



**HAL**  
open science

## Rôle hydrologique et géochimique des structures linéaires boisées

Philippe Mérot, Sandrine Reyne

► **To cite this version:**

Philippe Mérot, Sandrine Reyne. Rôle hydrologique et géochimique des structures linéaires boisées : Bilan bibliographique et perspectives d'étude. La forêt paysanne dans l'espace rural : Biodiversité, paysages, produits, 29, INRA, 268 p., 1996, Etudes et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement, 2-7380-0684-1. hal-02842154

**HAL Id: hal-02842154**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02842154>**

Submitted on 7 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.

# Rôle hydrologique et géochimique des Structures Linéaires Boisées

## Bilan bibliographique et perspectives d'étude

Philippe MEROT  
Sandrine REYNE

INRA, Unité de Science du Sol et de Bioclimatologie, ENSA, 65, route de St Briec, 35042 Rennes cedex

### Résumé

La recherche bibliographique révèle la rareté des travaux spécifiques sur l'impact des structures linéaires boisées (SLB) vis-à-vis de la ressource en eau, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, sous climat tempéré. Quelques travaux font ressortir cependant un impact important sur l'organisation et le fonctionnement des sols. Il ressort également, à partir d'études faites essentiellement dans le bocage breton que le réseau bocager, et particulièrement le talus de ceinture de fond de vallée, ont un rôle régulateur sur les débits, en atténuant notamment le volume et la pointe de crue. Sur le plan géochimique, différents indices suggèrent d'attribuer aux SLB un rôle sur le transfert de polluants : les haies bloquent les particules érodées, support des pesticides et du phosphore ; des conditions anaérobies peuvent régner dans le sol au droit des haies et favoriser la dénitrification ; enfin les arbres des haies peuvent consommer spécifiquement certains éléments dissous.

Cependant un grand besoin de recherches nouvelles se fait sentir tant sur le plan strictement hydrologique, pour quantifier l'impact des haies, au niveau de grands bassins versants à partir de méthodes actuelles (modélisation hydrologique distribuée, système d'information géographique) que sur le plan géochimique, pour caractériser les processus en oeuvre, en synergie sans doute avec d'autres éléments du paysage (zones humides de bas-fond...).

**Mots clés** : haie, hydrologie, sol, réseau, zone tampon.

### Abstract

***The hydrological and geochemical role of hedges : a review of literature ; research prospects.*** A review of literature reveals that there have been very few studies so far on the quantitative and qualitative impact of hedges on water resources in the temperate zone. Work in French Brittany shows that the bocage network, and specifically the hedge line surrounding the talweg, have a buffering effect, by lessening stormflow volume and floodpeaks.

*Regarding water quality, some information suggests that hedges have an impact on pollutant movement : hedges retain the eroded particles carrying pesticides and phosphorus; anoxic conditions may occur in soil close to hedges and support denitrification; trees in hedges may selectively absorb some dissolved elements.*

*Given the rapidly growing environmental problems in temperate rural areas, further research work is urgently needed : to quantify the hydrological impact of hedges in large basins, using new methods such as distributed hydrological modelling and geographic information systems; and to characterize the main processes controlling pollutant fate in hedges, in synergy with other landscape elements (i.e., wet zones in talweg beds).*

**Keywords:** hedges, hydrology, soil, network, buffer zone.

Cette bibliographie se donne pour objectif d'analyser les travaux portant sur le rôle hydrologique et géochimique des boisements linéaires. A partir d'un bilan des connaissances, on dégagera rapidement

les axes de recherche qu'il semble intéressant de développer pour combler les lacunes rencontrées, et en s'appuyant notamment sur les outils et les concepts récemment apparus.

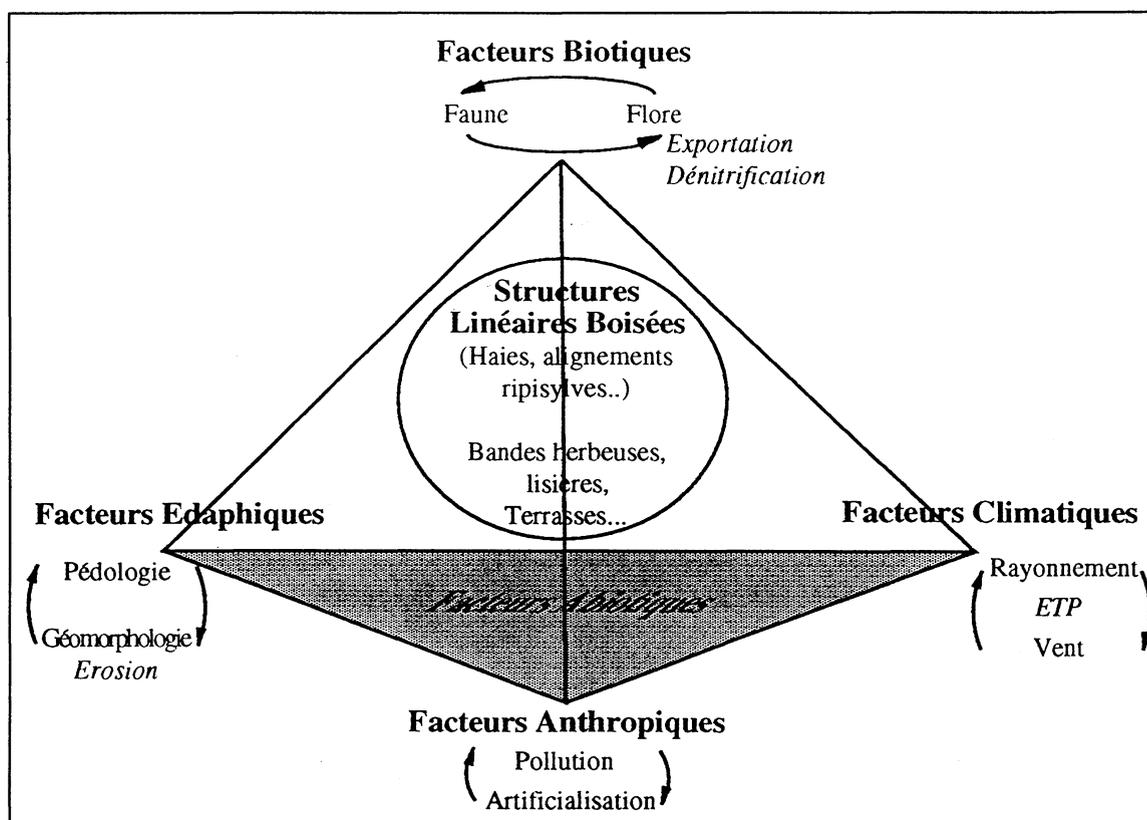
La réflexion que nous proposons de mener est centrée sur les Structures Linéaires Boisées (SLB) des zones tempérées humides de l'ouest de l'Europe ; les conditions environnementales (climaticques, topographiques, hydrologiques) d'autres régions, méditerranéennes ou continentales, nous semblent assez différentes pour que la hiérarchie des processus en jeu ne soit ni transposable, ni extrapolable. Cependant la référence à des travaux menés dans ce contexte différent sera faite à l'occasion, lorsque notamment ils présentent un intérêt méthodologique.

En premier lieu, la bibliographie consultée permettra un tour d'horizon des principaux processus dans lesquels les Structures Linéaires Boisées sont susceptibles d'intervenir. Dans ce cadre, on précisera les propriétés des SLB et des structures proches d'origine anthropique (bandes herbeuses) ou naturelles (ripisylves, lisières) développées en fonction des processus mis en jeu. Un deuxième volet détaillera les méthodologies mises en oeuvre dans les différents axes de recher-

che associant SLB, sol, hydrologie et géochimie. C'est dans la dernière partie que des propositions de recherche seront dégagées en fonction des connaissances et des outils actuels.

## 1. Des structures à rôle spécifique, en réponse à un processus ?

Haies, ripisylves, bandes herbeuses, lisières forestières, terrasses... Sous toutes les latitudes, des structures naturelles ou d'origine anthropique ont répondu spécifiquement à des besoins des utilisateurs du milieu rural. L'exemple de rôle qui vient le plus aisément à l'esprit est celui des haies brise-vent ou des terrasses anti-érosives. Plus généralement, ces différentes organisations sont associées à un ensemble de processus dépendants des conditions de milieu, repris sur la figure 1.



**Figure 1** : Inscription des structures linéaires boisées au sein du contexte écologique (original S. Reyne). Les flèches indiquent des interactions possibles.

## 1.1. Des différents rôles des haies

### 1.1.1 Un rôle de premier plan dans les approches bioclimatiques

On pourrait presque parler d'une "Ecole Polonaise" spécialisée dans une approche bioclimatique originale de fonctionnement de la haie au sein de l'agro-écosystème. Ryszkowski & Kedziora (1987) ; Ryszkowski (1989, 1990, 1992, 1993) ; Ryszkowski & Bartoszewicz (1989) et Kedziora *et al.* (1989) ciblent leur recherche sur l'utilisation de l'énergie solaire par les haies et les conséquences sur le cycle de l'eau. Il ressort du suivi des paramètres bioclimatiques en fonction du couvert végétal que les haies se comportent comme de véritables "mèches" par leur forte évapotranspiration, et que cette action directe sur le cycle de l'eau ne peut pas rester sans effet sur la solution du sol, donc sur les cycles de nutriments.

