



HAL
open science

Paramétrisation du bilan hydrique et établissement des flux d'eau et de nutriments dans des séquences de hêtraies de plaine

Marianne Peiffer

► **To cite this version:**

Marianne Peiffer. Paramétrisation du bilan hydrique et établissement des flux d'eau et de nutriments dans des séquences de hêtraies de plaine. Sciences du Vivant [q-bio]. Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, 2005. Français. NNT: . tel-02831025

HAL Id: tel-02831025

<https://hal.inrae.fr/tel-02831025v1>

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.

ENGREF
École Nationale du Génie Rural,
des Eaux et Forêts
19, avenue du Maine
75732 Paris

INRA - Centre de Nancy
Unité Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers
et UMR Écologie et Écophysiologie Forestières
Équipe Bioclimatologie Forestière
54280 Champenoux

**Paramétrisation du bilan hydrique et établissement des flux
d'eau et de nutriments dans des séquences
de hêtraies de plaine.**

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 7 février 2005
pour obtenir le grade de Docteur de l'ENGREF
Spécialité : sciences forestières

par **Marianne PEIFFER**

devant le jury suivant :

M. Gilbert AUSSENAC	INRA Nancy	président et rapporteur
M ^{me} . Françoise FORGEARD	Université de Rennes I	rapporteur
M. Bernard JABIOL	ENGREF Nancy	examineur
M. Patrice MENGIN-LECREULX	ONF Fontainebleau	examineur
M. Claude NYS	INRA Nancy	directeur de thèse
M. André GRANIER	INRA Nancy	directeur de thèse

Sommaire

Avant propos	1
Introduction générale	2

Première partie : Sites d'études : acquisitions et analyses de données expérimentales**Chapitre I : LES SITES D'ÉTUDES : SITUATION GÉNÉRALE ET PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES SOLS**

I - PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA FORÊT DE HESSE ET DES SITES EXPÉRIMENTAUX	6
II - PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA FORÊT DE FOUGÈRES ET DES SITES EXPÉRIMENTAUX	8
III - LES SITES ATELIERS DE MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE.....	12
1 - Instrumentation des sites d'étude du couplage hydrique et minéral	12
2 - Caractérisation des sols.....	13
2.1 - Mode de prélèvement des opérateurs à Hesse et Fougères.....	13
2.2 - Couches holorganiques.....	13
2.3 - Couches minérales	15
2.3.1 - Analyses granulométriques.....	15
2.3.2 - Analyses chimiques	17
❖ Le pH	18
❖ Teneurs en carbone, en azote et rapport C/N.....	19
❖ Taux de saturation et part des différents cations dans la CEC.....	22

Chapitre II : LE COUVERT FORESTIER

I - INTRODUCTION	24
II - MATÉRIEL ET MÉTHODES	26
1 - La mesure de l'interception lumineuse	26
2 - La mesure d'indice foliaire	26
3 - Les mesures morphologiques et masse foliaire	27
3.1 - Prélèvement des échantillons de feuilles	27
❖ Échantillonnage des feuilles vertes	27
❖ Échantillonnage des feuilles de litière	28
3.2 - Préparation et méthodes de mesure	28
3.3 - Analyses des résultats	29
4 - Pluviométrie	29
4.1 - Mesure des précipitations tombant sur les peuplements (Pi)	29
4.2 - Mesure des précipitations atteignant directement au sol (Ps)	29
4.3 - Mesure de l'écoulement le long des troncs (Pt)	30
4.4 - Pluie au sol totale	30
5 - Les flux de sève	31
6 - Les analyses descriptives.....	31
III - RÉSULTATS	32
1 - Fermeture du couvert : phénologie, effet du milieu et de l'éclaircie	32
2 - Caractéristiques morphologiques des feuilles prélevées	36
3 - Indice de surface foliaire.....	36

4 - Morphologie des feuilles vertes et feuilles de litière	37
❖ Comparaison des feuilles vertes et de litière	37
❖ Relations avec l'éclairement	39
❖ Relation avec l'âge.....	40
5 - Les flux d'eau dans le couvert	41
6 - Les flux d'eau de transpiration	42

Chapitre III : LA RÉSERVE UTILE DU SOL

I-INTRODUCTION	46
II-MATÉRIEL ET MÉTHODES	48
1-Racines	48
2 - Les glosses	48
3 - La teneur en eau du sol.....	48
3.1 - Instrumentation des sites	48
❖ Humidité neutronique.....	49
❖ Méthodes TDR	49
3.2 - Calculs	49
4 - Potentiel de base.....	50
III-RÉSULTATS	52
1- Étude d'enracinement de 3 peuplements	52
1.1 - Description de l'enracinement	52
1.2 - Caractéristiques physiques (structurales) du sol et enracinement.....	54
2 - Humidité dans le sol.....	56
2.1 - Les humidités volumiques	56
2.2 - Les réserves en eau des sols	58
3 - Potentiel de base.....	61

Deuxième partie : Établissement de flux minéraux et carbonés

Introduction	64
---------------------------	----

Chapitre I : LE BILAN HYDRIQUE

I - MATÉRIEL ET MÉTHODES	67
1 - Les flux d'eau	67
2 - Les densités apparentes du sol.....	67
II - LE MODÈLE DE BILAN HYDRIQUE.....	69
1 - Les entrées du modèle	69
2 - Les paramètres concernant le sol.....	69
❖ Nombre de compartiments	69
❖ Répartition des racines dans le sol.....	70
❖ Densité apparente.....	70
❖ Humidité au point de flétrissement	72
❖ Réserve utile et profondeur d'enracinement	73
3 - Paramètres concernant le peuplement	74

III - LES FLUX HYDRIQUES SIMULÉS ET MESURÉS	76
1 - Le peuplement arboré	76
○ La pluie au sol	76
○ L'écoulement le long des troncs.....	78
2 - Le drainage de l'eau dans le sol	82

Chapitre II : RÉSULTATS DES ANALYSES MINÉRALES ET CARBONÉES

I- MATÉRIEL ET MÉTHODES	85
1 - Calendrier des prélèvements	85
2 - Les dispositifs collecteurs concernant le peuplement	86
❖ Précipitations au-dessus du couvert	86
❖ Précipitations modifiées au cours du transfert à travers le couvert.....	86
3 - Les dispositifs collecteurs au niveau du sol.....	87
❖ Dans les litières	87
❖ Dans le sol.....	88
4 - Conditionnement et laboratoire	91
5 - Calculs des flux d'éléments minéraux et de carbone	91
6 - Problèmes méthodologiques.....	92
II - RÉSULTATS.....	94
1 - La collecte des solutions	94
2 - Évolution des concentrations des solutions	102

Chapitre III : COUPLAGE DES FLUX HYDRIQUES AVEC LES TENEURS EN MINÉRAUX ET CARBONE

I- DÉPÔTS HORS COUVERT, SOUS LE COUVERT ET FLUX DE LITIÈRE.....	106
II- DRAINAGE D'ÉLÉMENTS DANS LE SOL	110
III - RELATION AVEC L'ENRACINEMENT	113
1 - Analyse des éléments calcium, magnésium, potassium et sodium	113
2 - Analyse des N-NH ₄ et N-NO ₃	117

Discussion	118
<i>Bilan de fertilité.....</i>	<i>134</i>

Conclusion.....	135
------------------------	------------

Annexes

Références bibliographiques

Tables des figures et des tableaux

Depuis 1993, le Groupement d'Intérêt Public (Gip-Ecofor) développe des programmes de recherche sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Il organise sa programmation d'une part, autour de programmes ciblés et d'autre part, autour de l'Observatoire de Recherche en Environnement (ORE) « fonctionnement des écosystèmes forestiers ». L'ORE fédère des réseaux d'observation ainsi que des sites-ateliers, lourdement instrumentés, parmi lesquels Hesse et Fougères représentent deux écosystèmes particuliers de hêtre de plaine. Tout ceci constitue le cadre de cette thèse dont l'objectif est le rapprochement des thématiques menées dans ces deux hêtraies-ateliers, notamment celles des cycles de l'eau et du carbone.

Le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) est une des deux grandes essences forestières feuillues européennes. Il s'étend sur une superficie de 11 millions ha en Europe. Les limites de son aire de répartition sont comprises, à l'ouest, du sud de l'Angleterre au nord de l'Espagne en passant par la France et à l'est, jusqu'en Pologne et en Roumanie. Son extension en latitude est comprise entre le sud de la Suède et le nord de l'Italie et de la Grèce. Généralement présent à basse altitude dans le nord, on le trouve à des altitudes plus élevées dans la partie sud de l'Europe (Tessier du Cros, 1981).

En France, le hêtre couvre une superficie de 1,3 millions ha et joue un rôle socio-économique important. Il est le second feuillu de nos forêts avec 9.3% des surfaces boisées. Son poids relatif dans l'économie de la filière bois est important, 23% du bois d'œuvre de feuillus et 10% du bois d'œuvre total, et pourrait encore s'accroître grâce à des progrès technologiques récents permettant une valorisation accrue du bois de hêtre.

Malgré l'ancienneté de cette sylviculture, les professionnels ont pris conscience du manque de connaissances scientifiques concernant l'écosystème hêtraie, notamment en ce qui concerne ses besoins en ressources du milieu, ce qui rend difficile les choix à effectuer pour une gestion durable de l'écosystème forestier.

Par ailleurs, la possibilité d'utiliser le hêtre comme essence de substitution des conifères (épicéa), soupçonnés impliqués dans l'acidification des sols, place encore cette essence au centre de la problématique de gestion durable et du maintien de la biodiversité des espaces semi-naturels.

Dans le contexte actuel des changements climatiques, des augmentations de pluie moyenne, de température mais aussi des déficits hydriques sont signalés (IPCC, 2001). Or, il est étonnant de constater que la réponse du hêtre à la disponibilité en eau est encore mal documentée. Le fonctionnement de la hêtraie apparaît donc aussi comme un enjeu scientifique majeur en climat actuel et futur.

Afin d'améliorer la compréhension du fonctionnement des hêtraies dans leur aire de répartition et dans le cadre des modifications du milieu, les questions générales soulevées sont :

- Quels sont les facteurs responsables ou impliqués dans les symptômes de dépérissement de la hêtraie ?
- Quelle est la sensibilité de la hêtraie face à la contrainte hydrique ?

Cette sensibilité peut, d'une part, être recherchée au travers de l'impact de la sécheresse de 2003. Il a été montré, par exemple, que cette sécheresse a été très exceptionnelle à Hesse et assez exceptionnelle à Fougères, par un jeu de simulations transposant une essence à feuilles caduques sur différents sites CARBOEUROPE (Granier *et al.* 2004).

Cette sensibilité peut, d'autre part, être recherchée au travers des réactions de la hêtraie dans un climat où les sécheresses estivales augmentent.

- Quels sont les besoins en éléments minéraux de la hêtraie? et quel est l'impact de la sylviculture sur la fertilité minérale des stations à hêtres. Des bilans nutritifs peuvent être établis en quantifiant les entrées, les sorties et les immobilisations dans la biomasse. Toutefois, un facteur limitant du progrès des connaissances dans ce domaine est la difficulté de quantifier les flux d'éléments minéraux par drainage dans le sol. Les systèmes de mesure couramment utilisés dans ce type d'expérimentation ne sont pas adaptés à la mesure de flux, mais seulement à celle des concentrations (Marques *et al.*, 1997). La modélisation du bilan hydrique est alors un passage obligé pour réaliser ces estimations à un pas de temps fin.

*
**

Cette étude cherche à analyser le fonctionnement des sols et des couverts forestiers de hêtres (*Fagus sylvatica* L.) en région de plaine. Afin de faire ressortir cet aspect fonctionnel, notre travail combine des mesures et la modélisation.

La modélisation est réalisée par un modèle de bilan hydrique, biljou, conçu par l'unité d'écophysiologie forestière de l'INRA de Champenoux, (Bréda 1994, Granier *et al.*, 1995, Granier *et al.*, 1999, Granier *et al.*, 2000).

Les objectifs principaux sont :

- ◆ D'établir les flux d'eau d'entrée et de sortie du bilan hydrique. Les drainages sont définis pour cinq profondeurs de sol
- ◆ D'acquérir une meilleure connaissance de la structure des couverts de hêtres
- ◆ D'établir pour les éléments minéraux et le carbone les flux annuels : hors couvert, traversant le couvert, au sol et à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur
- ◆ De rechercher, *in fine*, un passage entre les flux de drainage établis entre 10 et 120 cm de profondeur et le fonctionnement du sol.

Ce manuscrit s'organise en trois parties :

Dans la **première partie**, un premier chapitre est dédié à une présentation générale des sites-ateliers de Hesse et de Fougères ; ces sites-ateliers sont support des sept emplacements d'étude permanents et des trois emplacements transitoires de ce travail de thèse. Pour les emplacements d'étude permanents, *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*, une caractérisation comparative des sols est présentée ; les données proviennent, à la fois, de la littérature ou de nos mesures (travaux non publiés).

Les chapitres II et III sont respectivement dédiés à l'étude du couvert forestier et de l'interface sol-racine, à partir de deux années de mesures et d'expérimentation de terrain.

Ces mesures ont été réalisées pour acquérir des paramètres indispensables à la modélisation et répondre à des interrogations complémentaires qui concernent les deux interfaces du cycle de l'eau en forêt :

- 1) Le couvert forestier, interface pour les flux de transpiration et l'interception. Notre approche consistera à savoir i) dans quelle mesure la morphologie foliaire des différents peuplements étudiés conditionne la structure du couvert forestier, indice foliaire en particulier et ii) analyser dans quelle mesure les différences de structure des couverts jouent sur les variations des flux d'eau.
- 2) L'interface sol-racine, où s'opèrent l'absorption hydrique et les flux de drainage. Nous tenterons de caractériser la réserve hydrique des sols de façon fonctionnelle en prenant en compte les caractéristiques des systèmes racinaires, notamment la répartition des racines fines. Cette analyse conduira à quantifier la réserve utile des différents peuplements pour permettre de mettre en œuvre un modèle de bilan hydrique, puis de valider ce modèle.

Au début des chapitres II et III, après une courte introduction en la matière, une présentation plus pragmatique des objectifs pourra être faite.

Dans la **deuxième partie** les flux minéraux et carbonés sont établis pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*.

Le bilan hydrique (chapitre I), une analyse qualitative (chapitre II), le couplage entre les flux hydriques et les concentrations (chapitre III) sont traités successivement.

Dans le chapitre III, les flux minéraux établis pour le drainage feront l'objet d'une analyse approfondie. La base de cette étude repose sur différents rapports de flux entre-eux : $(Ca+K)/(Ca+K+Mg+Na)$, $Ca/(Ca+K+Mg+Na)$, $K/(Ca+K+Mg+Na)$, $Mg/(Ca+K+Mg+Na)$, $Na/(Ca+K+Mg+Na)$, $N-NO_3/(N-NO_3+N-NH_4)$ et $N-NH_4/(N-NO_3+N-NH_4)$.

Afin de mettre en évidence le fonctionnement du sol, on rapprochera ces rapports des « réservoirs » d'eau et des enracinements.

La **troisième partie** est consacrée à une discussion générale au terme de laquelle un bilan de fertilité minérale, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*, est proposée.

Précisons encore que, les figures n'ont été accolées que dans le cas où une même échelle pour les abscisses et une même échelle pour les ordonnées étaient utilisées. Les renvois aux figures, aux tableaux et annexes sont indiqués en gras.



*Première
partie*



*Sites d'études
Acquisitions et analyses de
données expérimentales*

Chapitre I - Les sites d'études : situation générale et principales caractéristiques du sol

I - PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA FORÊT DE HESSE ET DES SITES EXPÉRIMENTAUX

La Forêt de Hesse couvre une superficie de 485 ha, elle est située en Moselle (France, 48°40'N, 7°05'E, altitude 300 m) à l'extrémité du plateau lorrain, à proximité des premières collines vosgiennes. Les peuplements sont majoritairement des hêtraies (*Fagus sylvatica* L.), en mélange, les autres espèces sont *Carpinus betulus* L., *Betula pendula* (Roth), *Quercus petraea* (Matt.) et *Larix decidua* (Mill.). Il y a aussi des parcelles de chênes !

Sur le plan climatique, la moyenne des précipitations annuelles entre 1950 et 2002 est de 857 mm et la température moyenne de 8.9 °C. Alors qu'entre 1996 et 2002, la moyenne des précipitations annuelles est de 989 mm et la température moyenne de 9.9 °C.

Les sols ont été définis, dans un premier temps, entre un luvisol et un luvisol stagnic. En référence à l'horizon E modérément appauvri, nous préférons le qualificatif néoluvisol à luvisol. Nous utilisons les termes typologiques de néoluvisol à caractère faiblement rédoxique pour caractériser ces sols (Lefèvre Y. *comm. pers.*).

Le substratum géologique est différent entre le versant exposé au nord-ouest et celui exposé au sud-est. Le premier est un grès micacé gris et massif du Muschelkalk inférieur d'origine

lacustre et le second est un grès à *Voltzia* fortement micacé et arkosique de couleur rouge violacée. Les deux formations sont recouvertes d'un placage de limons argileux à limono-argilo-sableux (carte géologique de Sarrebourg, 1/50 000, BRGM, 1968)

La forêt de Hesse est coupée en deux massifs par la Bièvre, un affluent de la Sarre (**carte 1**).

