiel matriciel et charge hydraulique.....	43
2.5.3.2	Humidité volumique du sol .....	46
2.5.3.2.1	Variations d'humidité volumique.....	46
2.5.3.2.2	Effet de la haie sur les dynamiques d'humidité volumique du sol .....	50
2.5.3.2.3	Effet du type de végétation de la haie sur les dynamiques d'humidité volumique du sol. 51	
2.5.3.2.4	Effet de l'élagage.....	52
2.5.3.3	Relation entre humidité volumique et potentiel matriciel .....	54
2.5.4	Variation du toit de la nappe.....	55
2.6	Discussion et conclusion.....	58
3	Développement d'un module haie dans le modèle spatialisé TNT2.....	61
3.1	Le Modèle TNT2 .....	61
3.1.1	Brève description de TNT2 .....	61
3.1.2	Calcul du bilan d'eau et interactions entre zones saturée et non saturée .....	62
3.1.3	Croissance des cultures et interaction avec les ressources. ....	63
3.2	Modification apportée au modèle TNT2 sur les gradients d'écoulement. ....	65
3.2.1	Position du problème .....	65
3.2.2	Prise en compte d'un gradient nul ou négatif.....	65
3.3	Description de la maille « double couvert ».....	66
3.3.1	Position du problème .....	66
3.3.2	Proportion des couverts dans la maille .....	66
3.4	Processus ou fonctions associées aux haies.....	68
3.4.1	Développement de la canopée.....	68
3.4.2	Interception lumineuse .....	69
3.4.3	Variation de biomasse .....	69
3.4.4	Système racinaire .....	70
3.4.5	Prélèvement en eau .....	71
3.4.6	Remontées capillaires .....	73
3.4.7	Prélèvement en azote .....	73
3.4.8	Restitution d'azote par la chute des feuilles, décomposition des résidus et minéralisation.....	74
3.4.9	Valeurs des autres paramètres utilisés pour la haie dans TNT2 .....	76
4	Application du modèle au bassin versant de Kervidy-Naizin .....	77
4.1	Site d'étude .....	77

4.1.1	Climat.....	77
4.1.2	Les sols.....	77
4.1.3	Hydrologie .....	78
4.1.4	La production agricole.....	79
4.1.5	Le réseau bocager.....	79
4.2	Impact de la haie sur le bilan hydrique du bassin versant .....	81
4.2.1	Calage des paramètres d'écoulement du modèle après modification sur le gradient de nappe	81
4.2.2	Influence de la modification des écoulements .....	82
4.2.2.1	Effet sur la nappe.....	82
4.2.2.2	Influence du réseau bocager .....	85
4.2.3	Impact de la présence de haies sur le bilan d'eau des mailles double couvert .....	86
4.2.4	Influence de la densité du réseau de haies sur le bilan hydrique .....	88
4.2.4.1	Impact sur les mailles double couvert.....	88
4.2.4.2	Impact sur le bassin versant .....	90
4.2.5	Influence sur le bilan d'eau de la position des haies sur le versant .....	93
4.2.5.1	Impact sur les mailles double couvert.....	94
4.2.5.2	Effet du type de culture associée avec la haie .....	97
4.2.6	Influence de la taille d'entretien des haies .....	99
4.2.7	Discussion de l'influence de la haie sur le bilan hydrique.....	101
4.2.7.1	Modification des écoulements.....	101
4.2.7.2	Effet de l'association haie-culture sur les mailles. ....	101
4.2.7.3	Effet de la position des haies sur le versant.....	102
4.2.7.4	Influence de la présence de haies sur les débits à l'exutoire du bassin versant.....	102
4.3	Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant.....	104
4.3.1	Calage des paramètres concernant le bilan d'azote du modèle après modification des écoulements.....	104
4.3.2	Influence de la densité des réseaux de haies.....	105
4.3.2.1	Effet de la surface de sol occupée par les haies.....	105
4.3.2.2	Impact sur les mailles double couvert.....	107
4.3.2.3	Impact dans le bassin versant .....	109
4.3.3	Influence de la position des haies sur le versant.....	111
4.3.3.1	Impact sur les mailles double couvert.....	111
4.3.3.2	Effet du type de culture associé à la haie.....	115
4.3.4	Influence de la taille d'entretien. ....	121

4.3.5	Discussion de l'influence modélisée de la haie sur le bilan d'azote.....	122
4.3.5.1	Impact de l'association haie-culture sur les mailles double couvert .....	122
4.3.5.2	Impact de la haie sur le bilan d'azote du bassin versant.....	123
4.4	Discussion de la partie 4.....	125
4.5	Conclusion .....	127
5	Discrétisation latérale des couches de sol des mailles double couvert .....	129
5.1	Introduction.....	129
5.2	Description des processus et des variables affectées .....	129
5.3	Application de la nouvelle maille double couvert.....	130
5.3.1	Schéma de modélisations.....	130
5.3.2	Effet de la modification des mailles double couvert sur les termes du bilan hydrique.....	132
5.3.2.1	Effet de la position sur le bassin versant.....	132
5.3.2.2	Effet sur les termes du bilan hydrique de la position d'un réseau bocager sur le bassin versant.....	135
5.3.3	Impact de la discrétisation latérale des couches de sol sur les termes du bilan d'azote. 138	
5.3.3.1	Effet sur les termes du bilan d'azote de la position d'un réseau bocager sur le bassin versant	144
5.3.4	Effet du type d'association haie-culture. ....	145
5.4	Discussion et Conclusion .....	149
	Conclusion Générale.....	153
	Bibliographie.....	157
	Annexe.....	167
1-	Chronique de potentiel matriciel à différentes position sur le site expérimental de Pleine Fougères (chapitre 2.5.3.1) .....	167
2-	Profondeur de la nappe observée à différentes positions sur le bassin versant de Kervidy-Naizin et valeurs simulées avec et sans modification des écoulements (chapitre 4.2.7.1) .....	168
3-	Valeurs moyennes des termes du bilan hydrique et azoté des mailles double couvert en fonction de la longueur du linéaire de haie dans la maille et selon les trois schémas de modélisation testés (cahpitre 5.3.1). ....	172
4-	Valeurs moyennes des termes du bilan hydrique en fonction de la profondeur moyenne du toit de la nappe, du type d'association haie-culture et pour les trois schémas de modélisation testés (chapitre 5.3.2.1). ....	175
5-	Valeurs des termes du bilan d'azote pour chaque zone des mailles double couvert en fonction de la profondeur moyenne du toit de la nappe et du type d'association haie-culture (chapitre 5.3.4). ....	176
6-	Rôle de la topographie dans l'extension des surfaces saturées.....	178
		193

---

Liste des figures.....	179
Liste des tableaux.....	186
Table des matières.....	189