### 1.1.2. De l'agro-foresterie aux cultures en bandes : quels apports aux cultures ?

De nombreux travaux se sont intéressés aux interactions entre végétaux ligneux et végétaux herbacés dans le cadre de systèmes de culture particuliers comme les systèmes agro-forestiers ou les cultures en bandes à l'abri de haies basses. De ces études, il se dégage souvent simultanément un bénéfice net pour les cultures, qui sans haies ou arbres seraient soumises à de trop fortes contraintes, et un phénomène de compétition pour l'eau, la lumière et les nutriments.

On retrouve ces deux effets antagonistes chez Sadanandan-Nambiar & Sands (1993) qui évoquent les problèmes de compétition inter-spécifique entre herbacées et ligneux en milieu forestier et dans les systèmes agro-forestiers, puis proposent des modes de gestion. C'est un objet de recherche classique en agro-foresterie, ensemble de pratiques basées sur une gestion parallèle et équilibrée entre pâturages et arbres. Les pratiques de gestion de l'arbre peuvent être intéressantes à considérer dans un contexte bocager (taille et exportation d'une part de la biomasse, effet de la litière...), ou dans des pratiques de cultures en bandes

associées à des haies basses. De même, Korwar & Radder (1994) proposent de limiter la compétition pour l'eau en élaguant régulièrement les ligneux, voire en taillant les racines. Rappelons que la taille et son utilisation en bois de feu ont été une conduite traditionnelle dans le bocage breton.

L'effet améliorant de la litière de certaines espèces est repris par Swami Rao (1988) et Patil (1988) dans leurs travaux sur les cultures associées en Inde. Différents travaux (Hulugalle & Ndi, 1994 ; Lal, 1989) essaient de quantifier les effets directs des haies sur certaines propriétés du sol comme la capacité d'échange et l'infiltrabilité : il en ressort que les apports par la litière ont un effet significativement positif pour les rendements, dans des sols où le turn-over de la matière organique est très rapide. Les aspects positifs des apports de matière organique à la fois en terme d'éléments minéralisables et de rétention d'eau se retrouvent dans les travaux de Ssekabembe *et al.* (1994), qui mettent par ailleurs en avant une moindre compétition entre cultures et arbres si l'enracinement de ces derniers est profond et non limité par la pierrosité.

En milieu cultivé, les haies sont également étudiées comme brise-vent, et par suite comme des structures à effet positif sur la réserve en eau des sols : les travaux de Ding Guifang & Zhang Yuhua (1990), Chen Xiquan *et al.* (1990) en climat de mousson montrent que les haies conservent l'humidité du sol en atténuant l'effet desséchant des vents chargés de sable. Les effets positifs sur la réserve utile des sols sont inversement proportionnels à la distance à la haie, sous réserve cependant d'une forte compétition aux abords immédiats (Mette & Sattelmacher, 1994). C'est sur cette double aptitude que Sun & Dickinson (1994) dégagent les effets de l'atténuation du vent sur les rendements en pommes de terre, dans des systèmes de culture en bandes à l'abri de haies basses.

### 1.1.3. Des haies comme filtres géochimiques

Ce rôle des SLB est particulièrement intéressant dans le contexte régional de l'ouest de la France, et son étude implique

Parmi les recherches menées en Bretagne, citons les travaux de Carnet (1978) à l'échelle du versant et de Merot (1978) à l'échelle du bassin versant. Cette approche "sol" innovante et complexe a été reprise dans les années 90 (Merot & Bruneau, 1993) suite à l'apparition de nouveaux outils de modélisation, mais de nombreux aspects restent à développer.

L'effet de filtre proprement dit apparaît vis-à-vis de nutriments comme l'azote et le phosphore (Knauer & Mander, 1989 ; Ryszkowski, 1989; Ryszkowski *et al.*, 1989 ; Szpakowska & Zyczynska-Baloniak, 1994). Cependant, les structures impliquées efficacement dans l'épuration se rapprochent déjà plus de bandes boisées que des haies rencontrées dans le bocage breton. Il en va de même dans les travaux de Szpakowska & Zyczynska-Baloniak (1994) sur la migration de substances humiques. L'efficacité est d'autant plus grande que la bande boisée est large (de l'ordre de 10 m.).

*Vis-à-vis des métaux lourds*, Knauer & Mander (1990) mettent en évidence une fixation spécifique des métaux en fonction des formations végétales, plus importante pour le plomb et le chrome sous les bandes boisées d'aulnes et pour le cuivre sous les prairies naturelles. Là encore, la largeur de la formation, y compris celle de l'aulnaie, est prépondérante.

C'est chez des auteurs (Mette & Sattelmacher, 1994 ; Mette, 1993) travaillant dans le bocage du Schleswig-Holstein que l'on trouve une des seules études portant sur le rôle des haies sur la dynamique de l'azote en zone agricole intensive. La réduction par la haie des quantités d'azote transitant dans un sol sableux semble faible (30-50 kg N/ha) du fait d'une faible extraction par les arbres et d'un recyclage dans la litière. Cependant les effets dépendent de la date de l'élagage, de l'âge de la formation et du choix des espèces. De plus l'orientation de la haie (est-ouest) induit une forte différence entre le nord et le sud de la haie du fait d'une demande climatique différenciée.

Enfin, un effet épurateur vis-à-vis des produits phytosanitaires est abordé par des auteurs comme Davis *et al.* (1994) qui suivent la dispersion d'un herbicide

(MCPA sur tomate et *Lychnis*) et d'un insecticide (cyperméthrine sur chenille) appliqués en aérosol, en fonction de la distance à une haie et en évaluent les différences d'impact au niveau biologique : ils relient le rôle de la haie (limitation des transferts de phytosanitaires) à sa hauteur et à sa densité. Des méthodes plus quantitatives ont aussi été conduites *ex situ* pour évaluer la capacité de prélèvement d'un herbicide par les végétaux et son devenir dans la plante (Nair *et al.*, 1993) ; les prélèvements d'atrazine marquée par des peupliers en bio-réacteurs semblent directement liés à la texture du sol.

#### 1.1.4. Les haies, éléments polyvalents (omnipotents ?) du paysage

Plusieurs articles de la bibliographie (Schaefer, 1988 ; Shatalov, 1988) décrivent les haies comme des éléments polyvalents essentiels de l'aménagement des bassins versants, pour lutter à la fois contre la sécheresse, l'érosion et la pollution des eaux. D'autres articles synthétiques (Stepanov & Malanina, 1988 ; Peev, 1988) sont de véritables hagiographies des haies, sans que les méthodes d'étude ou les résultats ne soient clairement explicités. Les haies ont un rôle globalement positif dans leurs fonctions micro-climatiques, hydrologiques, sanitaires, esthétiques...sans que ces multiples qualités ne soient justifiées autrement que par des observations ponctuelles.

## 1.2. Autres rôles, autres structures

Dans cette partie, on insistera sur les ripisylves associées à des SLB, et on développera brièvement les structures voisines que l'on peut rencontrer dans le contexte des zones tempérées humides.

### 1.2.1. Les ripisylves

*Ripisylves*, franges ou forêts rivulaires, cette terminologie décrit des formations boisées développées en zone de fond de vallée parallèlement aux berges de cours d'eau. Cette implantation particulière à l'interface eaux superficielles/eaux souterraines a motivé de nombreuses recherches, résumées dans un récent travail de

synthèse (Deconchat & Balent, 1993), axées sur les capacités de stockage, voire d'épuration des nutriments provenant de l'amont. Pour les éléments solubles comme les nitrates, les transferts et transformations se font au sein du sol par le biais de l'écoulement de sub-surface ; pour les éléments essentiellement absorbés ou en suspension (matières humiques en suspension, phosphore), les transferts se font par ruissellement de surface. Les capacités épuratrices dépendent notamment des flux d'eau traversant ces zones (Peterjohn & Correll, 1984 ; Vought *et al.*, 1991 ; Brunet *et al.*, 1994) ; elles sont variables en fonction de la saison (Pinay *et al.*, 1993) mais aussi de la géomorphologie, du micro-relief des zones rivulaires (Pinay *et al.*, 1989), facteurs qui influent sur le degré d'engorgement et donc sur l'activité de la microflore du sol et sur les prélèvements par la biomasse aérienne. La géomorphologie conditionne également un rôle alternatif source/puits vis-à-vis des nutriments et du carbone, et des potentiels de dénitrification variables en fonction des dépôts autorisés par la vitesse du courant (Pinay *et al.*, 1992).

En général, les études sur les ripisylves débouchent sur des propositions d'aménagement dans lesquelles *la largeur de la ripisylve* est décisive pour optimiser l'épuration. Plusieurs auteurs (Knauer & Mander, 1989 ; Vought *et al.*, 1991 ; Ryszkowski & Kedziora, 1993) avancent une largeur d'une dizaine de mètres. Peterjohn & Correll (1984) qui travaillent à l'échelle d'un bassin versant élémentaire de 3 ha, comparent les prélèvements d'une bande rivulaire de cinquante mètres de large avec celle des cultures ; Pinay *et al.* (1993) avancent des largeurs d'une trentaine de mètres ; Haycock *et al.* (1993) insistent sur l'efficacité maximale en lisière de bande boisée, dans les cinq premiers mètres. Quoi qu'il en soit, ces largeurs efficaces sont à rattacher aux surfaces drainées et au type d'occupation du sol, ce qui n'apparaît pas toujours nettement dans les publications. Les démarches suivies dans l'étude des ripisylves sont cependant intéressantes dans la mesure où certaines peuvent être appliquées à des SLB comme les haies.