La forêt de Hesse est un massif forestier où, dans un site expérimental central, les bilans des flux de carbone, des flux hydriques et la croissance font l'objet d'études approfondies à différentes échelles (sol-feuille-arbre-parcelle). Il en résulte des zones expérimentales de surface variable et équipées durablement ou momentanément selon l'échelle et l'approche scientifique. Le cantonnement expérimental de cette forêt correspond à quatre niveaux qui sont :

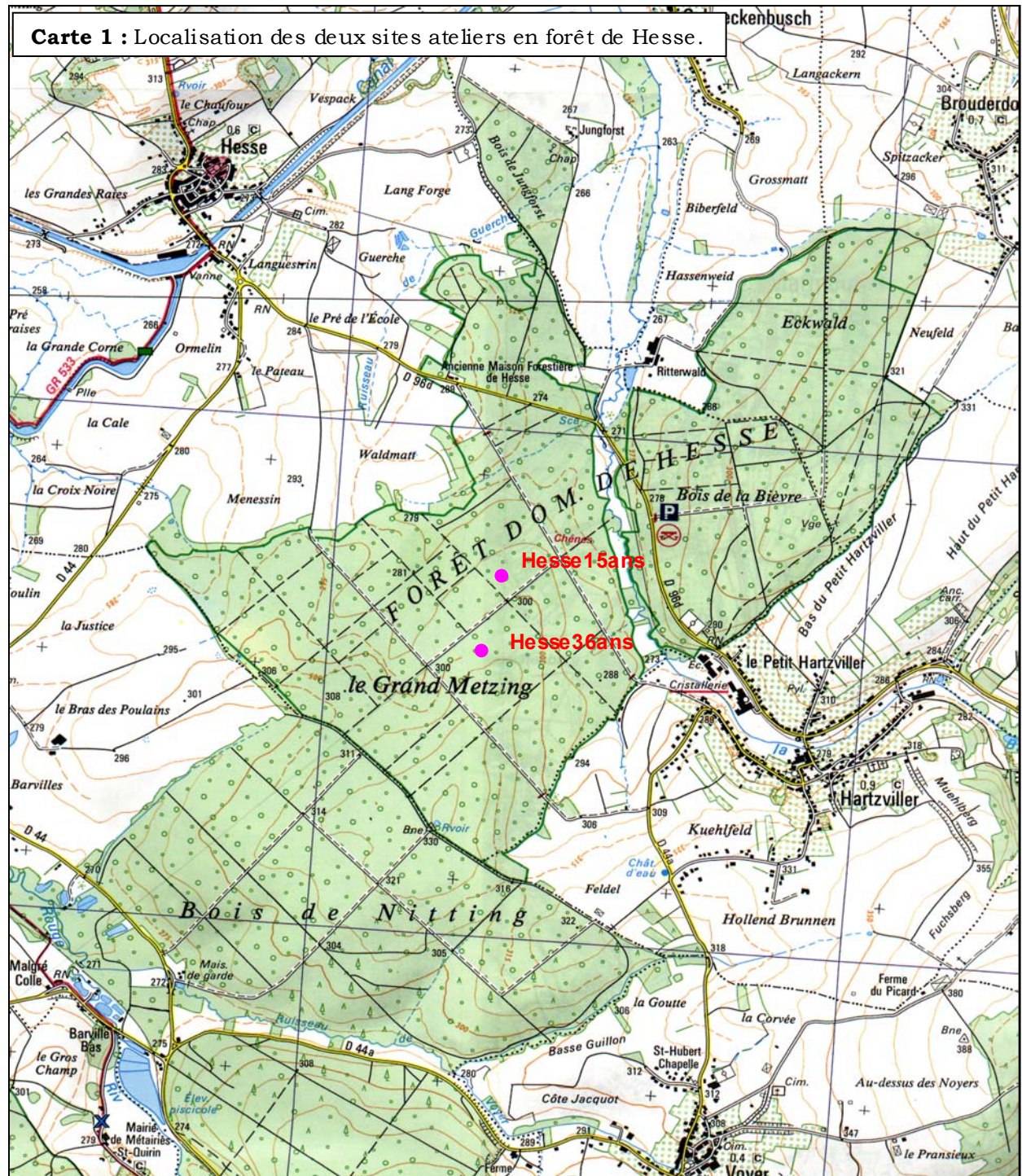
➤ un réseau systématique (50m x 50m) de 182 placettes de 452 m² sur 65 ha. Des données de différentes natures sont acquises sur ces placettes : indice foliaire, relevés phytoécologiques, mesures dendrométriques et propriétés du sol permettant de caractériser la variabilité spatiale de ces paramètres.

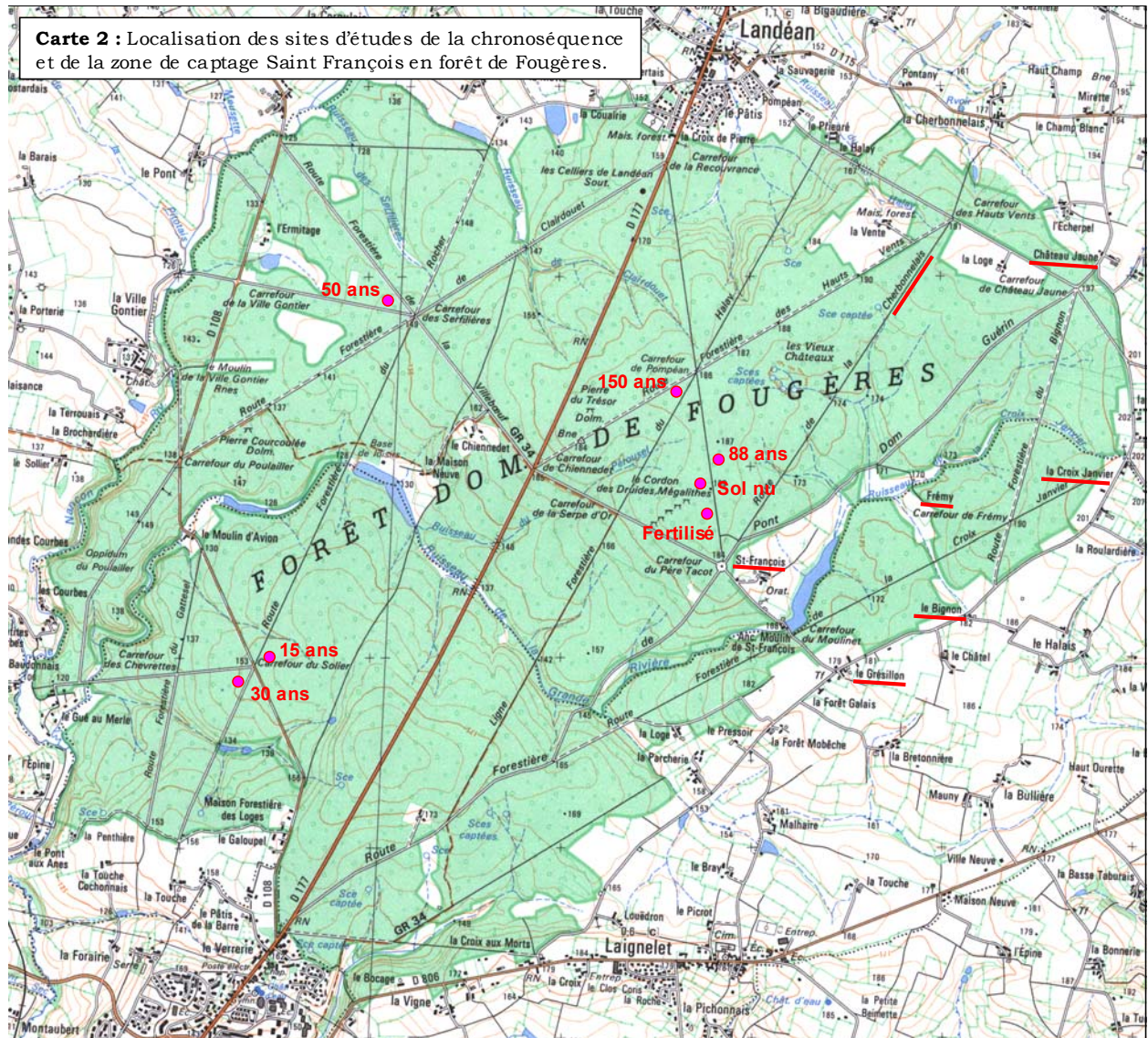
➤ une zone à portée de mesure du système des corrélations turbulentes (échanges gazeux entre la forêt et l'atmosphère). Son assise au niveau du sol peut correspondre à une parcelle forestière (situation courante pour les flux mesurés à partir de la parcelle 217). En réalité, les variables climatiques (vitesse et direction des vents) influent sur la zone de mesure, qui prend l'allure d'une ellipse dont le grand axe est orienté dans le sens des vents dominants.

➤ deux sites ateliers sont situés au cœur de ce domaine expérimental

- Le premier est *Hesse36ans* (aussi appelé Hesse1), il correspond à une surface grillagée de 0.6 ha sur la parcelle 217. Ce perchis de hêtres issu d'une régénération naturelle a une densité de 3144 tiges/ha et une surface terrière de 21.6 m²/ha en 2002.

Des données nombreuses sont acquises par ce site. Au cours de ce travail de thèse, les analyses vont concerner les données acquises en routine : de météorologie, de teneur en eau dans le sol (TDR et sonde à neutron), de composition chimique des eaux du peuplement et dans le sol. Dans le cadre particulier de cette thèse, une quantification de l'eau de ruissellement le long des troncs et de l'eau directe au sol a été réalisée en cherchant à capturer l'événement pluvieux journalier, au cours de la saison de végétation 2002.





Des éclaircies ont été pratiquées sur la parcelle forestière ainsi que sur le site expérimental, au cours des hivers 1995-1996, 1998-1999 et 2004-2005.

- *Hesse15ans* (aussi appelé Hesse2) correspond à 0.16 ha d'une parcelle en régénération, dans la parcelle 218.

➤ des emplacements transitoires disposés autour des parcelles grillagées, évitent de perturber les installations et les mesures routinières (ex : ouverture de fosse pédologique, comptage racinaire).

Au cours de cette thèse les données expérimentales ont été collectées sur les deux sites ateliers et sur un emplacement transitoire

II - PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA FORÊT DE FOGÈRES ET DES SITES EXPÉRIMENTAUX

La forêt domaniale de Fougères est située au Nord-Est de l'Ille-et-Vilaine, à 35 Km de la mer. D'une superficie de 1660 ha, elle s'étend sur les communes de Landéan (1072 ha) et de Laignelet.

Le climat annuel moyen correspond à une pluviométrie de 1083 mm et à température de 11.2°C, de 1997 à 2002.

Le sol est défini comme un alocrisol luvisol à caractère fragique sur arène granitique (Nys, 2004)

Sur le plan des conditions géologiques, F. Toutain (1966) relate que la forêt repose essentiellement sur du granite et qu'une partie de 50 ha, au sud, est occupée par des schistes briovériens métamorphiques.

Le granite est le granite de type Vire, gris-bleuâtre, altéré en surface en une arène brun-rouille. Il est traversé par des filons de quartz blanc.

Les schistes sont des schistes métamorphiques du précambrien type phyllade de Saint-Lô avec des lits plus ou moins épais de grès argileux fins. Leur couleur est généralement foncée mais leur altération donne un mélange d'argile et de sable fin de couleur jaune passant souvent au rouge.

L'alimentation en eau de la ville de Fougères est en partie captée dans la forêt. Cette ressource en eau, d'un intérêt économique, constitue un aspect hydrologique important. Concrètement, une des zones de captage peut, en grande partie, être retrouvée sur la cartographie au 1/25 000 du massif forestier (**carte 2**) à l'aide de l'extrait de la thèse de F. Toutain (1966) qui a décrit le réseau de Saint François : «*Ces captages sont situés en amont de l'étang de Saint-François. Ils sont constitués :*

-Par les captages du ruisseau des VIEILLES qui est constitué de 2 branches drainantes ;

-Par le captage du ruisseau de la CHERBONNELAIS dont une partie longe la route dite de la CHERBONNELAIS.

Ces 2 conduites se déversent dans une conduite commune située dans la prairie de PONT RICHARD. L'ensemble des 2 bassins versants captés représentant 52 ha.

-Par le captage du ruisseau du Château JAUNE qui draine un bassin versant voisin de 29 ha.

-Par le captage du ruisseau de la Croix JANVIER dont le bassin versant est voisin du précédent et draine une surface de 29 ha.

-Par le captage du ruisseau de FREMY qui est un tout petit captage drainant un bassin versant de l'ordre de 3 ha.

-Par le captage du ruisseau du BIGNON. Le bassin versant correspondant est de 32 ha environ dont une partie sous forêt et l'autre sous champ.

-Enfin, par le ruisseau du GRESILLON qui draine 3 petits ruisseaux et dont le bassin versant correspond à 15 ha environ.

La surface totale des bassins drainés par le réseau de Saint-François est donc de 160 ha. »

F. Toutain a également établi un débit moyen pour ce captage en considérant que le sol est composé de 1 à 2 m de limon sur 1 à 2 m d'arène granitique. Le débit moyen estimé sur la période de 1961 à 1964 se chiffre à 13.3 m³/ha/j.

Ainsi, après une transformation en hauteur d'eau, on estime que la ville de Fougères récupère 488 mm/an.

La forêt de Fougères est un massif forestier où des sites ateliers sont installés dans des peuplements différents en âge. Ils constituent une chronoséquence de hêtre où le cycle du carbone et des éléments minéraux est appréhendé par l'étude de stocks dans la biomasse et le sol.

L'ensemble du domaine expérimental comprend les sites de la chronoséquence et des emplacements transitoires. Nous décrivons les sites de la chronoséquence depuis le stade sol nu jusqu' à la vieille futaie, en passant par les âges intermédiaires et, nous terminons par les emplacements transitoires :

- Le sol nu (aussi appelé Fou3) : sur la parcelle forestière n°77, une surface grillagée comportait initialement des hêtres âgés d'environ 88 ans. Ce site a été balayé par la tempête de 1999 mais continue à être suivi. Les sondes TDR, et les équipements pour collecter les solutions au niveau du peuplement et du sol sont restés fonctionnels.
- *Fou15ans* (aussi appelé Fou1) : occupe 396,45 m² de la parcelle forestière n°50. La placette grillagée a été éclaircie en même temps que le peuplement en février 2003. La densité du *Fou15ans* est passée de 16512 à 4869 tiges/ha ; la surface terrière de 15.9 à 7.1 m²/ha (diamètre > 7.5 mm). Ce site est instrumenté en sondes TDR, les solutions sont collectées dans le peuplement et dans le sol.
- *Fou30ans* (aussi appelé Fou2) : est grillagé dans la parcelle forestière n°51. Une surface de 2040 m² est une zone pure en hêtre (sous-placettes 22 et 23). *Fou30ans* a été éclairci en même temps que le peuplement en février 2003. La zone pure en hêtre est passée de 4260 à 1088 tiges/ha et la surface terrière a diminué de 27.3 à 13.5 m²/ha. Sur les souches issues de l'éclaircie, 57 rondelles ont été prélevées à la tronçonneuse, la lecture des cernes a été réalisée sur une binoculaire au laboratoire, l'âge moyen de la parcelle a été fixé à 30 ans (**annexe A1**). La zone pure en hêtre est également instrumentée en sondes TDR. Les solutions, pour analyses chimiques, sont collectées dans le peuplement et dans le sol, de façon routinière. Durant la saison de végétation 2002, une campagne de terrain quantifiant l'eau de ruissellement le long des troncs et l'eau directe au sol a été réalisée en cherchant à capturer l'événement pluvieux journalier.
- *Fou50ans* (aussi appelé Fou50) : ce site situé dans la parcelle forestière n°24 n'est pas instrumenté. Sa surface est de 2425 m², la densité de 2309 tiges/ha et la surface terrière de 22.2 m²/ha.
- *Fou88ans* (aussi appelé Fou30) : une surface grillagée de 4800 m² se situe à cheval sur les parcelles forestières n°82 et 83. En février 2003, la densité du peuplement est de 552 tiges/ha

et la surface terrière de 41.1 m²/ha. En février 2003, les arbres ont été martelés, ainsi nous pouvons établir, que la densité est de 370 tiges/ha et la surface terrière est de 29 m²/ha, après l'éclaircie du 30 juin 2003. Ce site est également instrumenté en sondes TDR, les solutions sont collectées dans le peuplement et dans le sol.

- Fou5 : ce site est grillagé dans la parcelle n° 75, âgé d'environ 88 ans, il a été soumis à des fertilisations en 1972, répétées pour l'azote en 1974. Les solutions gravitaires et les pluviollessivats sont collectées dans ce peuplement.

- *Fou150ans* (aussi appelé Fou4) : se trouve sur le parcelle forestière n°79 où 6000 m² ont été grillagés. La densité du peuplement en juin 2002 est de 165 tiges/ha ; la surface terrière est de 28.6 m²/ha. Ce site est également instrumenté en sondes TDR, les solutions sont collectées dans le peuplement et dans le sol. Cette futaie âgée présente un sous-étage de houx (*Ilex aquifolium* L.) (voir photo ci-contre).



- Des emplacements transitoires disposés autour des parcelles grillagées, évitent de perturber les installations et les mesures routinières (ex : ouverture de fosse pédologique, comptage racinaire, prélèvement de cylindre et bidons de sol).

Au cours de cette thèse les données expérimentales ont été acquises sur les sites *Fou15ans*, *Fou30ans*, *Fou50ans*, *Fou88ans* et *Fou150ans* et sur deux emplacements transitoires.

Site	<i>Fou30ans</i>		<i>Hesse36ans</i>	<i>Fou150ans</i>
Date d'éclaircie	Hiver 2002-2003		Printemps 1999	
LAI (m ² /m ²)	8.2	3.7	7.7	4.6
Densité (n/ha)	4260	1088	3144	165
Surface terrière (m ² /ha)	27.3	13.5	21.6	28.6
Circonférence à 1,3 m (cm)	25	41	26	145
Hauteur dominante (m)	14.8	14.8	17.9	31.7

Indices foliaires et caractéristiques dendrométriques de chaque peuplement où on réalise un couplage hydrique et minéral. La structure du peuplement *Fou30ans* a été fortement modifiée, au milieu de la période de collecte de données, en raison d'une éclaircie.

III - LES SITES ATELIERS DE MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE

Nous avons choisi de modéliser le bilan hydrique sur des sites permettant de confronter les sorties du modèle à des mesures *in-situ* : il s'agit de *Hesse36ans*, *Fou30ans*, *Fou150ans*. Les différences de structure de ces peuplements, liées à l'âge et aux interventions sylvicoles, sont rappelées dans le tableau situé page 11, en bas.

1 - Instrumentation des sites d'études du couplage hydrique et minéral

Les techniques utilisées pour réaliser les mesures sur ces sites sont énumérées de façon synthétique (**tableau 1**).

	<i>Hesse36ans</i>	<i>Fou30ans</i>	<i>Fou150ans</i>
<u>INDICE FOLIAIRE</u>			
thermopile	mesure semi horaire	mesure semi horaire	
Lai maximum	LAI-2000 Li-Cor	LAI-2000 Li-Cor	LAI-2000 Li-Cor
<u>RELATION HYDRIQUE DES ARBRES ET DE LA PARCELLE</u>			
flux de sève	10 capteurs	7 capteurs	
densité racinaire	comptage racinaire	comptage racinaire	comptage racinaire
état hydrique du sol	TDR Trase, sonde NEA, potentiel de base	TDR Trime	TDR Trime
<u>PHYSIQUE DE SOL</u>			
densité apparente	gammamètre + cylindre	cylindre + bidon	cylindre + bidon
<u>MICROCLIMAT, INTERCEPTION ET CHIMIE DES EAUX</u>			
microclimat	vent, hum. de l'air, Rg, temp, Pi	vent, hum. de l'air, Rg, temp, Pi	
pluie au sol	•pluviomètres lecture directe •gouttières	gouttières	gouttières
écoulement le long du tronc	colliers munis d'auget	colliers munis d'auget	colliers munis d'auget
solutions du sol	lysimètre avec tension	lysimètre sans tension	lysimètre sans tension
solutions des litières	lysimètre « avec tension »	lysimètre sans tension	lysimètre sans tension
pluie incidente	petite gouttière	petite gouttière	

Tableau 1 : Présentation synthétique des paramètres étudiés et des techniques utilisées sur les trois sites d'étude du couplage minéral et hydrique.

2 - Caractérisation des sols

Nota bene : dans tout ce chapitre les descriptions de sol s'appuient sur les données publiées de Quentin *et al.* 2001 pour Hesse et, sur les déterminations chimiques et texturales communiquées par C. Nys pour Fougères.

2.1 - Mode de prélèvement des opérateurs à Hesse et Fougères

À Hesse, deux fosses ont été ouvertes à la fin de l'hiver 1998-1999, aux points 95 et 28 d'un maillage systématique du secteur d'étude (cartographie dans Bouriaud *et al.*, 2003). Cinq et six prélèvements de sol ont été réalisés de façon à rendre compte des différents horizons pédologiques observés jusqu'à 155 cm de profondeur maximum.

Pour *Fou30ans* et *Fou150ans*, deux fosses ont été creusées à proximité des sites en juillet 1996 et, deux fosses supplémentaires ont été ouvertes à l'intérieur même du site *Fou150ans* en août 1997. Les prélèvements de 9 et 14 sols pour *Fou30ans* et 10 et 14 sols pour *Fou150ans* ont été réalisés à des profondeurs croissantes jusqu'à 255 cm de profondeur, au maximum.

2.2 - Couches holorganiques

Les couches holorganiques varient selon les sites (**tableau 2**).

site	type d'humus
<i>fou30ans</i>	dysmull, localement hémimoder
<i>fou150ans</i>	moder
Hesse fosse 95	oligomull
Hesse fosse 28	mésomull

Tableau 2 : Humus selon le site d'étude

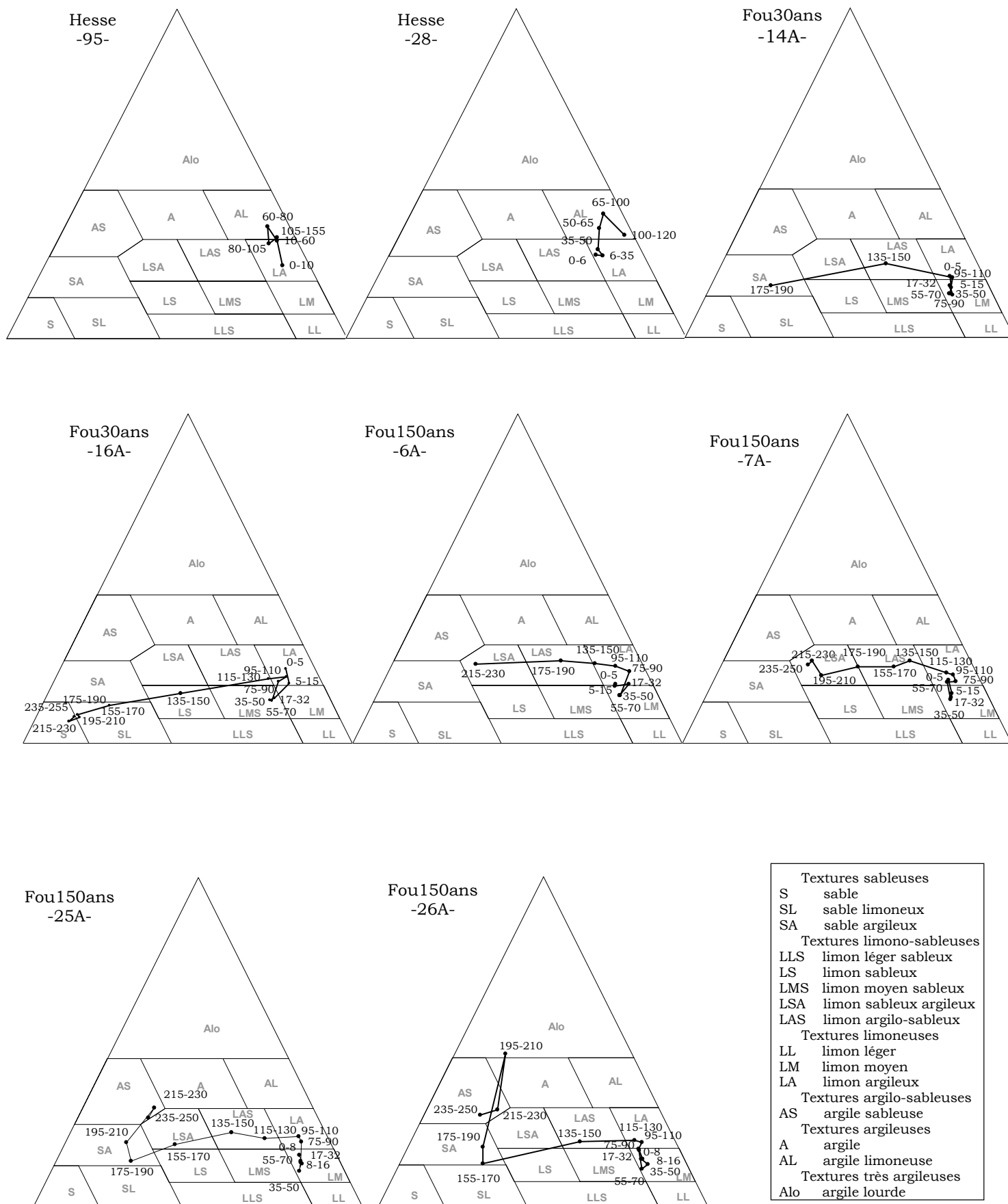


Figure 1 : Classification des sols, de différents prélèvements en profondeur, de Hesse, Fou30ans et Fou150ans, selon le diagramme des textures de Jamagne (1967 modifié depuis). (Données Quentin *et al.*, 2001 et C. Nys)

2.3 - Couches minérales

2.3.1 - Analyses granulométriques

Les compositions granulométriques de tous les sols récoltés pour Hesse, pour *Fou30ans* et pour *Fou150ans* ont été positionnées dans le diagramme des textures de Jamagne (**figure 1**).

- Les textures des sols de Hesse apparaissent limoneuses (LA) et argileuses (AL) avec dans la partie supérieure des deux fosses pédologiques la texture LA et au niveau du plancher la texture AL
- Quatre grands groupes texturaux sont rencontrés pour les sols de Fougères :
 - les textures limoneuses (LA et LM) se trouvent en surface
 - les textures limoneux sableuses (LAS, LSA, LS) apparaissent au-dessous, ou s'imbriquent dans les textures limoneuses (cas de la fosse 16A). Elles persistent jusqu'au plancher des fosses 6A et 7A.
 - les textures sableuses (S, SA, SL) plus basses, constituent la texture du plancher des fosses 14A et 16A.
 - des textures très argileuse (Alo, fosse 25A) et argileux sableuses (AS, fosse 25A-26A) apparaissent au fond de deux fosses. (La totalité du parc de sondes TDR du *Fou150ans* est contenu dans les fosses 25A - 26A).

Une seconde analyse permet de distinguer cinq classes de taille texturale. Une représentation en cartouches des proportions texturales selon des profondeurs de prélèvement est réalisée pour Hesse, *Fou30ans* et *Fou150ans* (**figure 2**).

Pour les sables, le rapport de la texture « grossière » sur les textures « grossière »+ « fine » est réalisé, pour l'ensemble du profil. On établit que 27% des sables sont grossiers à Hesse, 41% pour *Fou30ans* et 40% pour *Fou150ans*.

En profondeur, les sols de Fougères sont différents. Nous proposons de fixer une limite au niveau des prélèvements 115-130 et de reconduire les calculs.

En dessous de 1,3 mètre, les sables grossiers représentent 86% des sables pour *Fou30ans* et 83% pour *Fou150ans*.

Pour les deux sites de Fougères, il apparaît que les sables grossiers sont fortement majoritaires en profondeur.

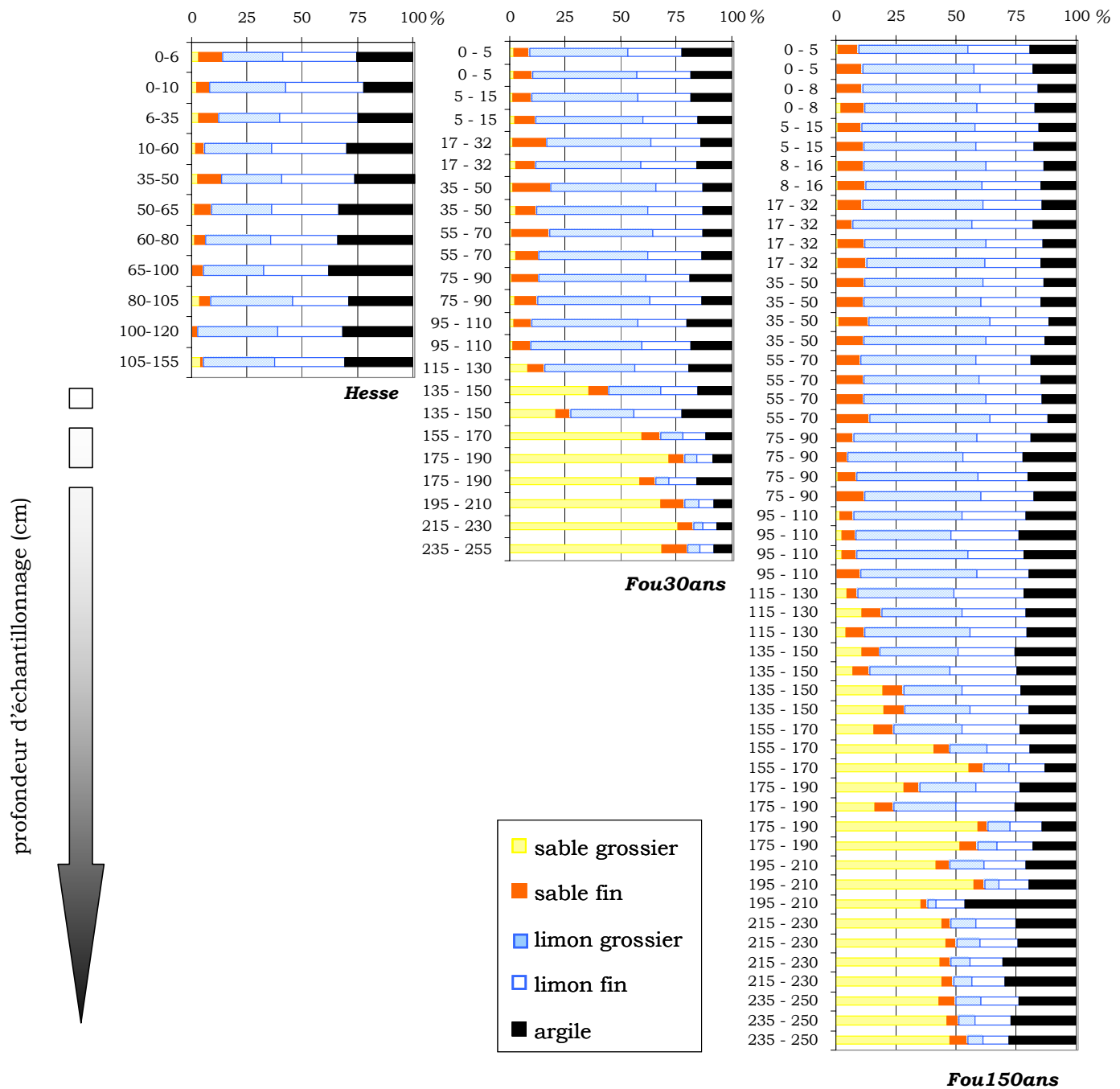


Figure 2 : Représentation des proportions texturales ordonnées verticalement selon des profondeurs d'échantillonnage de sol croissantes dans quatre fosses pour *Fou150ans*, deux fosses pour *Fou30ans* et deux fosses pour *Hesse36ans*. (D'après des données de Quentin *et al.*, 2001 et C. Nys)






Une texture relativement homogène est constatée pour les sols de Hesse, d'une fosse et d'une profondeur à l'autre. Les sols de Hesse sont plus argileux que le sol de Fougères. D'une manière très globale, on observe qu'à Fougères, l'augmentation en profondeur s'accompagne d'une augmentation de la part de sable, majoritairement grossier ; plus en détails, on note des textures argilo-sableuses trouvées à partir de 215 cm, et même de l'argile lourde à partir de 195 cm, dans les fosses ouvertes au sein du site atelier *Fou150ans*.

2.3.2 - Analyses chimiques

Avis au lecteur :

- i) Dans cette section, nous avons utilisé le milieu de l'intervalle de profondeurs d'un prélèvement comme valeur discrète pour représenter des profils et établir des concentrations moyennes en fonction de la profondeur. Toutes les indications de profondeurs sont faites en référence aux valeurs discrètes.
- ii) Différents prélèvements de sol sont regroupés pour obtenir des profondeurs *grosso modo* comparables. Les prélèvements réalisés au-dessus de 122.5 cm de profondeur à Fougères seront comparés aux prélèvements du profil total de Hesse (réalisés jusqu'à 110 cm de profondeur et 130 cm dans la seconde fosse) ; les prélèvements effectués au maximum à 5 cm de profondeur, sur les différents sites, seront également rapprochés.

Rappels de définitions :

-  Capacité d'échange pour les cations : T ou CEC, ensemble de charges électriques électro-négatives portées par les colloïdes du sol et saturées par des cations divers : cations basiques échangeables ou cations acides, s'exprime en centimoles de charge par Kg de sol (c. mol.⁺/kg)
-  La CEC effective se mesure au pH du sol
-  Somme des cations basiques échangeables : S, c'est-à-dire Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺
-  T-S représente l'acidité totale ou « potentielle » : Al³⁺ et H⁺
-  Taux de saturation = S/T %

❖ Le pHeau

• Après une observation très globale des profils de Fougères, il se dégage une diminution de l'acidité avec l'augmentation en profondeur (**figure 3**).

En tenant compte de variations supérieures à 0.1 unité de pH ; cette tendance s'inverse pour *Fou30ans* entre 24.5 et 102.5cm (évolution de pH=4.65 à 4.39, fosse14A) et entre 42.5 et 122.5cm (évolution de pH=4.48 à 4.37, fosse16A). Pour *Fou150ans*, les variations restent négligeables.

• À Hesse, on observe des pH plus acides sous les horizons organo-minéraux avant de voir une diminution d'acidité vers la profondeur (**figure 3**).

• Des écarts de 1.3 unité de pH entre Hesse et *Fou30ans* et de 1.4 entre Hesse et *Fou150ans* sont en moyenne établis, pour les horizons très superficiels (≤ 5 cm).

Signalons qu'une valeur de pH égale à 4.5 est une limite retenue comme seuil au-dessous duquel l'aluminium échangeable se trouve totalement sous forme ionique (Al^{3+}) et, est susceptible de passer dans la solution du sol et de provoquer un dysfonctionnement racinaire (blocage de l'alimentation en phosphore et limitation de l'absorption de calcium et magnésium) (Bonneau, 1995).

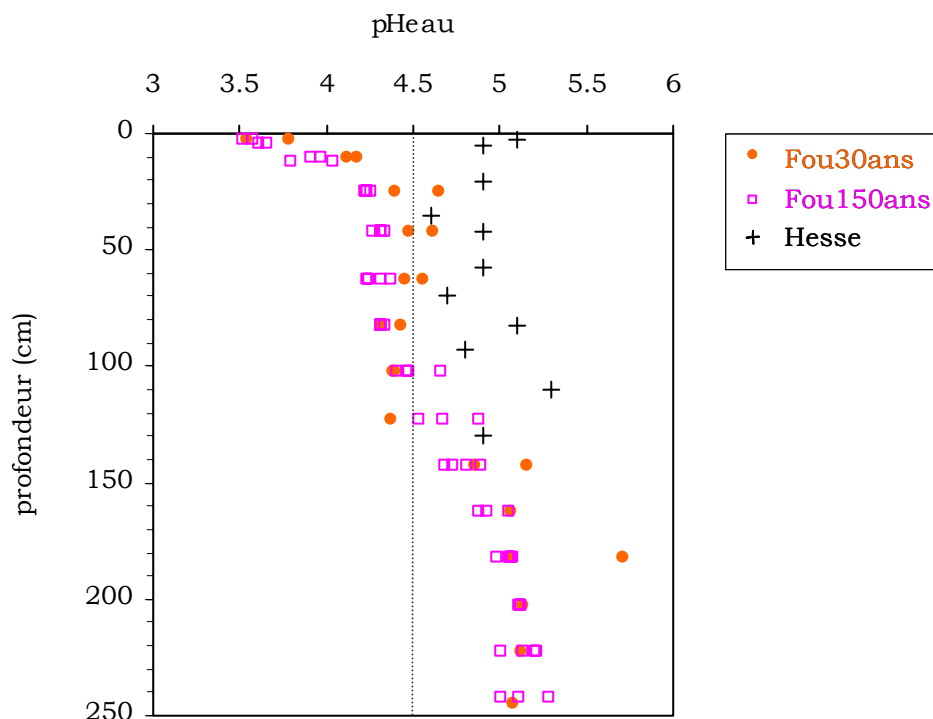


Figure 3 : Profil du pHeau en fonction de la profondeur pour Hesse, *Fou30ans* et *Fou150ans*. On a tracé la droite de pH=4.5. (D'après des données de Quentin et al., 2001 et C. Nys).