### 1.2.2 Bandes herbeuses et zones humides

Sous le terme de bandes herbeuses, les auteurs regroupent parfois des prairies semées (Haycock & Pinay, 1993 ; Szpakowska & Zyczynska-Baloniak, 1994) ou des prairies humides permanentes (Knauer & Mander, 1990). Le plus souvent, ces différents travaux comparent l'efficacité des surfaces en herbe avec des surfaces boisées, et concluent à de moindres prélèvements des surfaces herbeuses, ce qui peut s'expliquer par une moindre exportation par la biomasse aérienne. Cependant, leur intérêt épurateur demeure, notamment vis-à-vis du phosphore, dont elles limitent le transport sous forme particulaire (Deconchat & Balent, 1993).

Selon le point de vue des pédologues (A.F.E.S., 1992) l'intérêt des cultures pérennes est à considérer en fonction du type de sol. Ainsi sur les sols colluviaux où la dynamique hydrique est essentiellement latérale, elles permettent de garantir la qualité des eaux contre la pollution agricole diffuse.

Les travaux se sont par ailleurs multipliés sur les zones humides en tant que structure épuratrice. La synthèse de Charbeaux (1994) reprend les principaux éléments susceptibles d'y être stockés et/ou transformés. Souvent localisées en position topographique basse, ces zones humides pourront être intégrées dans une démarche de compréhension globale du rôle des SLB sur un versant : en effet, les haies de bas-fonds accentuent souvent la limite entre zones saturées et zones drainées de versant.

### 1.2.3. Lisières et forêts alluviales

L'intérêt épurateur des lisières forestières a le plus souvent été étudié sur l'atmosphère : Draaijers *et al.* (1988) suivent l'évolution des teneurs de marqueurs (comme les ions sodium et chlorure) et de différents polluants atmosphériques en fonction de la distance à la lisière sous le vent. L'effet atténuateur en fonction de la distance à la marge est net et confirmé par les travaux sur les éléments soufrés ou azotés de Hasselrot & Grennfelt (1987),

Beier & Gundersen, (1989), Beier (1991), Neal *et al.* (1992).

Les *forêts alluviales*, formations végétales très spécifiques et complexes de par les associations végétales qui s'y développent - selon un gradient d'engorgement en eau des sols qui augmente lorsque l'on se rapproche du cours d'eau - constituent un site privilégié pour l'étude des zones d'échange entre écosystèmes terrestres et aquatiques. Trémolières *et al.* (1991) mettent en avant le rôle primordial de ces formations dans l'épuration des nappes souterraines. Cependant, des forêts à haute productivité comme les forêts alluviales *stricto sensu* se rencontrent assez peu dans le paysage breton...

### 1.3. En conclusion...

Il ressort de ce premier tour d'horizon que les formations végétales décrites ci-dessus apparaissent à l'origine, soit comme la conséquence d'une contrainte forte du milieu qui a empêché sa mise en valeur agricole (les forêts alluviales des zones riveraines), soit comme un aménagement anthropique répondant à des contraintes spécifiques - c'est le cas notamment des haies anti-érosives et brise-vent ; ce dernier rôle est d'ailleurs à l'origine de l'essentiel des recherches sur les haies au sens strict. Au-delà des vocations initiales de ces formations végétales, de nouvelles fonctionnalités - naguère accessoires ou ignorées - apparaissent, qui justifient l'intérêt actuel qui leur est porté.

Les travaux les plus avancés s'inscrivent dans un contexte de systèmes de production, cultures en bandes ou agroforesterie. La valorisation environnementale des SLB dans les zones tempérées est aujourd'hui centrée sur leur capacité de réduction des pollutions diffuses. Du fait d'un certain empirisme et des changements brutaux intervenus dans les dernières décennies, moult propriétés sont associées aux SLB, mais les études quantitatives manquent, notamment dans le domaine hydrologique à différentes échelles d'intégration et dans le domaine géochimique.

La plupart des méthodes quantitatives sont développées sur des formations complexes comme les forêts rivulaires ou les

zones humides, le fil directeur des propositions d'aménagement étant la notion de "largeur efficace". On pourra donc s'interroger sur la possibilité de les étendre aux structures linéaires rencontrées dans le bocage.

## 2. Quelles bases scientifiques pour quelles problématiques ?

L'objectif de cette deuxième partie est de recenser les bases scientifiques des différents points précédemment développés, en mettant en avant les méthodologies. On précisera l'échelle, les apports ou les limites des méthodes actuellement disponibles sur les fonctions hydrologiques et hydrochimiques du bocage et plus généralement des SLB.

### 2.1. Caractérisation des volumes pédologiques.

#### 2.1.1. Morphologie et fonctionnement hydrique

Dans de nombreuses publications, les caractéristiques des sols sont relativement peu développées, ce qui est paradoxal compte tenu de leur rôle de premier plan et légitime au regard du type de recherche non orientée exclusivement "sol". C'est le cas notamment chez Ryszkowski & Kedziora (1987) et Ryszkowski (1989) qui travaillent sur "*des sols légers, présentant des conditions favorables à l'infiltration (...)* et sur *des sols tourbeux à capacité de rétention de l'eau relativement élevée.*"

A l'échelle du versant et de la séquence de sols, Carnet (1978) s'est attachée à une description morphologique fine des volumes pédologiques de part et d'autre d'ensembles fossé-talus-haie. Des données physico-chimiques et des suivis du comportement physico-hydrique lui ont permis d'élaborer une première série d'hypothèses quant aux modifications apportées sur le sol et la circulation de l'eau. L'essentiel de ces travaux et

résultats qualitatifs et quantitatifs est repris sur la figure 2.1.

En terme de méthode, les observations ont été conduites sur des coupes transversales de haies perpendiculaires à la plus grande pente qui sont les seules d'après l'auteur à avoir un rôle sur la distribution des sols. Notons que la circulation des eaux n'est pas uniquement guidée par la plus grande pente (circulation tangentielle au ruisseau dans les fonds de vallée ; orientation modifiée par des structures géologiques ou pédologiques...) Ceci est à considérer dans l'évaluation de la valeur hydrologique des haies.

D'autre part, Carnet (1976) met en avant des mesures de perméabilité différentes entre l'amont et l'aval d'un talus; les perméabilités inférieures à l'amont pouvant s'expliquer par un colmatage de la porosité par les éléments fins colluviaux. L'étude morphologique a par ailleurs mis en évidence des plages hydromorphes au sein du talus, liées notamment à ces perméabilités différentielles, mesurées par la méthode Vergière. Ces premières observations à l'interface *circulation de l'eau / fonctionnement géochimique* semblent intéressantes à approfondir.

La circulation de l'eau sur les versants, tantôt verticale, tantôt latérale est cependant très dépendante du type de sol. Ceci confirme s'il en est besoin, l'importance d'une caractérisation morphologique et hydrodynamique des volumes pédologiques. Les travaux, axés essentiellement sur le sol des pays de bocage et sur son comportement hydrique, sont déjà anciens et n'ont pas été approfondis depuis la thèse de C. Carnet, si ce n'est dans la thèse de M. Baffet (1984) sur le bocage limousin. Celui-ci reprend les principales conclusions de Carnet, mais dans le contexte de sols beaucoup plus hydromorphes et imperméables, où les zones de haies fonctionnent comme des drains verticaux.

Une telle démarche morphologique qualitative assortie de données quantitatives est cependant délicate sur un milieu remanié comme un talus. Elle pose nombre de problèmes d'échantillonnage liés aux systèmes racinaires et à la représentativité des volumes dans les trois dimensions du talus. Elle reste cependant essentielle pour dégager des critères déci-

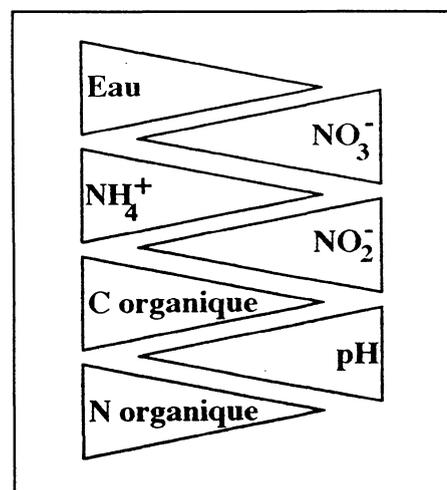
sifs dans la compréhension des circulations d'eau à l'échelle du versant, voire même du bassin versant élémentaire.