❖ **Les teneurs en carbone, en azote et rapport C/N**

Les teneurs en carbone, azote et le rapport C/N sont représentés pour chaque site en fonction des profondeurs par un profil (**figure 4**) ; nous avons également établi les valeurs moyennes des teneurs en carbone, azote et du rapport C/N, pour des profondeurs de sol approximativement voisines (**tableau 3**). Les concentrations en carbone, en azote et le C/N sont moins élevées à Hesse qu'à Fougères

En mettant en correspondance le type d'humus de l'horizon holorganique et le C/N des sols prélevés ≤ 5 cm, une évolution du rapport C/N en fonction d'un humus de moins en moins actif apparaît (**figure 5**).

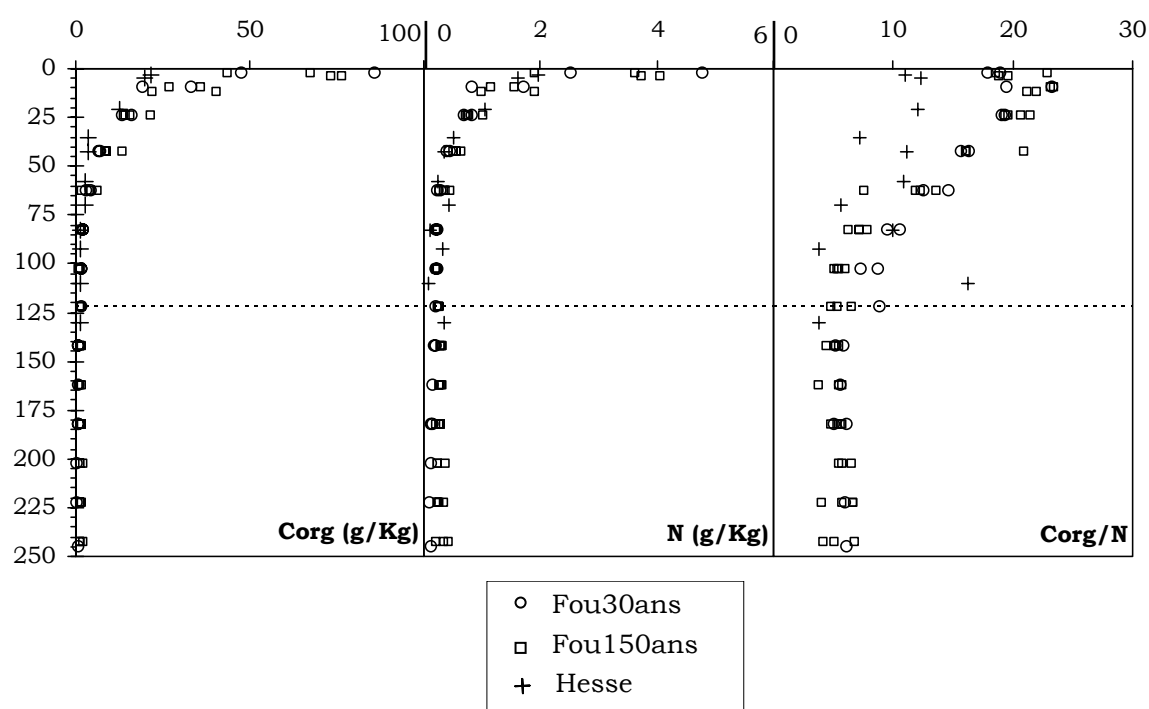


Figure 4 : Profils de la teneur en carbone organique Corg, en azote N et du rapport C/N en fonction de la profondeur pour Hesse, *Fou30ans* et *Fou150ans*. On a tracé la profondeur repère à 122.5 cm de la surface. (D'après des données de Quentin *et al.*, 2001 et C. Nys).

profondeur	C moyen (g/kg)			N moyen (g/kg)			C/N moyen		
	Hesse	<i>Fou30ans</i>	<i>Fou150ans</i>	Hesse	<i>Fou30ans</i>	<i>Fou150ans</i>	Hesse	<i>Fou30ans</i>	<i>Fou150ans</i>
• ≤ 5cm	20.8	67.03	65.4	1.8	3.66	3.34	11.7	18.46	19.99
• profil total à Hesse et • ≤ 122.5 cm pour les sites de Fougères	6.5	16.58	17	0.6	0.93	0.92	9.5	14.86	13.96

Tableau 3: teneurs en carbone, azote et rapport C/N pour Hesse, *Fou30ans* et *Fou150ans* à deux profondeurs.

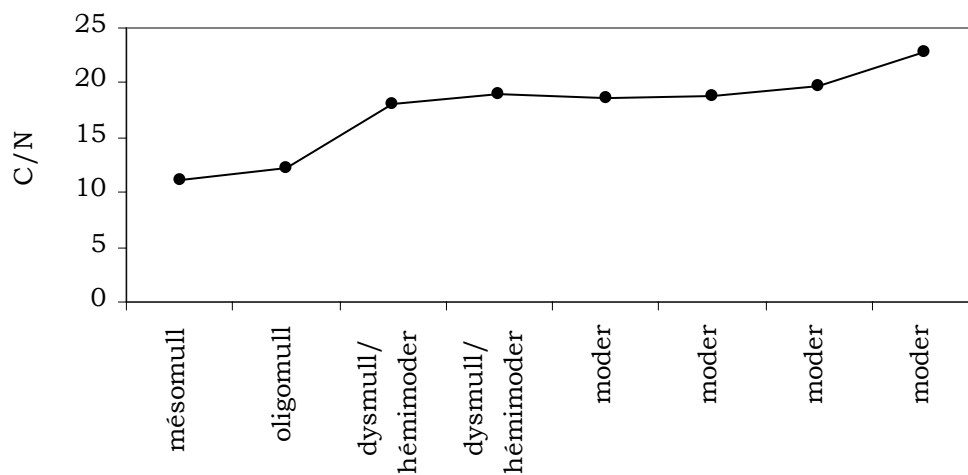


Figure 5 : Évolution du rapport C/N des sols très superficiels (premier prélèvement du profil) en fonction du type d'humus observé à Hesse et sur les sites *Fou30ans* et *Fou150ans*. (D'après des données de Quentin *et al.*, 2001 et C. Nys).

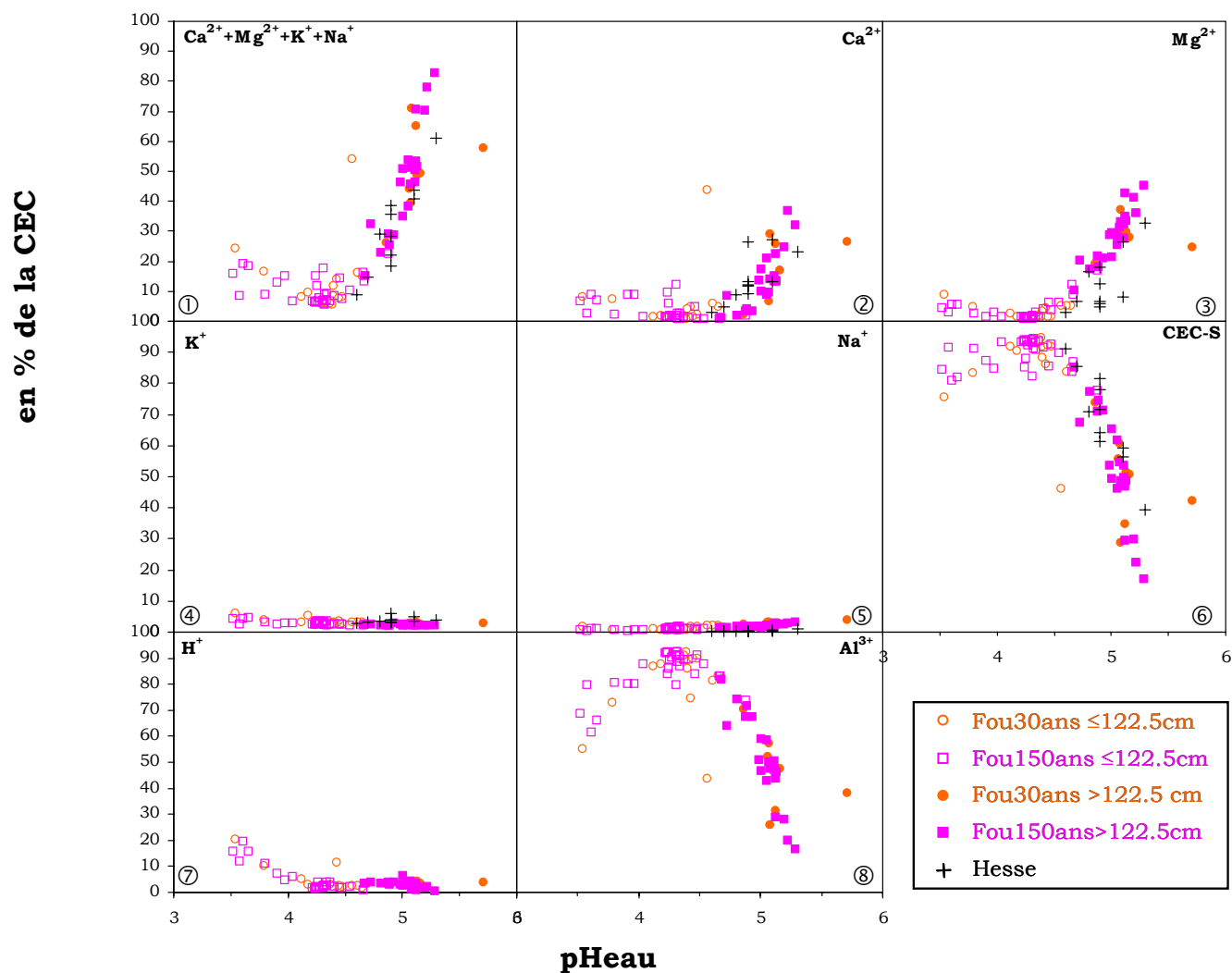


Figure 6 : Comparaison de la relation établie entre pH_{eau} et

① somme des cations basiques,

② à ⑤ cations basiques Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ ,

⑥ ions acides (=CEC-S),

⑦ cations H^+

et ⑧ Al^{3+} ,

exprimés en pourcentage de la CEC, à Hesse, pour *Fou30ans* et *Fou150ans*.

Pour les sols de Hesse, H^+ et Al^{3+} ne sont pas indiqués.

Pour Fougères, les symboles « ouverts » représentent les sols échantillonnés au-dessus de 122.5 cm de profondeur et les symboles « pleins » les sols en dessous de 122.5 cm de profondeur.

❖ **Le taux de saturation et la part des différents cations dans la CEC**

Lorsque l'on étudie l'évolution du taux de saturation en bases en fonction du pH, on constate qu'il y a relativement peu de variation du taux de saturation entre sites lorsque les sols se situent à des $pH_{eau} > 4.5$ (**figure 6, ①**).

Sur chacun des sites, la nette augmentation des taux de saturation en bases pour des $pH_{eau} > 4.5$ est principalement due à i) l'augmentation des teneurs en magnésium et calcium échangeables (**figure 6, ③ et ②**), et ii) à la forte diminution des cations acides (**figure 6, ⑥**), et surtout l'ion Al^{3+} , pour les sites *Fou30ans* et *Fou150ans* (**figure 6, ③**).

La détermination des proportions moyennes d'ion de la CEC nous permet d'estimer les garnitures du complexe d'échange.

- À Hesse, pour l'ensemble du profil : les ions acides sont majoritaires sur le complexe d'échange (69%), suivis des Ca^{2+} (14%), Mg^{2+} (13%) et K^+ (4%), Na^+ est absent (0%).
- Pour les sols du *Fou30ans*, à une profondeur inférieure à 122.5cm : Al^{3+} (81%) est majoritaire, suivi de Ca^{2+} (6%), H^+ (5%), Mg^{2+} (3%), K^+ (3%) et Na^+ (1%) ;
- Pour les sols du *Fou150ans*, à une profondeur inférieure à 122.5cm : Al^{3+} (85%) est suivi de H^+ (5%), Ca^{2+} (3%), Mg^{2+} (3%), K^+ (3%) et Na^+ (1%) ;
- Pour les sols du *Fou30ans*, à une profondeur supérieure à 122.5 cm : Al^{3+} (46%) est suivi de Mg^{2+} (29%), Ca^{2+} (16%), H^+ (4%), K^+ (3%) et Na^+ (3%).
- Pour les sols du *Fou150ans*, à une profondeur supérieure à 122.5 cm : Al^{3+} (51%) est suivi de Mg^{2+} (29%), Ca^{2+} (14%), H^+ (3%), K^+ (2%) et Na^+ (2%).

profondeur de sol	Qualificatif selon des classes de S/T			
	désaturé [0-20%]	oligosaturé [20-50%]	mésosaturé [50-80%]	saturé [80-100%]
≤ 5cm à Hesse et Fougères	15.4%	20.5%		
- tout le profil à Hesse - et ≤122.5cm pour les sites de Fougères	10.7%	14.1%	31.0%	
>122.5cm pour les sites de Fougères		46.5%	50.2%	

Diagramme 1 : Taux de saturation moyen déterminés pour Hesse, *Fou30ans* et *Fou150ans* à des profondeurs de sol comparables et répartis dans un diagramme combinant classes de saturation et profondeurs de sol

Tous les sites présentent un taux de saturation qui, depuis la surface, évoluent d'abord, en diminuant.

Pour les sols de Fougères, une très nette augmentation est observée aux grandes profondeurs (**Diagramme1**).

Chapitre II - Le couvert forestier

I - Introduction

Dans les écosystèmes feuillus tempérés, le cycle phénologique est caractérisé par l'alternance de périodes sans feuille, avec feuilles et avec évolution de l'indice foliaire. Après une phase de transition correspondant au débourrement, la phase d'expansion foliaire permet d'atteindre un indice foliaire maximal. En fin de saison, la chute des feuilles produit la litière. Les arbres transpirent pendant la saison de végétation et l'interception des précipitations est maximale lorsque l'indice foliaire atteint un développement maximum.

La degré de fermeture du couvert engendre aussi des variations d'énergie au niveau du sol et de la strate herbacée entraînant des modifications de l'évapotranspiration du sous-étage. La vitesse de minéralisation de la matière organique est aussi fonction de la température et de l'humidité du sol. Ainsi, le couvert intervient à plusieurs niveaux dans les échanges minéraux et géochimiques d'un écosystème forestier. Le retour de litière est une des entrées importantes d'éléments minéraux dans le cycle biogéochimique (recyclage des éléments), les apports atmosphériques également. En effet, l'indice foliaire est une surface réceptrice pour le dépôt d'éléments contenus dans les pluies, brouillards, neige, aérosol, poussières et gaz. Naturellement, en période défeuillée cette fonction ne concerne plus que l'indice de bois (branches). Les trouées du couvert et l'égouttement du feuillage constituent en partie le flux de lessivage, l'autre partie arrivant au sol par l'écoulement le long des troncs.

L'indice foliaire pilote les échanges dynamiques de matière et d'énergie et constitue un écran entre l'atmosphère et le sol, sa place centrale en a fait un paramètre clé dans le modèle de bilan hydrique biljou.

Dans le modèle, la longueur de la saison de végétation est déterminée à partir des dates de mise en place et de chute des feuilles. La durée d'expansion et de sénescence des feuilles est fixée à 30 jours. Les flux transpirés sont fonction de l'indice foliaire et l'interception des précipitations est réduite durant le débourrement et la chute des feuilles. Le rayonnement au sol, calculé à partir de la fonction de Beer-Lambert [1], décroît lorsque l'indice foliaire augmente.

$$I = I_0 e^{-kLAI} \quad \text{①}$$

I = flux de rayonnement transmis

I_0 = flux de rayonnement incident,

k = coefficient d'extinction de la lumière à travers le couvert

LAI = indice foliaire

*

**

Dans ce chapitre, nous avons analysé les données concernant le couvert forestier des saisons de végétation 2002 et 2003 avec pour objectifs :

- De déterminer les longueurs de saison de végétation, de déterminer les durées d'installation d'un couvert développé et de quantifier des variations d'interception de rayonnement notamment induite par une éclaircie sylvicole.

- Ensuite, nous avons dimensionné le couvert en mesurant l'indice de surface foliaire (LAI) et, réalisé des descriptions morphologiques de feuilles vertes (lumière et ombre) et de feuilles de litière.

La variabilité de critères morphologiques en fonction de la lumière et de la sylviculture est représentée. Une liaison entre la feuille et la structure du peuplement est discutée lorsqu'il s'agit d'une structure octroyée par les hauteurs des arbres.

- Enfin, l'impact de la structure du couvert sur les flux d'eau arrivant directement au sol et écoulés le long des troncs a été étudié.