## 2.1.2. Fonctionnement bio- et géochimique...

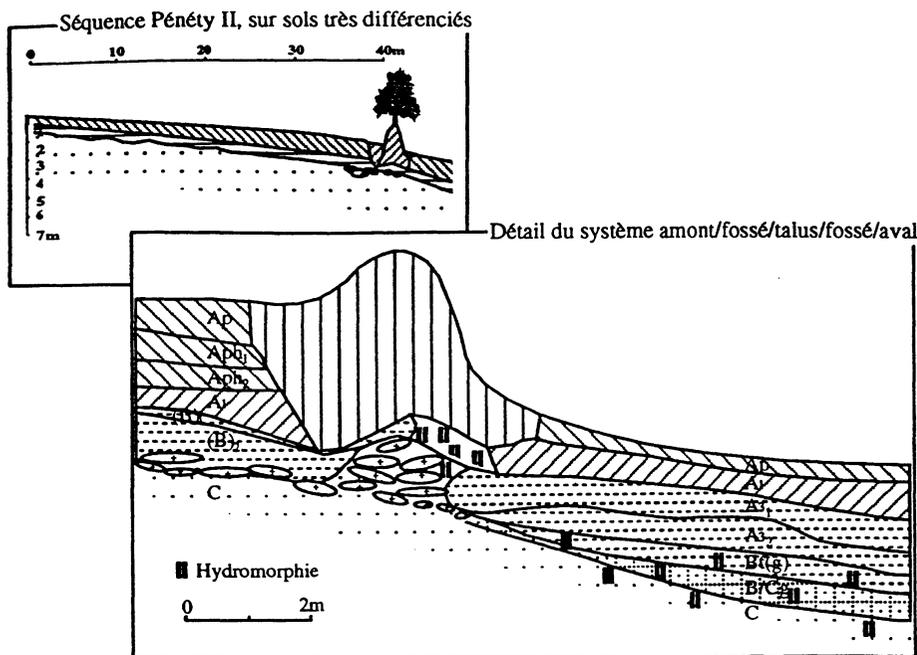
### 2.1.2.1...centré sur les caractéristiques intrinsèques du sol

Le plus fréquemment, les études centrées sur des processus d'épuration s'intéressent à un nombre réduit de propriétés du sol.

Dans le cas de la dénitrification par exemple, les trois conditions nécessaires et suffisantes (anaérobiose, carbone assimilable par les bactéries dénitrifiantes et nitrate en quantité non limitante) dépendent d'un ensemble de caractéristiques du sol : la matière organique est localisée dans les horizons superficiels, l'anaérobiose peut être exacerbée par certains types de structures et non limitée à des conditions topographiques... La figure 2.2., extraite de Pinay *et al.* (1989), reprend l'évolution conjointe des paramètres essentiels impliqués dans la dénitrification. On y retrouve le rôle des facteurs biotiques (formes de l'azote et carbone organique liés à l'activité de la microflore et aux apports de la biomasse aérienne) et des facteurs abiotiques (teneur en eau, pH liés à des caractéristiques intrinsèques du sol).



**Figure 2.2 :** Evolutions comparées de paramètres de la dénitrification (d'après Pinay *et al.*, 1989, modifié). Le graphique est présenté selon un gradient d'humidité des sols décroissant de la gauche vers la droite.



**DISTRIBUTION  
DES ORGANISATIONS PEDOLOGIQUES  
EN FONCTION DES TALUS/FOSSÉS**

**Méthodologie**

- Suivi des variations des caractères pédologiques de part et d'autre du système amont/fossé/talus/aval
  - épaisseur des horizons & texture
  - densités apparentes & perméabilités Vergière
- Analyse de la sédimentation des fossés

**Conclusions essentielles**

- Interruption nette de la séquence de sols entre l'amont et l'aval
  - Horizons organiques plus épais à l'amont
  - Texture des horizons hémi-organiques à l'aval peu différente de la texture des horizons minéraux amont
  - Pour un même horizon,
    - Densité apparente AMONT < Densité apparente AVAL
    - Perméabilités plus élevées en AVAL (Colmatage)
- Erosion différentielle : tri des argiles et des limons fins accumulés en amont des haies : pas de perte définitive hors versant

**Remarques...**

- Les talus perpendiculaires sont associés à des limites pédologiques ou géologiques : empirisme dans l'implantation des haies, mais aussi hypothèse que les volumes pédologiques soient liés à une rupture antérieure aux haies/talus/fossé.
- Problème de la généralisation aux talus obliques (haies dans le sens de la pente considérés sans effet sur la circulation de l'eau...)

**ETUDE DU REGIME HYDRIQUE  
EN FONCTION DES TALUS/FOSSÉS**

**Méthodologie**

- Suivi des humidités volumiques en fonction de la saison (bilan hydrique selon données locales), et selon une gamme de pF (2, 2.5, 3, 3.7, 3.9 et 4.2)
- Calcul des quantités d'eau stockées par horizon. Les variations stocks permettent de déduire des flux :
  - negatifs : il y a déficit par ruissellement ou drainage vers l'aval
  - positifs : il y a excès et apport par drainage oblique ou ruissellement de l'amont
  - nuls : il y a stockage.

**Conclusions essentielles**

- Confirmation du rôle des talus comme barrage contre l'érosion
- PROBABLEMENT, rôle de drain vertical lié au système racinaire : limitation du drainage oblique
- Rôle évaporatoire + écran par rapport aux pluies

**Remarque...**

- Quelles sont les redistributions entre l'amont et l'aval : il est difficile d'avancer des hypothèses de passage d'un volume du talus vers l'autre comme dans le cas des versants...

**Figure 2.1 : Méthodes et résultats développés par Carnet (1976, 1978).**

Légende du système amont/fossé/talus/fossé/aval :

Ap, A1 : horizons organiques

(B) : horizon d'accumulation

A2, A3 : h. lessivés

C : arène granitique

C'est dans ce contexte d'interactions que Bergström & Beauchamp (1993a, 1993b), dans un modèle empirique, prédisent le taux de dénitrification en fonction de la teneur en eau du sol et de sa porosité, deux facteurs jugés décisifs sur la pression partielle en oxygène et par là même sur l'activité des bactéries dénitrifiantes. Le modèle appliqué au milieu cultivé répond à l'objectif, sans toutefois expliquer des variations saisonnières de la dénitrification, les auteurs n'ayant pas considéré les variations temporelles des populations de micro-organismes.

D'autres travaux conduits sur des *ripisylves* (Pinay *et al.*, 1989), expliquent, par une analyse de la teneur en eau des sols à l'échelle de l'agrégat, comment des sols globalement non saturés permettent cependant la dénitrification : *des microsites saturés peuvent coexister avec des zones non saturées. C'est par exemple le cas de stations non saturées où des microsites saturés présentent des conditions anaérobies.* Les auteurs s'intéressent à l'influence de l'engorgement de sols bruns lessivés sur les cycles du carbone et de l'azote, et suivent la teneur en eau mesurée à différentes profondeurs du sol. Les échantillons qui ont une teneur en eau supérieure à celle obtenue à la capacité au champ sont considérés plus ou moins sujets à des processus anaérobies. On peut relever que l'étude est conduite sur des échantillons prélevés à différentes profondeurs, mais non en fonction de volumes pédologiques décrits et caractérisés. Enfin, comme l'a montré Pinay (1994), c'est l'apport de nitrate qui est le facteur limitant des processus de dénitrification dans les zones immergées en permanence. La minéralisation de l'azote bloquée au stade  $\text{NH}_4$  en anaérobiose limite la disponibilité en azote pour les organismes dénitrifiants.

Dans le même esprit, Pinay *et al.* (1994) comparent deux *forêts rivulaires* au même stade de végétation et dans des situations morphologiques quasi identiques. La différence porte sur la vitesse du courant qui n'autorise pas le même type de sédimentation (limon fin dans un site, sable dans l'autre). Les dépôts sont plus importants dans ce dernier site, mais l'azote total présent est plus important sur la station limoneuse (63.9  $\text{g/m}^2$  contre 49.6  $\text{g/m}^2$ ). Les taux de dénitrification annuels *in situ*

sont trois fois plus élevés sur le site limoneux que sur le site sableux, et ont suffi à épurer une quantité équivalente à environ 50% de l'azote présent. Ces résultats mettent en avant que le pourcentage d'azote total dénitrifié annuellement est corrélé à la granulométrie des sédiments, liée elle-même à la géomorphologie du site.

Ces méthodes basées sur la texture des matériaux peuvent être appliquées à l'étude des haies, d'autant plus que les caractéristiques édaphiques y sont très spécifiques (lessivage plus intense des talus, colluvionnement, volumes remaniés) et sans doute déterminantes dans les processus d'épuration.

### **2.1.2.2...en interaction avec la microflore du sol et la biomasse aérienne**

Dire que les relations sol/eau/plante sont primordiales dans ce contexte est un lieu commun. Ces interactions se font à plusieurs niveaux : un niveau souterrain (microflore du sol ET systèmes racinaires des végétaux supérieurs) et un compartiment aérien (évapotranspiration et constitution de la biomasse épigée). Le cycle des nutriments azotés est ainsi marqué par deux mécanismes : les prélèvements pour l'élaboration de biomasse et la dénitrification par la microflore.