II - Matériel et méthodes

1 - La mesure de l'interception lumineuse

En 2002 et 2003, des mesures du rayonnement transmis sous couvert ont été réalisées, en continu, à un pas de temps semi horaire, par 3 thermopiles linéaires installées à *Hesse36ans* et *Fou30ans*. Un cumul journalier des mesures est réalisé afin de déterminer un rayonnement global transmis au sol, R_g et incident au-dessus du couvert, R_{g0} .

Une interception du rayonnement est calculée selon la formule [2] :

$$In(\%) = (1 - R_g/R_{g0}) * 100 \quad \textcircled{2}$$

2 - La mesure d'indice foliaire

On appelle « indice de surface foliaire » associé au volume V (en anglais LAI ou leaf area index) la surface de l'ensemble des feuilles contenues dans V rapportée à la surface projetée, verticalement, de V sur le sol, ce dernier étant lui même assimilé à un plan horizontal. La surface des feuilles est mesurée sur une seule face pour tous les feuillus ainsi que pour les résineux n'ayant des stomates que sur un seul côté de leur aiguille (ex : la sapin pectiné). Dans le cas contraire (ex : l'épicéa commun), la surface totale de la feuille est prise en compte (on parle parfois d'indice des aiguilles – en anglais : NAI, needle area index)

Cette définition est celle donnée, par exemple, par Bréda *et al.* (2002). Certains auteurs s'accommodent d'une unité « des m^2 de feuille (une face) par m^2 de sol », ce qui facilite l'exposé, bien que l'indice de surface foliaire soit sans dimension (Holst *et al.*, 2004)

Son estimation a donné lieu au développement de nombreuses méthodes d'évaluation. Nous avons opté pour une méthode indirecte utilisant deux analyseurs de couvert LAI-2000 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) pour mesurer simultanément le rayonnement de référence et le rayonnement sous couvert.

Les campagnes de mesures ont été réalisées lorsque le développement foliaire était optimal par temps clair au lever et au coucher du soleil, lorsque le rayonnement est essentiellement diffus. Afin de réaliser le traitement des mesures sans estimer l'évolution de la luminosité au cours des mesures, (interpolation linéaire en fonction du temps entre deux acquisitions de références), nous avons réalisé les mesures sous couvert et de référence (tour ou clairière) de façon synchrone. Les opérateurs ont déclenché les mesures au signal sonore d'un talkie-walkie (les interférences éventuelles ont été surveillées). Pour masquer les opérateurs, un cache de ½ a été placé sur l'optique fish-eye et chaque point est mesuré en deux prises, opposées à 180 ° (par exemple orientées Nord et Sud, pour Fougères). Les mesures sous-couvert ont été réalisées si possible au-dessus des bacs de litières ou de points marqués à la peinture (Fougères) (**annexe A2**) ou des pluviomètres à Hesse pour permettre de réaliser des mesures inter-annuelles aux mêmes emplacements. Pour chaque nouvelle journée de campagne les deux capteurs optiques ont été inter-calibrés.

Le capteur LAI-2000 rend compte de tous les obstacles rencontrés par les radiations lumineuses filtrées dans la bande spectrale 300-490 nm ; en toute rigueur, la mesure réalisée par ce capteur correspond à un PAI (plant area index).

3 - Les mesures morphologiques et masse foliaire

3.1 - Prélèvement des échantillons de feuilles

❖ Échantillonnage des feuilles vertes

Des feuilles de lumière et d'ombre ont été échantillonnées sur les arbres de différents peuplements. Ces différents échantillonnages ont été réalisés en mettant à profit l'abattage d'arbres destinés à établir les biomasses de peuplement ; en conséquence les feuilles ont été collectées sur des arbres représentatifs des différentes classes de circonférence des peuplements. Les abattages d'arbres ont été réalisés pendant deux années ; ils ont permis les collectes suivantes : *Fou15ans* en 2002, *Fou30ans* en 2002, *Fou50ans* en 2002, *Fou88ans* en 2003.

En 2003, nous avons également récolté des échantillons foliaires pour les sites où un accès aux houppiers est rendu possible : *Fou30ans*, grâce à un échafaudage et *Fou15ans* en recourbant les jeunes arbres. Nous avons homogénéisé l'échantillonnage du *Fou15ans* avec celui du *Fou30ans* : un même nombre d'individus et des arbres regroupés dans un même bouquet ont

été prélevés. Les feuilles de la partie supérieure et des branches basses du houppier ont été collectées séparément.

Les effectifs de l'échantillonnage sont indiqués dans le **tableau 4**.

site	Feuilles	2002		2003	
		Nombre d'arbres	Nombre de feuilles	Nombre d'arbres	Nombre de feuilles
<i>Fou15ans</i>	lumière	10	190	9	90
	ombre	10	258	9	90
<i>Fou30ans</i>	lumière	10	100	9	90
	ombre	10	100	9	90
<i>Fou50ans</i>	lumière	8	610		
	ombre	8	532		
<i>Fou88ans</i>	lumière			12	120
	ombre			12	120

Tableau 4 : échantillonnage de feuilles vertes à Fougères en 2002 et 2003

❖ *Échantillonnage des feuilles de litière*

En octobre 2002, les feuilles ont été collectées pour *Fou15ans*, *Fou30ans*, *Fou88ans*, *Fou150ans*, *Hesse36ans* et *Hesse15ans*. En novembre 2003, ces mêmes sites d'études ont été ré-échantillonnés avec en plus un prélèvement de feuilles pour *Fou50ans*. Environ 150 feuilles (110-160) ramassées sur le sol, en différents emplacements, au hasard, sont échantillonnées.

3.2 - Préparation et méthodes de mesure

Afin de conserver au mieux la souplesse des feuilles (vertes ou de litière) nous avons stocké les échantillons, en attente de planimètrage, en chambre froide (4°C).

Un planimètre Li-Cor, Li-3000A combiné à un tapis roulant Li-3050A (Lincoln, Nebraska, USA) a été utilisé. Chaque feuille est acheminée entre la tête du planimètre coincée entre deux tapis roulant dont la vitesse de déplacement est de 6.35 cm/s. La pince est connectée à une centrale d'acquisition des données. Le transfert des données s'effectue sur un micro-ordinateur par l'intermédiaire d'un logiciel de communication. La résolution est de 1 mm² (1mm x 1 mm).

La surface, la longueur, la largeur moyenne et maximale a été mesurée pour chaque feuille individuellement.

Après un dessèchement à l'étuve, pendant 48h00 à 65°C, la masse est déterminée avec une précision du mg.

La réhydratation rapide des feuilles pesées individuellement nous a conduit à peser les feuilles par lot. En général, 10 feuilles ont été regroupées avant la mise en étuve. Les dix surfaces correspondant aux feuilles d'un lot sont sommées afin de calculer la surface spécifique (SLA=surface/poids) et la masse spécifique (LMA=poids/surface).

3.3 - Analyses des résultats

Les caractéristiques foliaires sont établies par site d'étude, en utilisant :

- les données morphologiques mesurées de façon individuelle pour chaque feuille : surface, longueur, largeur moyenne, largeur maximale
- le poids moyen d'une feuille (calculé à partir d'une pesée d'un lot de feuilles)
- les surfaces et masses spécifiques (déterminées par cumuls de dix feuilles).

4 – Pluviométrie

4.1 - Mesure des précipitations au-dessus des peuplements (Pi)

Avec un seuil de détection de 0.2 mm et un pas de temps semi horaire, les mesures automatiques de pluviométrie proviennent soit, d'une station météo INRA située au-dessus du site d'étude à Hesse soit, d'une station ONF implantée dans une clairière à Fougères.

4.2 -Mesure des précipitations atteignant directement au sol (Ps)

- Pour *Hesse36ans*, deux modalités de mesure permettent de déterminer Ps :

- la moyenne des lectures directes de 40 pluviomètres.

la moyenne des lectures de deux dispositifs de gouttières.

Chaque dispositif est suspendu par des mâts à hauteur de poitrine, il est relié à un compteur à auget de 93.6 ml et la surface collectrice correspond à environ 0.5 m².

- Le site *Fou30ans* est équipé de deux dispositifs de gouttière semblables à ceux de *Hesse36ans*.

Les mesures sont réalisées par un opérateur de terrain aussitôt que la pluviométrie d'une journée pouvait être collectée : à Hesse, entre mai et novembre 2002 et à Fougères, entre juillet et novembre 2002.

4.3 - Mesure de l'écoulement le long des troncs (Pt)

La pluie ruisselant le long des troncs est quantifiée par des équipements identiques sur *Hesse36ans* et *Fou30ans* : il s'agit d'un système de collier entourant l'arbre relié à un compteur à auget de 93.6 ml. Huit arbres ont été sélectionnés en fonction de leur circonférence et des classes de circonférence des peuplements en 2002 à Hesse et en 1996 à Fougères. Signalons que pour *Fou30ans*, la classe d'arbre des plus petites circonférences*, devenue orpheline, est reliée aux mesures de la classe supérieure dans les calculs de changement d'échelle.

Un écoulement le long des troncs à l'échelle du peuplement est une estimation où l'écoulement mesuré est multiplié par l'effectif de la classe de circonférence qu'il représente, les produits des différentes classes sont totalisés pour être multiplié par le rapport de la surface terrière sur la surface totale des arbres. Formulée selon l'équation [3], nous estimons une hauteur d'eau (mm).

$$P_t \text{ (mm)} = \left[\sum_1^i P_{(1,i)} \times n_{(1,i)} \right] \times \left[\frac{SG}{\sum_1^i \pi \times r^2 \times n_{(1,i)}} \times 10^{-4} \right] \quad \textcircled{3}$$

Pt : Écoulement le long des troncs d'un peuplement (mm)

(1, i) : effectif de colliers

P : volume d'eau mesuré sur un arbre (l)

n : effectif d'une classe de circonférence attribué à un arbre à collier

r : rayon moyen de la classe de circonférence (m)

SG : surface terrière du peuplement (m²/ha)

La fréquence des relevés est la même que pour les relevés de pluie au sol.

* Nota bene : Cette classe représente 1% de la surface terrière et 12 % du nombre de tiges de la placette d'étude.

4.4 - Pluie au sol totale

La pluie au sol, Psol, est calculée selon l'équation [4] :

$$P_{sol} = P_s + P_t \quad \textcircled{4}$$

5 – Les flux de sève

La transpiration des arbres se mesure au moyen de capteurs de flux de sève installés dans des tiges de différents diamètres (Granier, 1985). Au cours de cette thèse, 10 arbres à Hesse et 7 arbres à Fougères ont été équipés de capteurs en 2002. Sur le site de Hesse, nous disposons également des mesures réalisées sur 10 arbres en 1997.

Un changement d'échelle permet de passer de la transpiration individuelle des arbres à celle du peuplement : la transpiration de peuplement est calculée en se basant sur les inventaires et en prenant en compte les variations du flux au sein de l'aubier (Granier et *al.*, 2000).

6 - Les analyses descriptives

Les analyses descriptives ont été effectuées avec la procédure means de SAS : moyenne, minimum, maximum, erreur standard (stderr). Afin de calculer un intervalle de confiance $IC = stderr \times T$, T est déterminé pour $n-1$ degré de liberté (Snedecor G. W., Cochran W. G., 1957), avec un nombre de données disponibles de n , T est établi à la probabilité de $p=0.05$.

III – RÉSULTATS

1 - Fermeture du couvert : phénologie, effet du milieu et de l'éclaircie

Les dates du début du débourrement et du début de la chute foliaire sont déterminées à partir des variations des interceptions du rayonnement global pour *Hesse36ans* et *Fou30ans* en 2002 et 2003 (**figure 7**). Le début de mise en place foliaire est identique pour les deux sites, estimée au jour 113 (23 avril). La défeuillaison, pour les deux sites, démarre le jour 296 en 2002 (23 octobre), et le jour 314 en 2003 (10 novembre). Un développement phénologique synchrone entre les deux sites d'étude est mis en évidence.

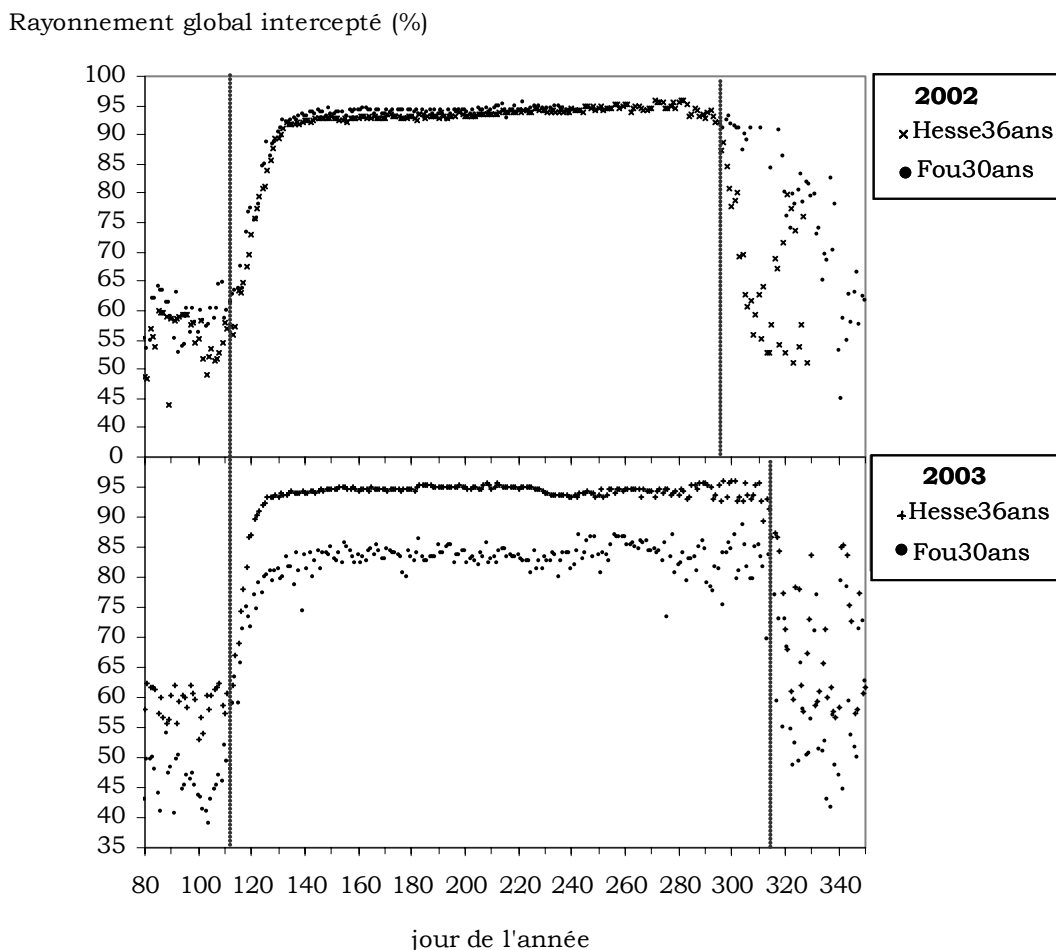


Figure 7 : Évolution de l'interception du rayonnement global au cours des saisons de végétation, pour *Hesse36ans* et *Fou30ans*, en 2002 (en haut) et 2003 (en bas), année de l'éclaircie pour *Fou30ans*.

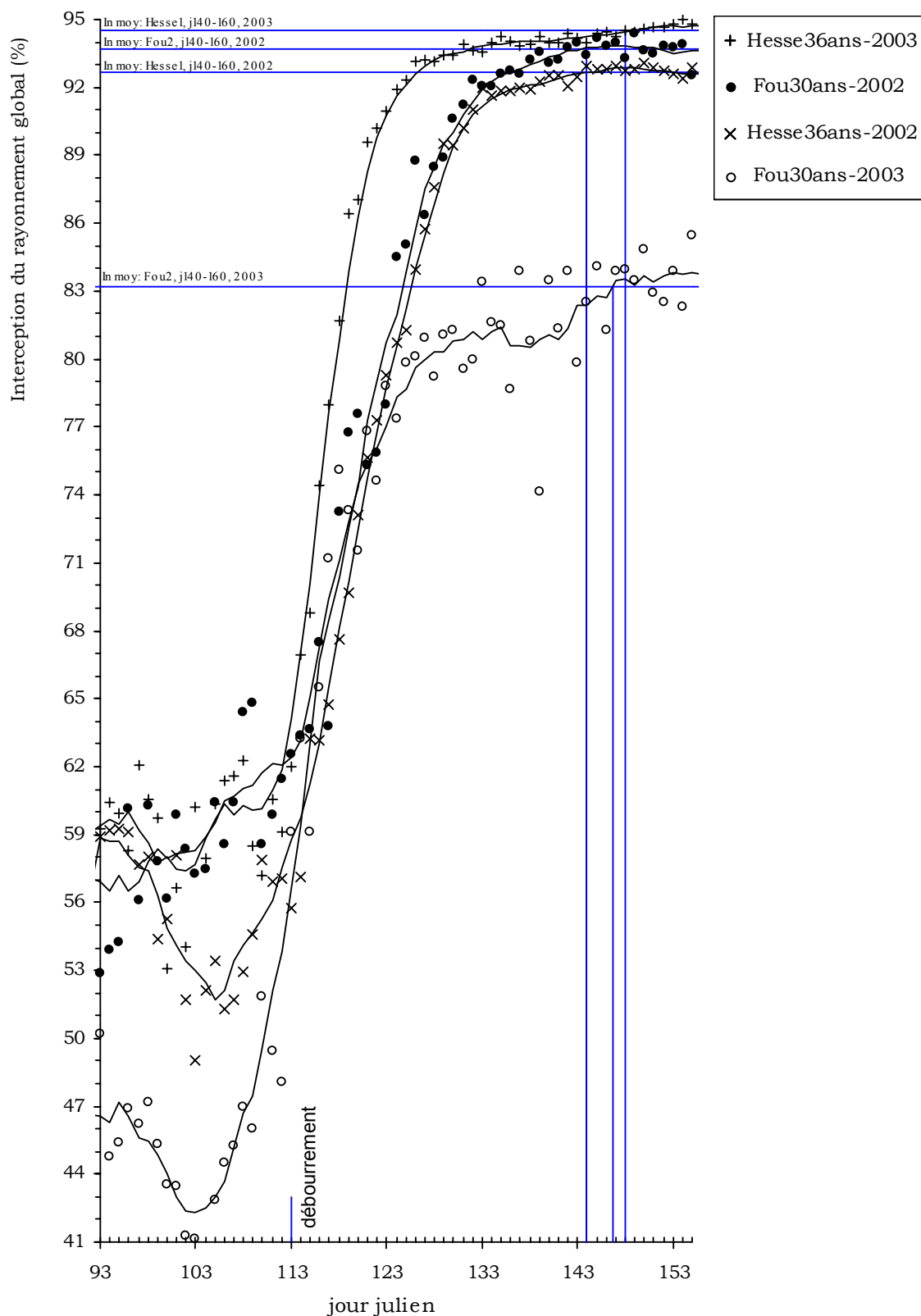


Figure 8: Courbes des moyennes mobiles du rayonnement global intercepté sur *Hesse36ans* et *Fou30ans* en fonction des jours, au début des saisons de végétation 2002 et 2003. Les interceptions du rayonnement du jour 140 à 160 sont moyennées (In moy) et représentées horizontalement sur le graphique, l'intersection avec la moyenne mobile fixe la date de la fin de la mise en place foliaire. Le début du débourrement est rappelé (jour 113).