Dans le cadre des SLB, très peu de travaux se sont intéressés à l'interface sol/racine, qui paraît pourtant essentielle à considérer par les modifications apportées à la structure du sol et par les volumes explorés pour les prélèvements minéraux. On dispose certes de caractérisations pédologiques fines et d'une typologie phyto-écologique précise des haies et des talus armoricains (Rozé, 1976). Le système racinaire apparaît brièvement dans les descriptions de la macroporosité ; on en parle pudiquement dans les prélèvements d'eau et de nutriments, mais peu ont cherché à préciser ses rôles qualitatifs et quantitatifs : Mette & Sattelmacher (1994) cartographient la densité racinaire des cultures et des arbres en fonction de la distance à la haie ; Lucot (1994) montre l'existence conjointe chez certains ligneux forestiers (chêne) de deux systèmes racinaires, un profond et un traçant agissant

alternativement sur les prélèvements d'eau.

Différents auteurs proposent des méthodes pour l'estimation des prélèvements par les végétaux supérieurs (Richardson B., 1993) ; Trémolières *et al.* (1991) mettent en oeuvre des analyses foliaires qui permettent un suivi saisonnier de l'azote et du phosphore au cours du cycle végétatif. Dans le cadre des forêts rivulaires, Pinay *et al.* (1993) insistent sur un point essentiel : *bien que la végétation des rives soit impliquée dans la rétention de l'azote par prélèvement, ceci constitue seulement une phase transitoire de rétention, une large part de cet azote retournant au sol sous forme de litière, surtout dans les forêts parvenues à un stade climacique. La dénitrification par les micro-organismes reste donc le processus clé.* Par ailleurs, il n'apparaît pas toujours clairement dans la bibliographie ce que l'on entend par *capacité de stockage par les végétaux* (Haycock & Pinay, 1993), capacité mesurée par différence entre une concentration entrante et une concentration sortante au travers d'une formation végétale (bande herbeuse, bande boisée...). Ce stockage peut être transitoire notamment vis-à-vis du phosphore pour lequel il n'existe pas de consommation de luxe par les végétaux mais pour lesquels il existe une possibilité de relargage avec les MES au cours d'épisodes climatiques intenses.

L'activité de la microflore du sol est essentiellement perçue quantitativement par le biais des taux de dénitrification mesurés *in* ou *ex situ*. Dans leur comparaison de deux sols rivulaires, Ambus & Lowrance (1991) mettent en évidence que la majeure partie de la dénitrification se fait dans les deux premiers centimètres du sol, et que l'addition de nitrates révèle un potentiel largement supérieur au taux mesuré.

Pinay *et al.* (1993) multiplient les variables descriptives de l'activité dénitrifiante. Des aliquotes ont servi à déterminer les "*Equivalents Glucose Extractible*" (EGH) considérés comme un index du carbone disponible. Le taux de dénitrification *in situ* est mesuré par inhibition à l'acétylène. (Pinay *et al.*, 1993). Il est calculé comme le taux d'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) accumulé dans l'atmosphère d'une carotte

de sol entre 4 et 8 heures après un apport d'acétylène. L'activité des enzymes dénitrifiantes a été mesurée en remaniant les échantillons et en les incubant dans des boîtes hermétiques pendant 8h à 10°C (température moyenne du sol). Le taux de dénitrification mensuel pour une station donnée a été estimé par régression multiple en utilisant les paramètres du sol mesurables mensuellement. Les paramètres du sol pris en compte sont notamment la teneur en eau, l'activité des enzymes dénitrifiantes, la teneur en nitrate ou en ammonium, ou l'azote total, le potentiel de minéralisation de l'azote, les E.G.H.

Hormis les taux de dénitrification, les méthodes développées s'inscrivent souvent dans des approches de type boîte noire, où l'on compare les apports et les exportations d'éléments. Le système sol/plante a tout d'un "objet complexe", soumis de surcroît à un rythme saisonnier capital dans l'interprétation de la variabilité des processus, qu'il s'agisse de dénitrification ou de prélèvements racinaires. Dans le cas des haies comme des ripisylves, des mesures diachroniques *in situ* sont à privilégier.

## 2.2. Approche hydrologique : de la géomorphologie à la micro-topographie

Plusieurs auteurs ont été conduits à aborder les flux d'eau et de matière, et à utiliser des concepts physiques qui rentrent habituellement dans le cadre de l'hydrologie. Pinay *et al.* (1989) ont été amenés à décrire finement la topographie d'une zone rivulaire pour expliquer la variabilité observée dans la dynamique de l'azote et du carbone et sous-tendue par les successions végétales. Ce sont des variations micro-topographiques, de l'ordre de quelques centimètres qui conduisent à une variabilité en mosaïque des conditions de dénitrification, du fait de la présence ou non d'une zone aérée au-dessus de la surface libre de la nappe. Cette étude sera suivie, à une autre échelle, de travaux sur l'influence de la géomorphologie (Pinay *et al.*, 1992 ; 1994) qui insisteront sur les caractéristiques propres aux cours d'eau (vitesse de courant) et sur l'importance des zones d'échanges entre la nappe de

soutien du cours d'eau et l'eau de surface ou de sub-surface, dans une optique de continuité entre les différents compartiments d'eau. Cette interface appelée zone hyporhéique apparaît essentielle dans la dilution des solutés (Vought *et al.*, 1991). L'extension des zones saturées, essentielle dans la régulation des flux est aussi sous le contrôle de la géomorphologie (Merot & Bruneau (1993).

Avec les haies et les ripisylves comme objet d'étude, Ryskowski & Kedziora (1993) abordent l'hydrologie à l'échelle du versant par le biais de leur approche cli-

matologique. Partant de l'hypothèse que plus l'ETP est élevée, plus les effets de la formation végétale sur les flux d'eau des nappes sont importants, les auteurs étudient le rôle des écotones sur la concentration en éléments chimiques de la nappe. La méthode mise en œuvre reprend les paramètres du flux hydrique (précipitation, ruissellement, évaporation, infiltration) et des propriétés du sol (conductivité, porosité efficace, épaisseur de la couche aquifère). Ils en déduisent un flux journalier par unité de longueur de haie ( $J$  en  $m^3/j$ ) tel que :

---

<b><math>J = K * n_e * D(dh/dl)</math></b>	K : conductivité hydraulique (m/j) $n_e$ : porosité efficace de la couche aquifère ( $m^3/m^3$ ) D : épaisseur de l'aquifère (m) dh/dl : gradient hydraulique de la nappe
--	--

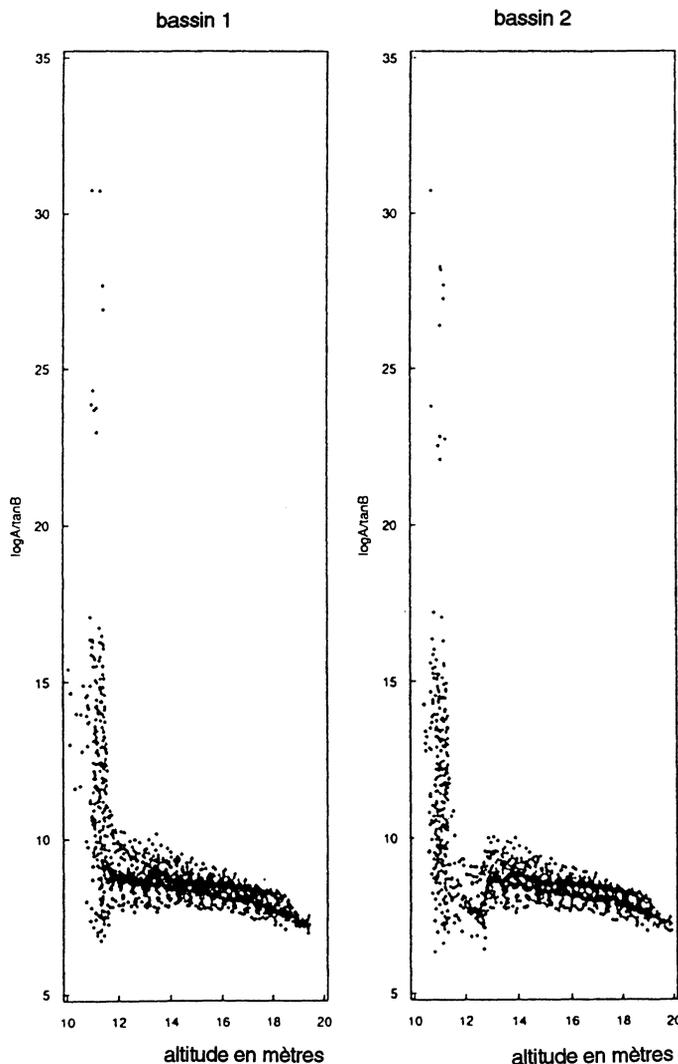
---

Par suite, ces auteurs font intervenir dans ce flux un taux d'ETP journalier et la largeur de la formation végétale, ce qui leur permet d'évaluer un coefficient "r" dit de "rabattement du flux souterrain". La valeur de "r" renseigne sur l'efficacité de la régulation des flux. Ainsi, par une journée ensoleillée et sur une pente accusée, une haie limite 1,5 fois plus le flux qu'une bande herbeuse car elle évapo-transpire plus ; par une journée nuageuse et sur une pente faible, les deux formations auront la même efficacité...

A l'échelle de bassins versants élémentaires, les travaux de Merot se sont orientés selon deux axes de recherche : la comparaison hydrologique de deux bassins versants différents par leur état d'embocagement (Merot, 1978) et plus récemment la modélisation de l'influence des haies sur le ruissellement de surface d'un bassin versant théorique (Merot & Bruneau, 1993). Il démontre en 1978, sur des bassins versants élémentaires granitiques, l'influence du bocage sur la régulation des crues : stabilité du coefficient de ruissellement, pointe de crue plus faible en bassin bocager, influence réduite de l'intensité des pluies ; Il avance également des hypothèses sur une régulation hydrologique à des échelles de temps plus grandes (soutien des étiages plus fort en zone

bocagère). Le talus de ceinture de fond de vallée est la structure qui semble jouer un rôle primordial. Les suivis géochimiques de Merot (1976, non publiés) soulignent la complexité des interactions entre variabilité géochimique et échelle de temps considérée (crue, récession, étiage...) selon le type de bassin (bocager ; non bocager), mais ce sont de premiers éléments à préciser.

L'étude menée sur un modèle théorique de bassin bocager renseigne sur l'influence du bocage sur la probabilité de saturation des sols et donc sur leur aptitude à ruisseler. La figure 2.3. permet de visualiser un indice de saturation potentielle (l'indice de Kirkby, qui prédit la saturation locale en eau en fonction de la zone d'alimentation en amont du point considéré et de la pente locale) selon différents scénarios bocagers. Parmi les conclusions, Merot & Bruneau confirment la limitation de l'extension des zones saturées des fonds de vallée par les SLB, et un effet tampon sur les crues indépendant de l'intensité des pluies. Parmi les difficultés de la méthode pour des cas réels, les auteurs citent le problème du pas des Modèles Numériques de Terrain actuellement disponibles, qui ne permet pas toujours d'intégrer efficacement les haies.



**Figure 2.3 :** Distribution de l'indice de Kirkby (indice de saturation potentielle) en fonction de l'altitude pour un bassin non bocager (bassin 1) et un bassin présentant un talus sur la courbe de niveau 12,5 m (bassin 2).

Pour les fortes probabilités de saturation (Indice>12), il n'y a pas de différence.

Pour les probabilités de saturation moyennes (9<Indice<13), l'extension de la saturation est limitée vers l'amont par le talus (tiré de Merot et Bruneau, 1993).

### 2.3. Remarques générales

Dans la plupart des articles, les auteurs avancent des "largeurs efficaces" pour l'élimination de tout ou partie de l'azote, du phosphore... Or, on dispose souvent de peu de détails sur ce qui se passe à l'amont de ces bandes boisées : quels sont les types d'apports et surtout leur quantité, à quelle longueur de pente et à quelle surface drainée correspondent-ils, trouve-t-on des SLB en amont sur ces pentes...? Une caractérisation plus précise du milieu semble nécessaire, comme celle fournie par Szpakowska & Zyczynska-Baloniak (1994) dans leur suivi des migrations de substances humiques (carte de localisation précise des différentes zones tampons, plans d'échantillonnage...).

D'une façon plus générale, il importe de resituer la haie dans le paysage, pour caractériser les relations avec d'autres éléments. Ainsi, sa place par rapport à la nappe d'eau est déterminante.

A l'échelle locale, les travaux traitant de l'impact des racines sur la morphologie du sol des talus sont rares. Leur importance, notamment sur la macroporosité (orientations préférentielles ? drainage ?) est essentielle. Comment cet impact est-il susceptible de varier en fonction des espèces et de leur âge ?

Les données de caractérisation des sols sont déjà anciennes et très ponctuelles. Or, une approche géologique et édaphique est à la base de l'analyse hydrologique globale. Il est important de mieux faire le lien entre l'organisation morphologique et les caractéristiques hydrodynamiques des volumes pédologiques au droit des SLB.

Enfin, si les études hydrologiques ont permis d'identifier les fonctions du bocage, les conclusions ne permettent ni une quantification des impacts, ni une modélisation fonctionnelle intégrant le rôle des SLB à l'échelle de bassins versants.

### 3. Perspectives de recherche et conclusion

Le bilan de cette recherche bibliographique fait apparaître 3 points marquants :

- un volume de travaux globalement très réduit sur les fonctions hydrologiques et géochimiques des SLB, parfois partielle-

ment compensé par des recherches abondantes dans des domaines connexes.

Ce déficit est particulièrement net :

- sur la connaissance des processus géochimiques au droit des SLB ;
- sur la quantification de l'impact des SLB sur les processus de régulation hydrologique.

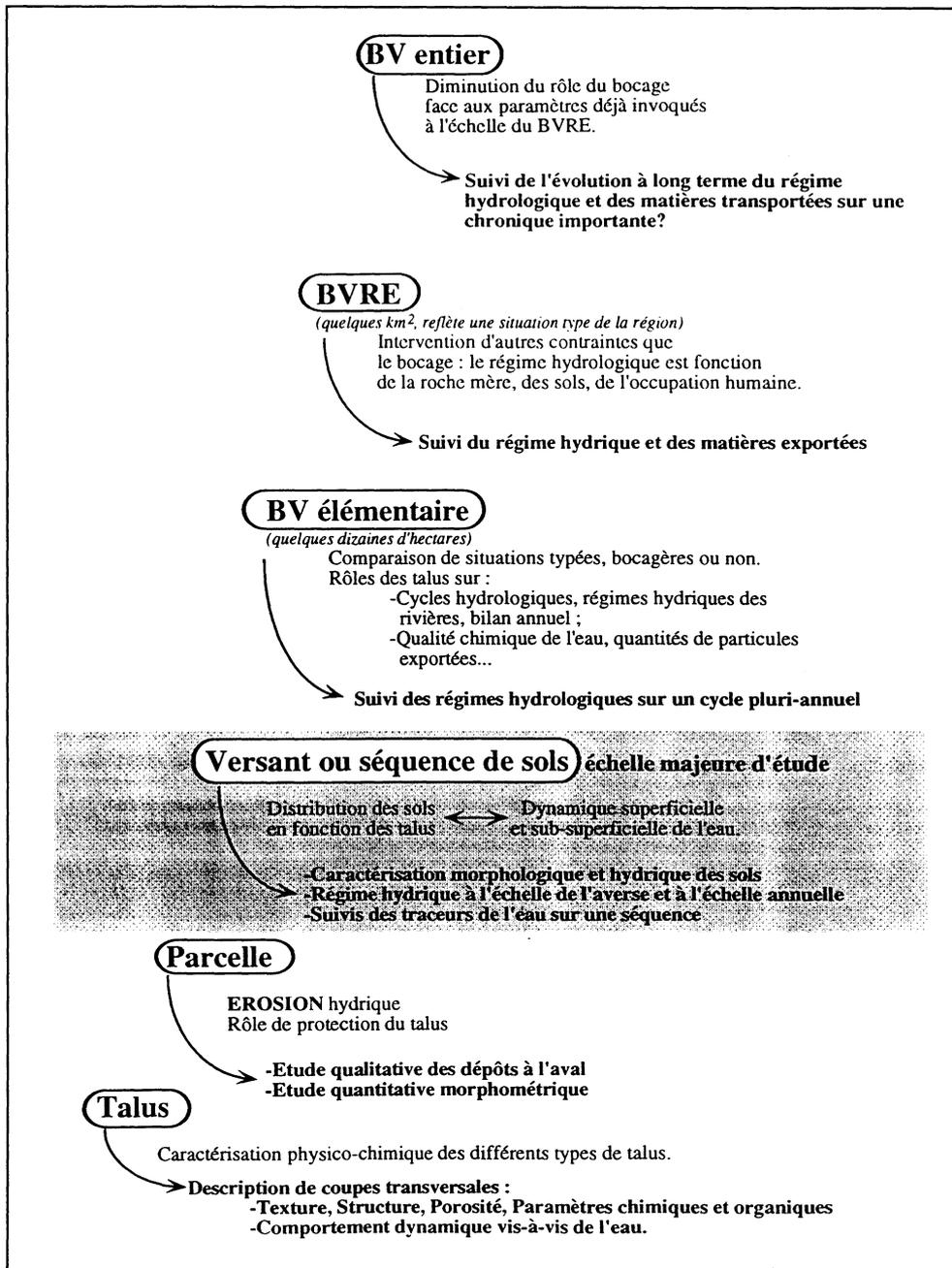
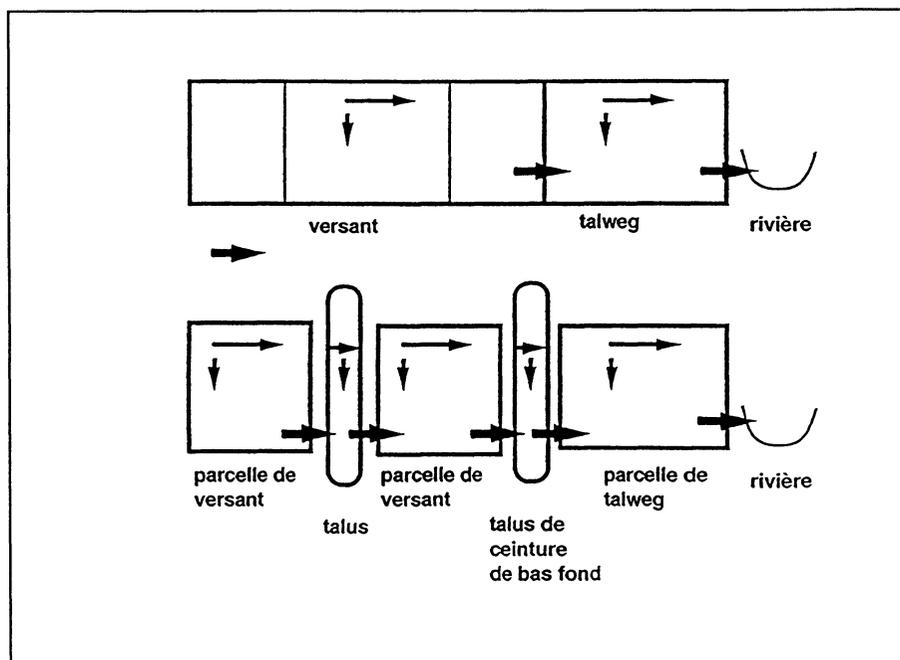


Figure 3.1 : D'une échelle d'étude à l'autre



**Figure 3.2 :** Le bocage comme la segmentation d'un espace organisé : le bassin versant est un milieu organisé ; p.e. présence d'un versant et d'un talweg, sièges d'écoulements verticaux et latéraux, séparés par une limite (entre les sols sains et les sols hydromorphes). La présence de haies crée de nouvelles limites - talus de versant - ou renforce les limites existantes - talus de ceinture de bas fond - et modifie les voies de circulation de l'eau.