Afin de déterminer la fin de la mise en place foliaire, les variabilités journalières importantes (conditions climatiques, hétérogénéité du couvert) ont été lissées par des moyennes mobiles (période=7 jours).

Une interception du rayonnement moyen, In moy, est calculée sur une période pendant laquelle le couvert est fermé en début de saison de végétation, par exemple du 20 mai au 9 juin (j140 à 160). L'intersection de In moy avec la courbe de moyenne mobile détermine la fin de mise en place foliaire : en 2002 au jour 144 pour les 2 sites, en 2003 au jour 148 pour *Hesse36ans* et entre les jours 146 et 147, pour *Fou30ans* (**figure 8**). La durée de l'étalement foliaire varie entre 31 et 35 jours.

Cette durée a été estimée à 32 jours en 1997 pour *Hesse36ans* (Lebaube *et al.*, 2000).

Nous constatons qu'en pleine saison de végétation, les proportions du rayonnement global transmis au sol sont similaires sur les deux sites en 2002, alors que l'année suivante, le rayonnement global est davantage transmis au sol du *Fou30ans*, fortement éclairci durant l'hiver. Des moyennes, calculées du jour 140 à 230, quantifient les proportions de rayonnement interceptées : 93 et 94 % en 2002, pour *Hesse36ans* et *Fou30ans*, et 95 et 83 % en 2003.

Par conséquent, nous venons de mettre en évidence que :

Les différences de climat éventuelles, entre un site lorrain et un site breton, n'apparaissent pas dans la mise en place et la chute des feuilles au cours de deux années de suivi. Ceci, malgré des températures hivernales plus douces à Fougères qu'à Hesse, ce qui confirmerait que le débourrement du hêtre est peu sensible à la température.

Les durées de mise en place des feuilles estimées sont cohérentes avec celle de 30 jours fixée dans le modèle.

Le rayonnement au sol apparaît homogène entre peuplements à couvert fermé (LAI compris entre 7.7 et 8.15). Une forte éclaircie (LAI=3.73) augmente de 11% le rayonnement au sol.

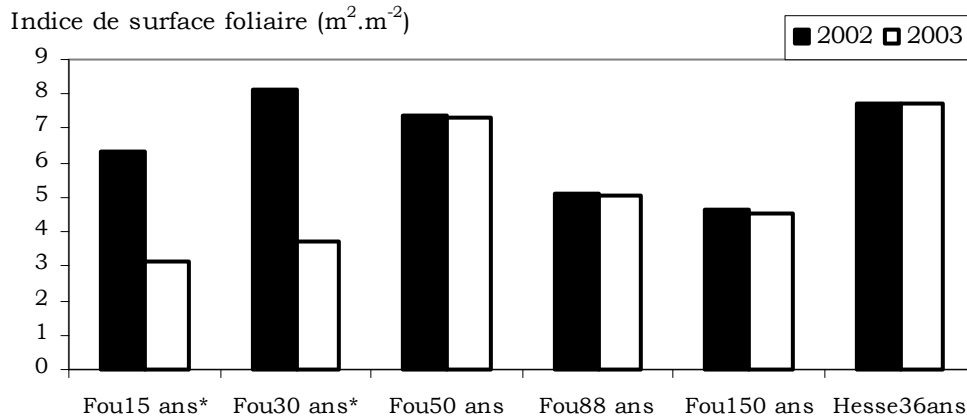


Figure 9 : Indice de surface foliaire mesuré en 2002 et 2003 sur les placettes d'étude avec le capteur LAI-2000. Les placettes éclaircies entre 2002 et 2003 sont indiquées par un astérisque.

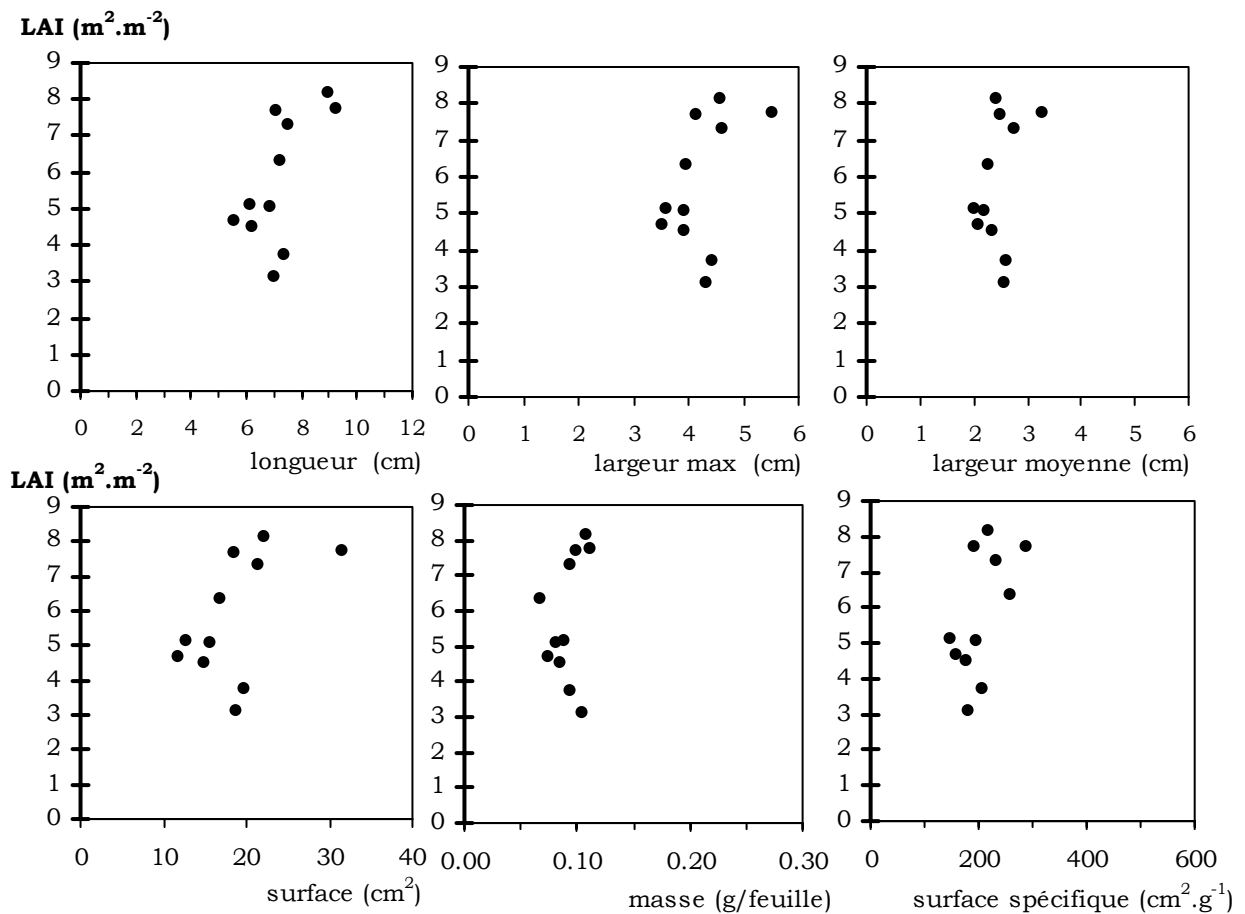


Figure 10 : relations établies entre l'indice foliaire du peuplement (LAI) et la longueur, la largeur, la largeur moyenne, la surface, la masse et la surface spécifique des feuilles de litière.

2- Caractéristiques morphologiques des feuilles prélevées

Les caractéristiques morphologiques et pondérales sont détaillées pour les feuilles vertes (**annexe A3**) et les feuilles de litières (**annexe A4**).

3 - Indice de surface foliaire

Compte tenu des résultats obtenus par Dufrêne et Bréda (1995), nous utilisons les trois anneaux centraux du capteur LAI-2000 pour établir nos mesures. Les mesures réalisées sont directement assimilées à des indices de surface foliaire, la proportion de lumière interceptée par le bois (troncs, branches) étant faible pendant la période de feuillaison maximale car les feuilles masquent les organes ligneux. Ainsi, le terme d'indice foliaire ou l'abréviation du terme anglophone leaf area index, notée LAI, sera utilisé dans la suite, pour rendre compte de nos mesures.

L'indice foliaire, mesuré successivement en 2002 et 2003, pour un même site non éclairci, se montre extrêmement constant, avec 0.03 points de LAI d'écart au minimum et 0.16 point d'écart au maximum. Dans les situations d'éclaircies, les écarts d'une année à l'autre sont forts : de 3.21 à 4.42 points de LAI (**figure 9 ou tableau 5**).

On observe encore que les indices foliaires varient beaucoup en fonction du peuplement. Entre *Fou30ans* et *Fou150ans* en 2002, par exemple, l'écart d'indice foliaire est de 3.48 points (**figure 9 ou tableau 5**).

site	LAI en 2002	i.c.	n	LAI en 2003	i.c.	n
fou15ans	6.33	± 0.304	16	3.12*	± 0.128	16
fou30ans	8.15	± 0.059	16	3.73*	± 0.075	16
fou50ans	7.37	± 0.075	16	7.30	± 0.085	16
fou88ans	5.13	± 0.160	16	5.08	± 0.147	16
fou150ans	4.67	± 0.118	21	4.51	± 0.109	21
Hesse36ans	7.70	± 0.300	45	7.73	± 0.243	45

Tableau 5 : Mesures de LAI à Fougères et à Hesse réalisées en 2002 et 2003 en utilisant simultanément deux capteurs (LAI-2000, Li-Cor, Nebraska): i.c.=intervalle de confiance, n= nombre de points de mesure.

4 - Morphologie des feuilles vertes et feuilles de litière

❖ Comparaison des feuilles vertes et de litière

En établissant par site et par année, une gamme de variation des masses spécifiques des valeurs moyennes des feuilles de lumière et des feuilles d'ombre ; on observe que les valeurs moyennes des feuilles de litière sont comprises entre deux bornes. En effet, les gammes de variations sont : pour *Fou15ans* en 2002 : [74.28 ; 32.52] et en 2003 : [81.13 ; 53.92], pour *Fou30ans* en 2002 : [60.37 ; 24.64] et en 2003 : [80.06 ; 38.9], pour *Fou88ans* en 2003 : [52.93 ; 35.11] et les masses spécifiques des feuilles de litière sont pour *Fou15ans* en 2002: 40.20 et en 2003 : 55.63, pour *Fou30ans* en 2002 : 48.38 et en 2003 : 48.20, pour *Fou88ans* en 2003 : 52.10.

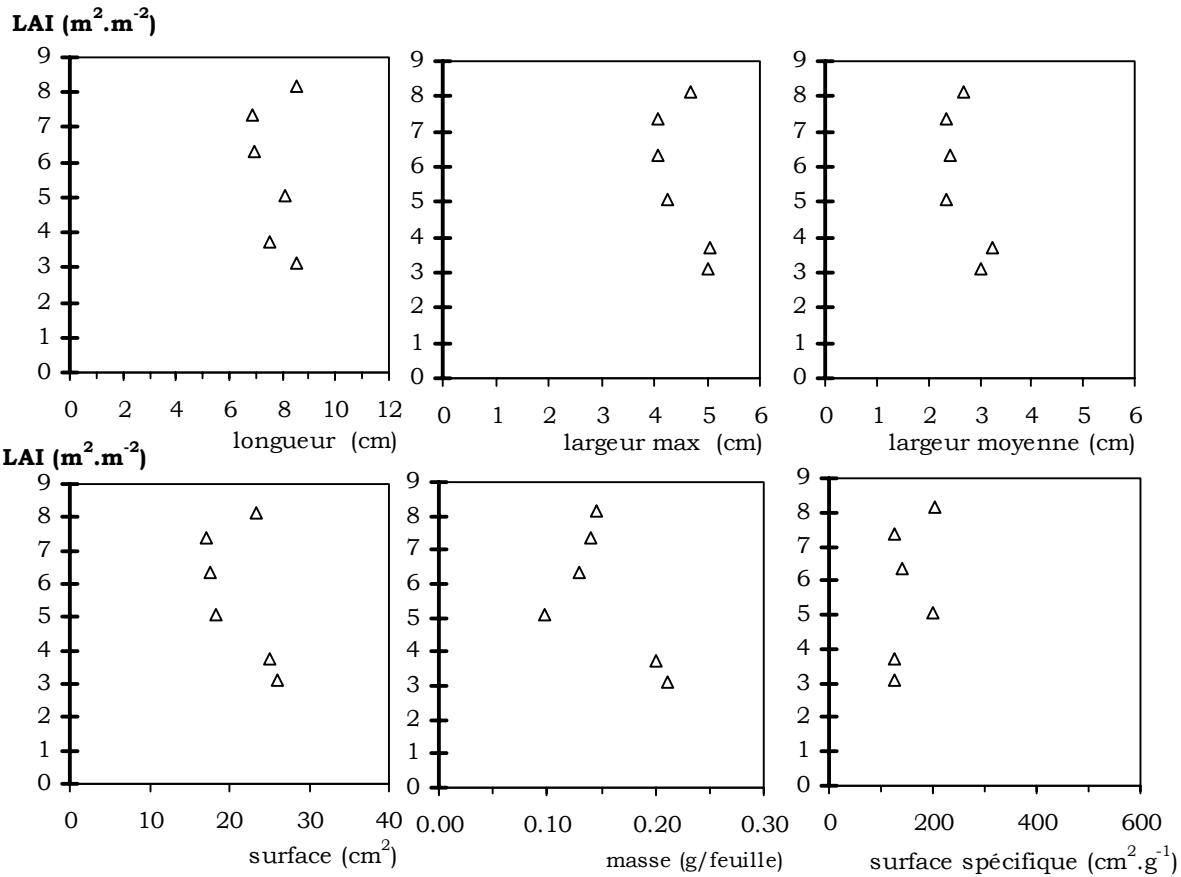


Figure 11 : relations établies entre l'indice foliaire du peuplement (LAI) et la longueur, la largeur, la largeur moyenne, la surface, la masse et la surface spécifique des feuilles de lumière.

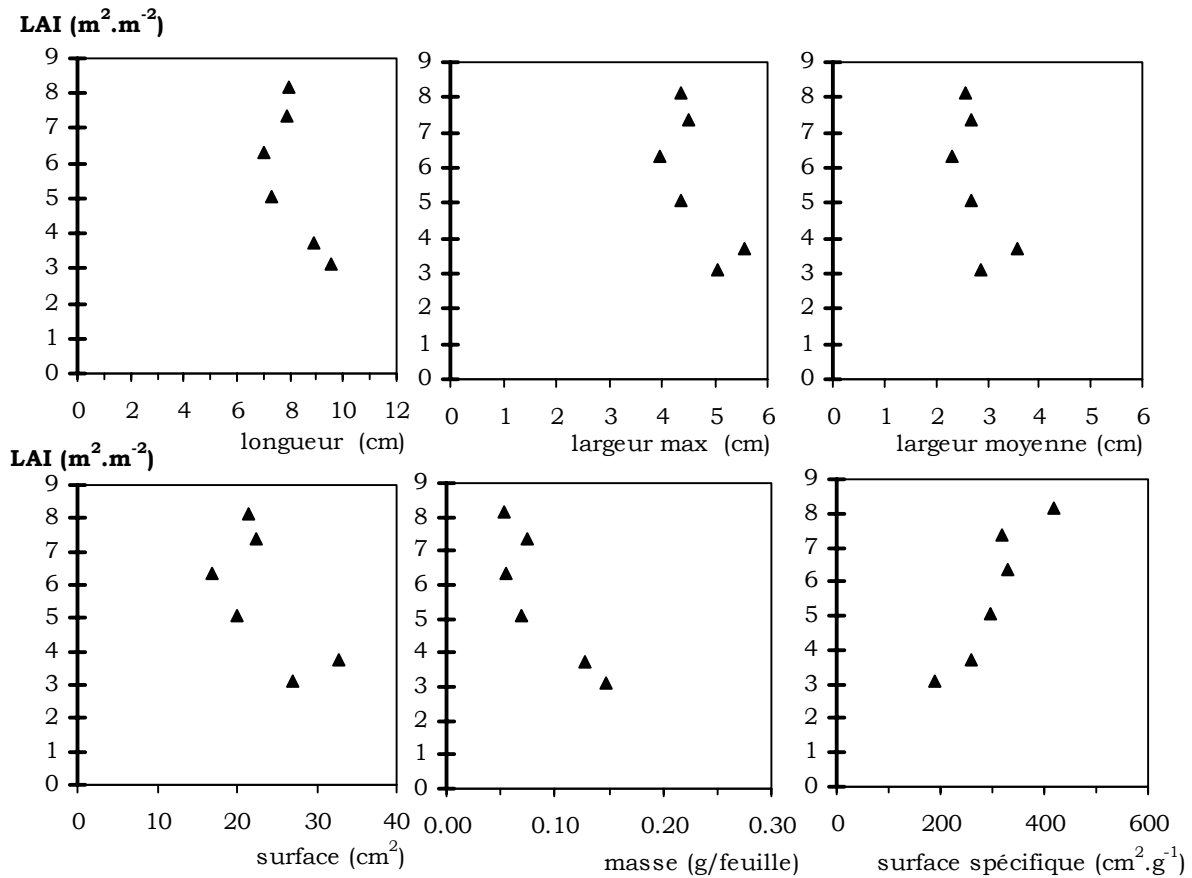


Figure 12 : relations établies entre l'indice foliaire du peuplement (LAI) et la longueur, la largeur, la largeur moyenne, la surface, la masse et la surface spécifique des feuilles d'ombre.