Ainsi la prise en compte des SLB dans l'aménagement rural actuel et futur passe par une meilleure caractérisation de ces fonctions de régulations hydrologique et géochimique évoquées précédemment. De nouveaux outils d'investigation permettent d'aborder cette problématique de façon renouvelée : modélisation hydrologique distribuée, systèmes d'information géographique (Kesner B.T. and Meentemeyer V., 1989), capteurs *in situ*, traceurs...

Sans entrer dans le détail d'une programmation de recherche, on soulignera l'intérêt de développer des recherches dans les domaines suivants (figures 3.1 et 3.2) :

- au niveau local de la haie :

. l'influence des SLB sur les caractéristiques structurales et hydrodynamiques des sols et sur les flux d'eau.

. Les capacités épuratrices des SLB vis-à-vis de l'azote, notamment par dénitrification. L'optimisation des fonctions épuratrices de SLB, en jouant soit sur la structure de la haie, soit sur sa situation

géographique et sa synergie avec le milieu environnant, devrait être recherchée.

- au niveau du bassin versant :

. l'établissement d'une typologie hydrologique des haies, leur accordant une valeur hydrologique.

. La prise en compte du réseau de haies dans la modélisation hydrologique distribuée. L'établissement de différents scénarios d'aménagement devrait ainsi permettre de quantifier l'impact des SLB sur le régime hydrologique.

. L'analyse par des traceurs de l'environnement de la perturbation des chemins de l'eau créée par un réseau de haies.

Le bilan conduit ici met en avant la rareté des travaux spécifiques sur l'impact environnemental des haies vis-à-vis de la ressource en eau en climat tempéré. Le manque d'intérêt passé pour les questions environnementales, les objectifs initiaux de la constitution de haies dans les zones d'occupation agricole ancienne, l'opposition naguère forte des élites agricoles vis-

à-vis du bocage en sont sans doute quelques explications.

A l'issue de cette synthèse bibliographique, deux pistes de recherche apparaissent actuellement prioritaires : le rôle biogéochimique de la haie, qui doit être abordée de façon expérimentale, la quantification du rôle hydrologique des réseaux de haies, qui doit être abordée par une démarche de modélisation hydrologique distribuée.

Enfin, dans une optique de réintroduction de SLB au sein du milieu rural, une réflexion sur les relations entre les SLB et les activités agricoles, et sur le mode de gestion des haies doit être associée à l'étude du rôle fonctionnel de ces haies. En effet, du mode de gestion (présence-absence, structure, entretien, utilisation des parcelles connexes) dépendent largement l'avenir et les caractéristiques fonctionnelles des SLB.

## Bibliographie

- A.F.E.S.**, 1992. Référentiel Pédologique. Principaux Sols d'Europe. Coll. Techniques et Pratiques. INRA Editions, Paris, 222 pp.
- Ambus P. & Lowrance R.**, 1991. Comparison of denitrification in two riparian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 994-997.
- Baffet M.**, 1984. *Influence de la haie sur l'évolution des caractères physico-chimiques et hydrodynamiques des sols*. Thèse univ. Limoges 173p.
- Beier C.**, 1991. Atmospheric pollutants : separation of gaseous and particulate dry deposition of sulfur at a forest edge in Denmark. *J. Environ. Qual.*, 20, 460-466.
- Beier C. & Gundersen P.**, 1989. Atmospheric deposition to the edge of a spruce forest in Denmark. *Environ. Poll.*, 60, 257-271.
- Bergström D.W. & Beauchamp E.G.**, 1993. -a- An empirical model of denitrification. *Can. J. Soil Sci.*, 73, 421-431.
- Bergström D.W. & Beauchamp E.G.**, 1993. -b- Relationships between denitrification rate and determinant soil properties under barley. *Can. J. Soil Sci.*, 73, 567-578.
- Brunet R.C., Pinay G., Gazelle F. & Roques L.**, 1994. Role of the floodplain and riparian zone in suspended matter and nitrogen retention in the Adour river, south-west France. *Regul. Riv.*, 9, 55-63.
- Carnet C.**, 1976. Rôle du bocage sur la distribution des sols et la circulation de l'eau dans les sols. In : *Les bocages : histoire, écologie, économie*. Table ronde CNRS « aspects physiques, biologiques et humains des écosystèmes bocagers des régions tempérées humides ». INRA, ENSA, Université de Rennes, 5-7 Juillet 76. 159-162
- Carnet C.**, 1978. *Etude 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.
- Charbeaux P.**, 1994. *Rôle épurateur des zones humides vis-à-vis des pollutions diffuses d'origine agricole; étude bibliographique*. Mémoire INRA Sol Rennes, Univ. Orléans, Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux, 29p.
- Chen Xiquan, Xiu Lianji, Guan Jiyu, Zhang Wei & Xu Guishu**, 1990. The effects of windbreak on soil moisture in West Heilongjiang province. Inter. Symp. Windbreak and agroforestry, Harbin, China. 174-179.
- Davis B.N.K., Brown M.J., Frost A.J., Yates T.J. and Plant R.A., 1994. The effects of hedges on spray deposition and on the biological impact of pesticide spray drift. *Ecotoxic. & Environ. Safety*, 27, 283-293.
- Deconchat M. & Balent G.**, 1993. Les boisements des terres agricoles comme outil de gestion écologique du paysage : synthèse bibliographique des effets des bois sur la biodiversité et les flux de pollutions agricoles. Publication INRA Toulouse, SOLAGRO, 97p.
- Ding Guifang & Zhang Yuhua**, 1990. Effects of shelterbelt network on soil moisture. Inter. Symp. Windbreak and agroforestry, Harbin, China. 180-185.
- Draaijers G.P.J., Ivens W.P.M.F. & Bleuten W.**, 1988. Atmospheric deposition in forest edges measured by monitoring canopy throughfall. *Water, Air and Soil Pollution*, 42, 129-136.
- Hasselrot B. & Grennfelt P.**, 1987. Deposition of air pollutants in a wind-exposed forest edge. *Water, Air and Soil Pollution*, 34, 135-143.

- Haycock N.E. & Pinay G., 1993.** Groundwater nitrate dynamics in grass and poplar vegetated riparian buffer strips during the winter. *J. Environ. Qual.*, 22(2), 273-278.
- Haycock N.E., Pinay G. & Walker C., 1993.** Nitrogen retention in river corridors : european perspectives. *Ambio*, 22(6), 340-346.
- Hulugalle N.R. & Ndi J.N., 1994.** Changes in soil properties of a newly-cleared Ultisol due to establishment of hedgerow species in alley cropping systems. *Journ. of Agr. Sc.*, Cambridge, 122, 435-443.
- Jacobs T.C. & Gilliam J.W., 1985.** Riparian losses of nitrate from agricultural drainage waters. *J. Environ. Qual.*, 14(4), 472-478.
- Johnston C.A., detenbeck N.E. & Niemi G.J., 1990.** The cumulative effect of wetlands on stream water quality and quantity : a landscape approach. *Biogeochem.*, 10, 105-141.
- Kedziora A., Olejnik J. & Kapuscinski J., 1989.** Impact of landscape structure on heat and water balance. *Ecol. Intern. Bull.*, 17, 1-17.
- Kesner B.T. and Meentemeyer V., 1989.** A regional analysis of total nitrogen in an agricultural landscape. *Landscape Ecology*, 2(3), 151-163.
- Knauer N. & Mander U., 1989.** Studies on the filtration effect of differently vegetated buffer strips along inland waters in Schleswig-Holstein; 1.-filtration of nitrogen and phosphorus. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 30(6), 365-376.
- Knauer N. & Mander U., 1990.** Studies on the filtration effect of differently vegetated buffer strips along inland waters in Schleswig-Holstein; 2.-information : filtration of heavy metals. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 31(1), 52-57.
- Korwar G.R. & Radder G.D., 1994.** Influence of root pruning and cutting interval of *Leucaena* hedgerows on performance of alley cropped rabi sorghum. *Agrofor. Systems*, 25, 95-109.
- Lal R., 1989.** Agroforestry systems and soil surface management of a tropical alfisol : water infiltrability, transmissivity and soil water sorptivity. *Agrofor. Systems*, 8(3), 217-238.
- Lucot E., 1994.** *Influence des caractéristiques de la pierrosité des sols sur la prospection racinaire et l'alimentation hydrique des arbres : application à l'estimation de la valeur des sols forestiers.* Thèse Doc. Univ. Franche-Comté, Mention Science de la Nature et de la Vie, 101p+annexes.
- Merot Ph., 1978.** *Bocage : sols et eau, Tome 1. Le bocage en Bretagne granitique, une approche de la circulation des eaux.* Thèse de Doctorat IIIème cycle, Rennes, 199p.
- Merot Ph., 1992.** Bocage et Hydrologie. Actes du colloque Bocage 2000, Rostrenen (en cours de publication).
- Merot Ph. & Bruneau P., 1993.** Sensitivity of bocage landscapes to surfaces run-off: application of the Kirkby index. *Hydrol. Process.*, 7.
- Merot Ph. & Ruellan A., 1980.** Pédologie, hydrologie des bocages : caractéristiques et incidences de l'arasement des talus boisés. *B.T.I.*, 353/355, 657-689.
- 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.
- Mette R., 1993.** Yield formation and nutrient uptake by corn and oats in the hedgerow - field crop interface, consequences for nutrient and water balances with special regard to root ecology of both arable crops and hedgerow vegetation. Verlag Ukrieh E. Grauer, Wendlingen, 126 pp.
- Nair D.R., Burken J.G., Licht L.A. & Schnoor J.L., 1993.** Mineralization and uptake of triazine pesticide in soil-plant systems. *J. Environ. Engineer.*, 119(5), 842-854.
- Neal C., Robson A.J., Hall R.L., Ryland G.P., Conway & T.Neal M., 1991.** Hydrological impacts of hardwood plantation in lowland Britain: preliminary findings on interception at a forest edge, Black Wood, Hampshire, southern England. *J. Hydrol.*, 127, 349-365.
- Neal C., Robson A.J., Bhardwaj C.L., Conway T., Jeffery H.A., Neal M., Ryland G.P., Smith C.J. & Walls J., 1993.** Relationships between precipitation, stemflow and throughfall for a lowland beech plantation, Black Wood, Hampshire, southern England: findings on interception at a forest edge and the effects of storm damage. *J. Hydrol.*, 146, 221-233.
- Neal C., Ryland G.P., Conway T., Jeffery H.A., Neal M., Robson A.J., Smith C.J., Walls J. & Bhardwaj C.L., 1992.** Interception of chemicals at a forest edge for a rural low-lying site, Black Wood, Hampshire, southern England. *The Science of the Total Environment*, 142, 127-141.

- Patil V.C., 1988.** Competition for moisture and light in an agroforestry system. *In* : Brandle *et al.* (Eds.), Windbreak and Technology, Proceedings of an International Symposium, Lincoln, June 1986, 171-174.
- Peev B., 1988.** The ecological role of the shelterbelts in the republic of Bulgaria. *In* : Brandle *et al.* (Eds.), Windbreak and Technology, Proceedings of an International Symposium, Lincoln, June 1986, 110-113.
- Peterjohn W.T. & Correll D.L., 1984.** Nutrient dynamics in an agricultural watersheds: observations on the role of a riparian forest. *Ecology*, 65(5), 1466-1475.
- Pinay G., Decamps H., Arles C. & Lacassin-Seres M., 1989.** Topographic influence on carbon and nitrogen dynamics in riverine wood. *Arch. Hydrobiol.*, 114(3), 401-414.
- Pinay G., Fabre A., Vervier Ph. & Gazelle F., 1992.** Control of C, N, P distribution in soils of riparian forests. *Landscape Ecology*, 6(3), 121-132.
- Pinay G., Haycock N.E., Ruffinoni C. & Fabre A., 1994.** The role of denitrification in nitrogen removal in river corridors. *In* : Mitsch W.J. (Ed.), Global Wetlands : Old World and New, Elsevier Science B.V., 107-116.
- Pinay G., Roques L. & Fabre A., 1993.** Spatial and temporal patterns of denitrification in a riparian forest. *J. of Appl. Ecol.*, 30, 581-591.
- Richardson B., 1993.** Vegetation management practices in plantation forests of Australia and New Zealand. *Can. J. For. Res.*, 23, 1989-2005.
- Rozé, 1976.** Etude phytoécologique préliminaire des talus de Bretagne. *In* : Les bocages : histoire, écologie, économie. Table ronde CNRS « aspects physiques, biologiques et humains des écosystèmes bocagers des régions tempérées humides ». INRA, ENSA, Université de Rennes, 5-7 Juillet 76. 247-254.
- Ryszkowski L., 1989.** Control of energy and matter fluxes in agricultural landscapes. *Agric., Ecosys. & Environ.*, 27, 107-118.
- Ryszkowski L., 1990.** Ecological guidelines for management of rural areas in Poland. *In* : Grodzinski W. *et al.*, (Eds.), Ecological risks: perspectives from Poland and the United States, National Academy Press., 249-264.
- Ryszkowski L., 1992.** Energy and material flow across boundaries in agricultural landscapes. *In* : Hansen A.J. and Di Castri, (Eds.), Landscape boundaries: consequence for biotic diversity and ecological flows, Springer-Verlag, New-York, 270-281.
- Ryszkowski L., 1993.** Soil erosion and conservation in Poland. *In* : Pimentel D. (Ed.), World soil erosion and conservation, Cambridge University Press, 217-232.
- Ryszkowski L. & Bartoszewicz A., 1989.** Impact of agricultural landscape structure on cycling of inorganic nutrients. *In* : Clarholm M. *et al.* (Eds.), Ecology of arable land, Klüwer Academic Publishers, 241-246.
- Ryszkowski L., Karg J., Szpakowska B. & Zyczynska-Baloniak I., 1989.** Distribution of phosphorus in meadow and cultivated field ecosystems. *In* : Tiessen H. (Ed.), Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems, Regional Workshop 1 : Europe, 178-192.
- Ryszkowski L. & Kedziora A., 1987.** Impact of agricultural landscape structure on energy flow and water cycling. *Landscape Ecology*, 1(2), 85-94.
- Ryszkowski L. & Kedziora A., 1991.** Ecological guidelines for management of agricultural landscapes. *In* : EUROMAB Research Program, Comparisons of landscape pattern dynamics in European rural areas, Vol.1, 268-271.
- Ryszkowski L. & Kedziora A., 1993.** Energy control of matter fluxes through land-water ecotones in an agricultural landscape. *Hydrobiol.*, 251 : 239-248.
- Ryszkowski L., Kedziora A., & Olejnik J., 1991.** Potential effects of climate and land use changes on the water balance structure in Poland. *In* : Brouwer F.M. *et al.* (Eds.), Land use changes in Europe: processes of change, environmental transformations and future patterns, Klüwer Academic Publishers, London, 253-274.
- Sadanandan Nambiar E.K. and Sands R., 1993.** Competition for water and nutrients in forests. *Can. J. For. Res.*, 23, 1955-1968.
- Schaefer P.R., 1988.** The vital roles of trees in sustainable agricultural systems. *In* : Brandle *et al.* (Eds.), Windbreak and Technology, Proceedings of an International Symposium, Lincoln, June 1986, 67-69.
- Shatalov V.G., 1988.** Systems in watershed belts in agrolandscapes. *In* : Brandle *et al.* (Eds.), Windbreak and Technology, Proceedings of an International Symposium, Lincoln, June 1986, 93.
- Ssekabembe C.K., Henderlong P.R. & Larson M., 1994.** Soil moisture relations at the tree/crop interface in black locust alleys. *Agroforestry Systems*, 25, 135-140.

**Stepanov A.M. & Malanina Z.I., 1988.** Shelterbelt in the USSR: an integral part of the agrolandscape. *In* : Brandle *et al.* (Eds.), Windbreak and Technology, Proceedings of an International Symposium, Lincoln, June 1986, 52-55.

**Sun D. & Dickinson G.R., 1994.** A case study of shelterbelt effect on potato (*Solanum tuberosum*) yield on the Atherton Tablelands in tropical north Australia. *Agroforestry System*, 25,141-151.

**Swami Rao N., 1988.** Alley cropping trial; intercropping food crops with forest trees. *In* : Brandle *et al.* (Eds.), Windbreak and Technology, Proceedings of an International Symposium, Lincoln, June 1986, 171.

**Szpakowska B. & Zyczynska-Baloniak I., 1994.** The role of biogeochemical barriers in water migrations of humic substances. *Polish Journal of Environmental Studies*, 3(2), 35-41.

**Trémolières M., Carbiener D., Carbiener R., Eglin I., Robach F., Sanchez-Perez M., Schnitzler A. & Weiss D., 1991.** Zones inondables, végétation, qualité de l'eau en milieu alluvial rhénan : l'île de Rhinau, un site de recherches intégrées. *Bull. Ecol.*, 22(3-4), 317-336.

**Vought L.B.M., Lacoursiere J.O. & Voelz N.J., 1991.** Streams in agricultural landscape. *Vatten*, 47(4), 321-328.