❖ *Relations avec l'éclaircissement*

Une augmentation de la masse spécifique moyenne des feuilles de lumière par rapport aux feuilles d'ombre est observée ; on attribue cette augmentation à un éclaircissement plus fort de la base vers le sommet de la couronne (Aussenac et Ducrey, 1977 ; Ninemets, 1995, Bartelink, 1997 ; Van Hees, 1997). De plus, en réaction à des éclaircies sylvicoles menées au cours de l'hiver 2002-2003, les feuilles de lumière et d'ombre des peuplements *Fou15ans* et *Fou30ans* ont des masses spécifiques plus élevées en 2003. En parallèle, on constate que les feuilles de litière du *Fou15ans* ont des masses spécifiques également plus élevées en 2003 alors que les masses spécifiques du *Fou30ans* sont identiques (\pm l'intervalle de confiance).

Le LAI est un paramètre qui permet d'avoir une estimation du microclimat lumineux des peuplements. Une représentation des relations établies entre le LAI de 2002 et de 2003 et les différents paramètres descripteurs : longueur moyenne des feuilles (limbe + pétiole), largeur maximale, largeur moyenne, surface, masse et surface spécifique est réalisée, pour les feuilles de litière (**figure 10**), les feuilles de lumière (**figure 11**) et les feuilles d'ombre (**figure 12**).

La tendance globale d'une augmentation de la masse des feuilles au fur et à mesure que le LAI diminue apparaît plus nettement pour les feuilles d'ombre que pour les feuilles de lumière et de litière.

L'effet du LAI sur la masse spécifique, ou la surface spécifique, peut-être envisagé par différentes approches expérimentales qui ne conduisent pas aux mêmes conclusions.

Bouriaud *et al.*, (2003) ont conclu que la corrélation entre les deux variables est non significative. Leur approche a consisté à utiliser le PAI (Plant area index) mesuré au Licor-2000, sur 23 placettes de hêtre et des surfaces spécifiques de feuilles de litière.

Èermak (1998) en réalisant un cumul de la distribution verticale du LAI et en déterminant les masses spécifiques par intervalle dans le houppier pour *Quercus robur* L., *Fraxinus excelsior* L. et *Tillia cordata* Mill. a mis en évidence une relation d'allure sigmoïde.

L'hypothèse selon laquelle l'augmentation de lumière dans le houppier augmente la demande évaporative et conduit probablement à une contrainte hydrique plus sévère, est évoquée par Niinemets (synthèse, 1995). Cet auteur montre que la diminution du contenu en eau des feuilles de hêtre est liée à l'augmentation des masses spécifiques et, par conséquent, à l'augmentation du rayonnement. Dans cette publication, on nous apprend aussi que, des feuilles de hêtre développées dans des conditions de rayonnement plus élevé, ont des teneurs en lignine plus élevées. Et, qu'une lignification plus forte des parois cellulaires tolère des potentiels hydriques plus négatifs.

Globalement, il ressort que les masses spécifiques plus élevées des feuilles de lumière pourraient traduire une meilleure résistance à la contrainte hydrique.

❖ Relation avec l'âge

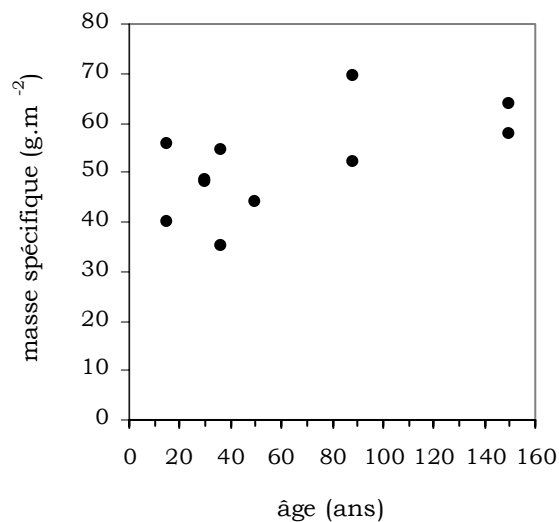
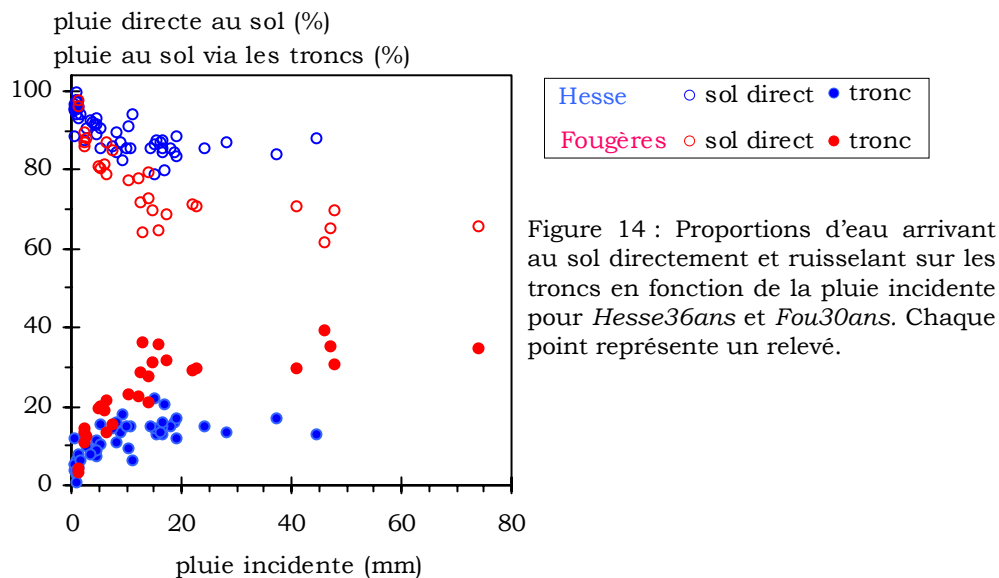


Figure 13 : masse spécifique des feuilles de litière en fonction de l'âge des peuplements

Si la tendance globale des masses spécifiques moyennes des feuilles de litière augmente avec la maturité des peuplements (**figure 13**), on peut imaginer que c'est la hauteur qui en est la cause. En effet, dans la littérature des résultats ont été acquis, pour des feuilles vertes et aucune corrélation significative n'est montrée entre la masse spécifique et l'âge pour des feuilles de hêtres âgés de 15 à 42 ans (Niinemets, 1995) et de 55 à 195 ans (Duquesnay, 1998). En revanche des relations entre masse spécifique et hauteur des hêtres ($r^2=0.23$, $p<0.05$) et entre hauteur et âge ($r^2=0.79$, $p<0.001$) sont indiquées pour Niinemets (1995).

5 - Les flux d'eau dans le couvert



La pluie totale qui atteint le sol est représentée en distinguant celle qui a traversé le feuillage de celle qui a ruisselé le long des troncs. Nous avons exprimé le pourcentage de pluie au sol, par le couvert ou par ruissellement le long des troncs, selon la pluie incidente, pour *Hesse36ans* et *Fou30ans* (**figure 14**). Pour les hêtres de Fougères, la proportion de pluie ruisselant le long des troncs (23% en moyenne) est plus élevée qu'à Hesse (11% en moyenne).

Il ressort que les différences de structure du couvert jouent sur les variations du flux d'eau. Ce qui est en accord avec les résultats de Aussenac (1975) qui montre, pour le douglas, que l'augmentation de l'écoulement le long des troncs avec les précipitations incidentes est plus forte pour des peuplements à forte densité.

Les quantités de pluie interceptée par les deux peuplements sont cependant très proches : 17 % à Hesse et 19 % à Fougères.

Nous présentons un tableau publié par Granier (1996), qui présente les interceptions de différentes essences (**tableau 6**) :

Essence	In (% de Pi)	Références
<i>Fagus sylvatica</i> L.	20-25	Aussenac, 1972 et 1975 ; Aussenac et Boulangeat, 1980 ; Biron, 1994
<i>Quercus petraea</i> (Mattuschka) Liebl.	20-28	Nizinski et Saugier, 1989 Bréda, 1994
<i>Picea abies</i> (L.) Karsten	21-38	Aussenac, 1968 ; Biron, 1994 ; Bultot et al., 1972
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirbel) Franco	34-37	Aussenac 1975 ; Aussenac et Boulangeat, 1980
<i>Pinus silvestris</i> L.	30	Aussenac, 1968
<i>Abies grandis</i> (Douglas ex ; D. Don) Lindley	43	Aussenac, 1968

Tableau 6 : Quelques valeurs de l'interception des précipitations, exprimée en pour cent des précipitations incidentes

6 - Les flux de transpiration

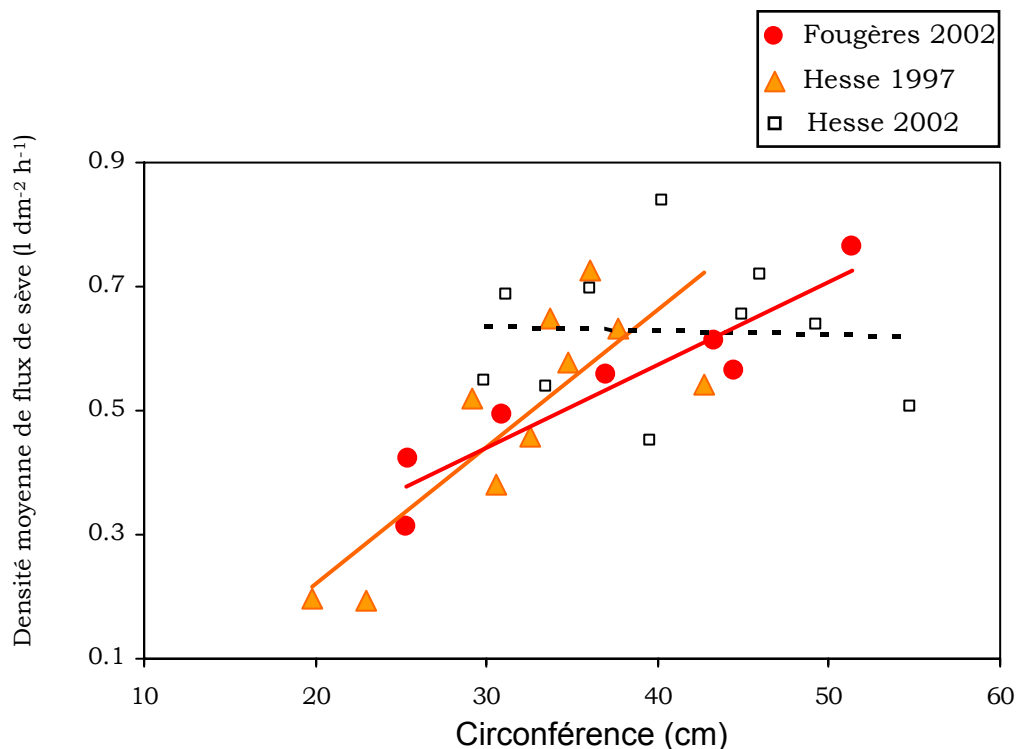


Figure 15 : Densité de flux de sève en fonction de la circonférence pour deux couvertures fermées, Hesse36ans en 1997 et Fou30ans en 2002, et un couvert succédant à une éclaircie réalisée en 1999, Hesse36ans en 2002.

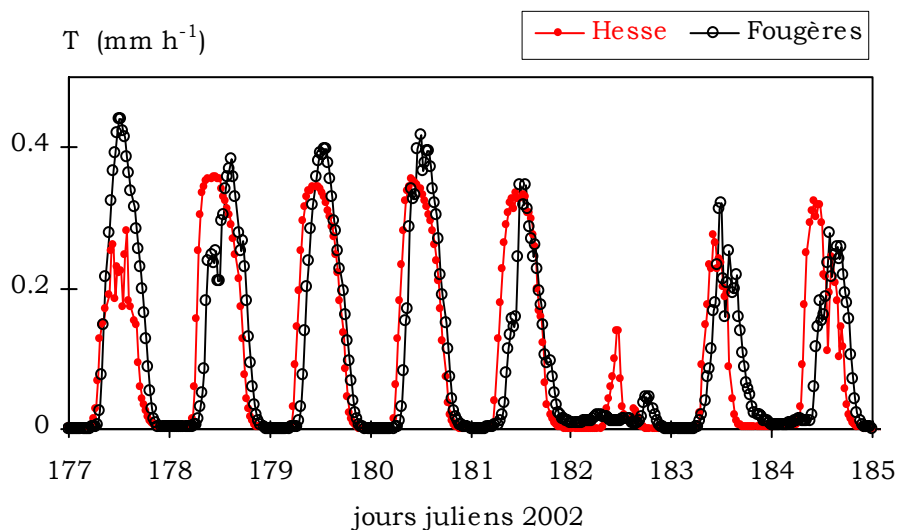


Figure 17 : Transpiration des peuplements obtenue à partir des mesures du flux de sève du 26 juin au 3 juillet 2002 à Hesse et Fougères.

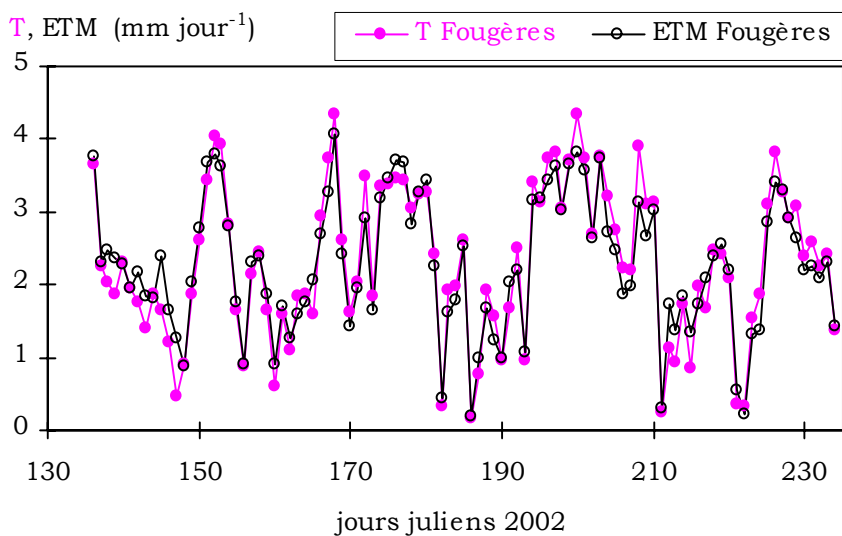


Figure 18 : Transpiration modélisée au pas de temps journalier comparée à la transpiration du peuplement obtenue à partir des mesures du flux de sève du 16 mai au 22 août 2002 à Fougères.

- Afin de vérifier par la mesure si les deux peuplements participent à un épuisement de la réserve hydrique du sol de manière équivalente, la transpiration des arbres mesurée au moyen de capteurs de flux de sève a été quantifiée.

Des cinétiques journalières de la densité de flux de sève lors de deux journées de 2002 montrent que les arbres des 2 peuplements ont des niveaux de transpiration qui sont proches et sont assujettis à une même variabilité entre les individus (**figure 16**). Bien que, la forte compétition entre les tiges induit à Fougères une forte stratification de la transpiration des arbres en faveur des arbres dominants.

À l'échelle du peuplement, on peut montrer (**figure 17**), que les niveaux maxima de transpiration sont très voisins sur les 2 sites, de l'ordre de 0.35 à 0.4 mm h⁻¹. Les écarts observés sont sous la dépendance des différences climatiques entre les 2 sites : par exemple, la journée 177 était ensoleillée à Fougères et couverte à Hesse. Pour s'affranchir dans cette comparaison, des différences climatiques entre les 2 sites, la démarche a été de calibrer un modèle de transpiration sur un des deux sites puis d'appliquer ce modèle à l'autre site. L'étape de calibration a été effectuée sur le site de Hesse (Granier et *al.* 2000) et les données météorologiques d'entrée sont celles de Fougères. Une comparaison entre la transpiration modélisée et la transpiration obtenue à partir des flux de sève des arbres de Fougères est réalisée (**figure 18**). L'adéquation étroite mise en évidence entre les transpirations confirme le fonctionnement hydrique très similaire des deux peuplements.

Chapitre III - La réserve utile des sols

I - INTRODUCTION

La réserve utile du sol (RU) est définie comme la quantité d'eau disponible pour la végétation entre une valeur maximale atteinte à la capacité au champ et une valeur minimale, atteinte lorsque l'on estime que la tranche de sol considérée ne peut plus fournir d'eau à la végétation. La réserve en eau du sol évolue entre ces deux bornes en fonction des quantités d'eau arrivant au sol et des quantités d'eau quittant le sol et, constitue une des composantes de base dans la modélisation de bilan hydrique. Dans tout modèle de bilan hydrique, le calcul de l'évolution au cours du temps de la réserve en eau du sol constitue une des premières finalités du modèle (Choisnel, 1992).

La fanaison permanente pour les plantes de grandes cultures qui par convention correspond à un $pF=4.2$ (environ -1.6 MPa) est une valeur fréquemment utilisée pour le point de flétrissement permanent. Le point de flétrissement est censé correspondre à la limite inférieure de l'eau disponible pour la végétation ; mais les arbres forestiers sont souvent capables d'extraire de l'eau d'un sol à un potentiel plus négatif (pour les chênes voir Bréda *et al.*, 2002a).

Il a aussi été établi, expérimentalement, qu'un seuil de déficit hydrique induit une fermeture stomatique et un arrêt de la croissance radiale, lorsque la quantité d'eau disponible est inférieure à 40% de la réserve utile (Bréda *et al.*, 1993). Le modèle de bilan hydrique, biljou, utilise ce seuil de déficit hydrique.

Biljou (Granier *et al.*, 1999) est un modèle de bilan hydrique qui rend compte des caractéristiques bien spécifiques du milieu forestier ; à savoir, des réductions dans les entrées pluviométriques par l'interception des précipitations et des régulations du flux de transpiration

qui sont fonction des conditions climatiques et édaphiques. À base écophysologique, les simulations, d'un pas de temps journalier, permettent de rendre compte des interactions entre la réserve en eau du sol, la demande atmosphérique et la transpiration, selon les valeurs de l'indice foliaire (LAI) et de la réserve en eau utile (RU) à la plante. LAI et RU sont les paramètres indispensables de chaque simulation.

*

**

Ce chapitre, est dédié à l'étude approfondie de la réserve utile. Des descriptions du système racinaire sont réalisées sur les sites d'études *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*, afin de déterminer un paramètre du modèle biljou, qui est la profondeur d'enracinement et les densités racinaires dans les différents horizons. On a cherché à établir des relations entre l'enracinement et la densité apparente du sol. Une description du mode d'occupation des racines à l'aide d'une cartographie 2D permet d'appréhender la dispersion racinaire en profondeur ; ce qui amènera, par la suite, à établir une réserve utile qui rend compte des proportions de sol avec racines (chapitre bilan hydrique).

L'examen des teneurs en eau dans le sol est réalisé afin de confirmer ou d'infirmer la relation entre les variations d'eau et le prélèvement des arbres. Un déstockage d'eau est montré pour le site *Fou150ans*, avant la saison de végétation : des hypothèses sont avancées.

Des mesures du potentiel de base sont présentées. Des valeurs inférieures au point de flétrissement permanent théorique ($pF=4.2$) ont été mesurées.

En conséquence, la méthode des paliers pour déterminer l'humidité au point de flétrissement (chapitre bilan hydrique) paraît être une alternative pertinente. D'autant plus que des simulations réalisées pour des feuillus de Lorraine révèlent que l'année où le stress hydrique des feuillus est à son paroxysme, depuis 1950, est 2003 (Bréda *et al.*, 2004).

II - Matériel et méthodes

1 - Les racines

Une description *in-situ* du système racinaire a été réalisée pour *Hesse36ans* en novembre 2003 et pour *Fou30ans* et *Fou150ans* en juin 2003.

Le comptage des impacts de racine observés sur la face d'un front de fosse est réalisé au travers d'une grille de maille décimétrique. Dans chaque maille, le nombre de racines par classe de diamètre (< 3 mm, 3-5 mm, 5-10mm, 10-20 mm, > 20 mm) a été noté comme indiqué dans Bréda et *al.*, (1995).

La densité de racines est ensuite exprimée par unité de surface décrite puis rapportée à 1 m². La prospection en profondeur a été arrêtée, pour *Hesse36ans*, à l'affleurement de la dalle, pour *Fou30ans* dans l'arène granitique très fortement indurée, alors que pour *Fou150ans* l'arène granitique était moins indurée. Les dimensions des surfaces d'observation sont : 200 cm de profondeur et 220 cm de large (4,4 m²) pour *Hesse36ans*, 250 cm de profondeur et 240 cm de large (6 m²) pour *Fou30ans*, 300cm de profondeur et 240 cm de large (7.2 m²) pour *Fou150ans*. La distance du front de fosse à l'arbre (d'une circonférence de 622 mm) est de 1.30 m à *Hesse36ans*, de 1.10 m (circonférence 1530 mm) à *Fou150ans* et de 55 cm (circonférence 440 mm) à *Fou30ans*.

2 - Les glosses

Nous avons utilisé une grille utilisée pour le comptage racinaire pour effectuer un relevé des glosses, par une observation au travers du maillage. Par principe, une maille de comptage traversée en faible partie ou complètement par une glosse était notée 1 (par opposition au sol exclusivement matriciel noté zéro). Cette observation a uniquement été réalisée pour le peuplement *Fou150ans*, en dessous de 120 cm de profondeur.

3 - La teneur en eau du sol

3.1- Instrumentation des sites

Un suivi de la teneur en eau du sol a été réalisé à intervalles de temps réguliers et pour les différentes tranches de sol. Ces humidités sont obtenues par des mesures neutroniques et par deux méthodes TDR (Time-domain Reflectometry) différentes, suivant le site.

❖ **Humidité neutronique**

Les mesures de sonde à neutrons (Nordisk Elektrisk Apparatfabrik, Danemark) sont exclusivement réalisées sur le site de Hesse. L'installation de neuf tubes permet d'accéder à différentes tranches de sol : une mesure est réalisée tous les 10 cm jusqu'à la profondeur de 100 cm et tous les 20 cm en dessous. Deux tubes descendent jusqu'à 2.2 m de profondeur, les autres à 1.6 m. Le rythme de mesure varie entre une fois par mois, de novembre à mai, et 2 à 4 mesures par mois au cours de la saison de végétation 2002. En 2003, nous ne disposons, pour la saison de végétation, que d'une mesure en juin et 2 mesures en août.

Les densités apparentes ont été déterminées à l'aide d'un gamma-mètre (Densimètre Campbell 501 B, Logan, USA), par niveau de mesure au moment de l'installation des tubes d'accès (1996).

❖ **Méthodes TDR**

Un système TRASE, (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP., Santa Barbara ,USA), réalise les mesures sur le site de *Hesse36ans* depuis 2002 et un système TRIME (IMKO, Ettlingen, D) associé à des sondes « P2G » délivre les mesures sur les sites *Fou30ans* et *Fou150ans* depuis 1999.

L'automatisation des mesures permet une acquisition horaire des mesures.

Les sondes sont insérées à des profondeurs de sol identiques sur tous les sites : 10, 30, 55, 80, 120 cm et pour *Fou150ans* sont ajoutés 160, 200 et 250 cm. Le nombre de sondes peut varier selon la profondeur instrumentée. Pour *Fou30ans*, des mesures sont répétées quatre fois par profondeur. Pour *Fou150ans*, des mesures sont répétées quatre fois par profondeur, et six fois à 80 et 120 cm. À Hesse, des mesures sont répétées quatre fois par profondeur aux profondeurs 10, 30, 55 cm et deux fois à 80 et 120 cm.

Sous le coup de pannes (coupure de courant, sonde défectueuse), la disponibilité effective des mesures horaires ne correspond pas toujours au parc de sondes installées.

3.2 - Calculs

Les teneurs en eau sont exprimées par rapport au volume de sol (θ), à différentes profondeurs.

Une réserve en eau est calculée par tranche de sol, entre les dates t_1 et t_2 , selon l'équation [5] :

$$\Delta R = [\theta \times z]_{t_2} - [\theta \times z]_{t_1} \quad (5)$$

z = épaisseur de la tranche de sol en mm.

La fraction relative de la réserve en eau utile est calculée selon l'équation [6]

$$REW = (R - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}) \quad (6)$$

R = réserve du jour, R_{\min} teneur en eau minimale, R_{\max} teneur en eau à la capacité au champ

4 - Potentiel de base

L'évolution de l'état hydrique des arbres des peuplements de *Hesse36ans* et *Hesse15ans* a été appréhendée tout le long de la saison de végétation 2003 par des mesures de potentiels hydriques foliaires au moyen d'une chambre à pression. Ce potentiel hydrique mesuré en fin de nuit est représentatif de l'état de contrainte hydrique en début de journée, c'est-à-dire lorsque l'arbre s'est rechargé en eau et a reconstitué ses réserves aux dépens de l'eau du sol. Ce potentiel appelé potentiel de base, Ψ_b , est en équilibre avec celui du sol. Le potentiel de base est négatif et s'exprime en MPa.

Dans le peuplement *Hesse36ans*, les rameaux de trois arbres dominants ont été prélevés dans le houppier à deux hauteurs. Ces arbres sont notés D12, D14 et D202; la hauteur correspond à la hauteur du palier de l'échafaudage où les prélèvements sont réalisés : 10 m et 14 m du sol. Au cours de la saison un arbre dominé a été rajouté dans le protocole de mesures. Pour ce hêtre noté d, le prélèvement des rameaux feuillés a été réalisé sur le palier situé à 10 m du sol, cet arbre était moins haut que les arbres D12, D14 et D202.

Habituellement trois rameaux feuillés par arbre déterminent le potentiel de base moyen d'un arbre, mais deux rameaux seulement déterminent le potentiel de base moyen le 24 juillet, pour l'arbre D202 à 14 mètres et pour les arbres D12 et D202 à 10 mètres, et le 10 août pour l'arbre D14 à 14 m. Quatre rameaux déterminent le potentiel de base moyen le 8 août pour l'arbre D14 à 14 m et l'arbre D12 à 10 m.

À chaque fois, trois rameaux feuillés ont été prélevés sur trois hêtres dans le peuplement *Hesse15ans*. Ces prélèvements ont été réalisés à partir du sol.

La mesure a été réalisée aussitôt après excision de la feuille, au moyen d'une chambre à pression de Scholander.

Les valeurs mesurées à différentes hauteurs dans le houppier sont corrigées en tenant compte du potentiel de gravité. Toutes les valeurs sont ramenées au niveau du sol en ajoutant 0.1 MPa pour 10 m.

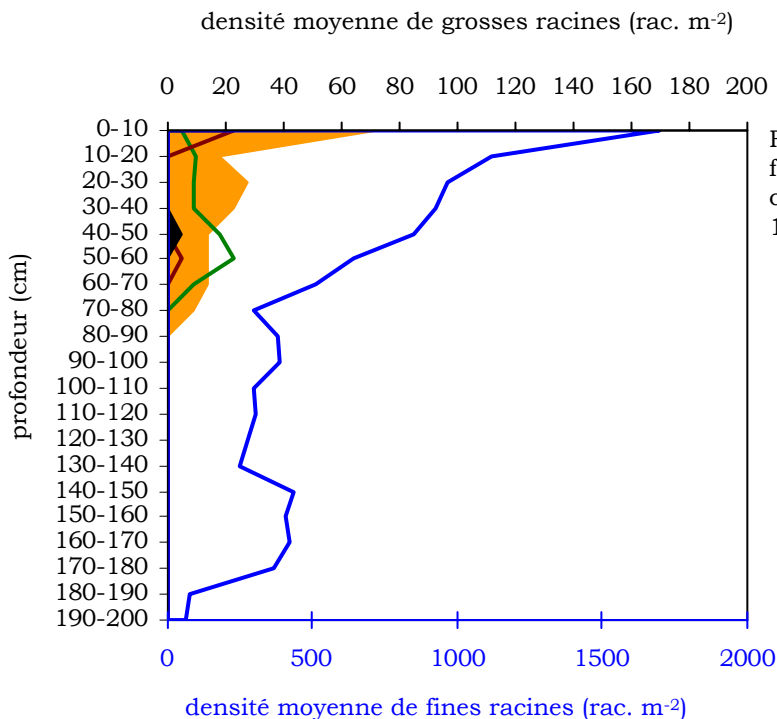


Figure 19: densité racinaire moyenne en fonction de la profondeur et selon 5 classes de diamètre en mm (<3, 3-5, 5-10, 10-20 et >20) pour *Hesse36ans*.

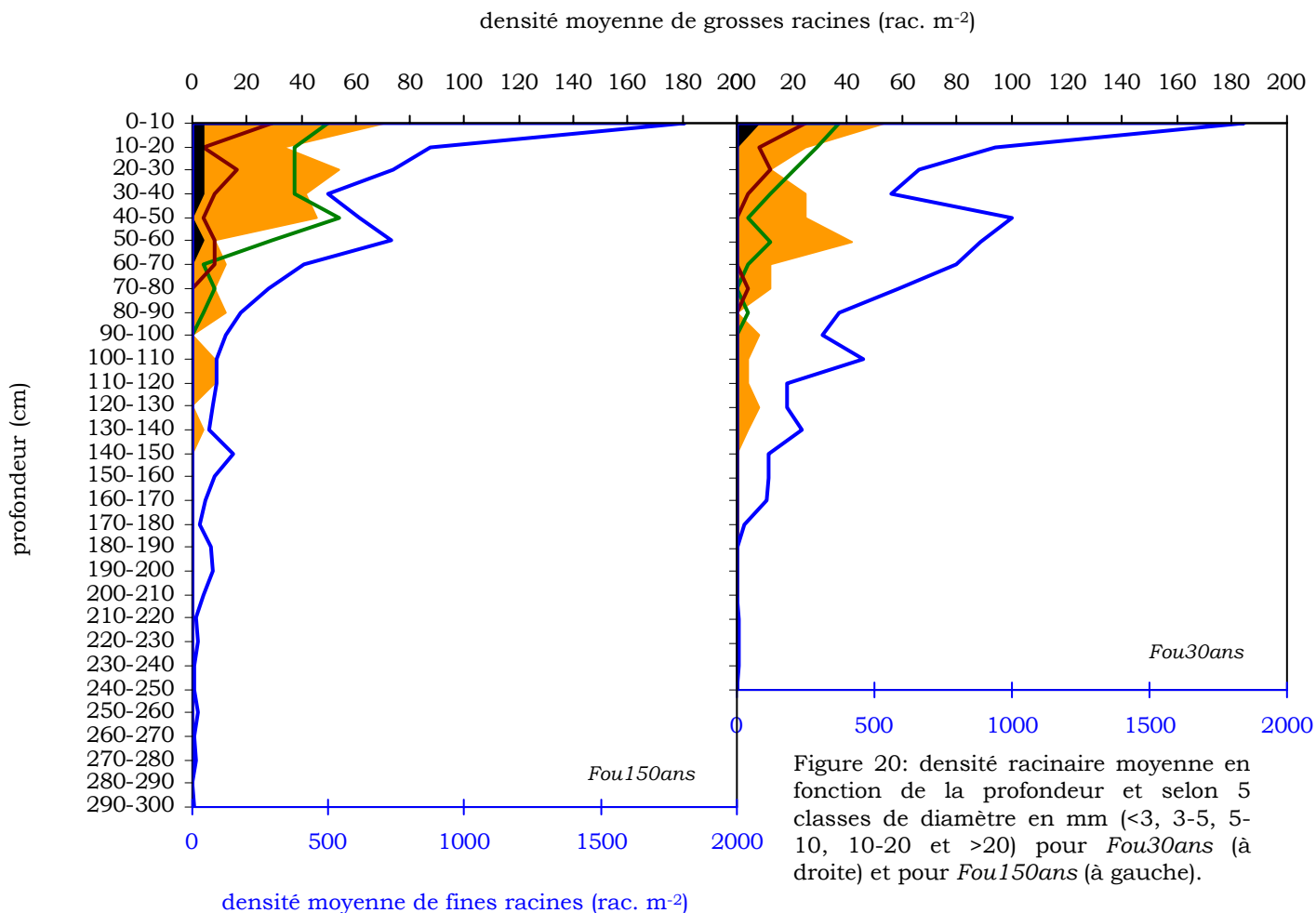


Figure 20: densité racinaire moyenne en fonction de la profondeur et selon 5 classes de diamètre en mm (<3, 3-5, 5-10, 10-20 et >20) pour *Fou30ans* (à droite) et pour *Fou150ans* (à gauche).

III – RÉSULTATS

1 - Étude d'enracinement des 3 peuplements

Avis au lecteur :

Les termes « *racines fines* » et « *grosses racines* » sont utilisés dans le sens d'une discrimination entre les classes de diamètres strictement inférieures à 3mm d'une part, et les classes 3-5, 5-10, 10-20, >20mm d'autre part.

1.1- Description de l'enracinement

La proportion relative de chaque classe de diamètre racinaire observée après l'ouverture d'une fosse à *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans* est représentée dans le **tableau 7**.

diamètre	<i>Hesse36ans</i>	<i>Fou30ans</i>	<i>Fou150ans</i>
<3 mm	97.19%	95.67%	91.27%
3-5 mm	1.76%	2.42%	3.94%
5-10 mm	0.76%	1.27%	3.35%
10-20 mm	0.25%	0.55%	1.01%
>20 mm	0.04%	0.08%	0.43%

Tableau 7 : Proportions relatives de racine en fonction de différentes classes de diamètre observées, lors de l'ouverture des fosses de *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*

Les diamètres sont inférieurs à 3 mm pour la majorité des racines. Une forte diminution relative du nombre de racine apparaît au fur et à mesure que leur diamètre augmente. Les « *grosses racines* » sont proportionnellement plus nombreuses dans le peuplement de 150 ans.

La densité moyenne des différentes classes de diamètre racinaire est représentée pour chaque site en fonction de la profondeur (**figures 19 et 20**) : les « *grosses racines* » s'étalent jusqu'à 80 cm de profondeur pour *Hesse36ans* et 140 cm pour les deux sites de Fougères. On observe également, qu'en dessous de 160 cm, les « *racines fines* » deviennent plus rares pour *Fou30ans* et *Fou150ans* (2% et 5% du nombre total de racines fines du profil), et qu'un petit ventre racinaire apparaît encore pour *Hesse36ans* (9% du nombre total de racines fines du profil).

Les racines occupent l'espace du sol sur des profondeurs variables allant jusqu'à 2 m pour *Hesse36ans*, jusqu'à 2,4 m pour *Fou30ans* et jusqu'à 3 m pour *Fou150ans*.

Nous avons dressé une cartographie des racines fines pour chaque cellule 10 x 10 cm explorée.

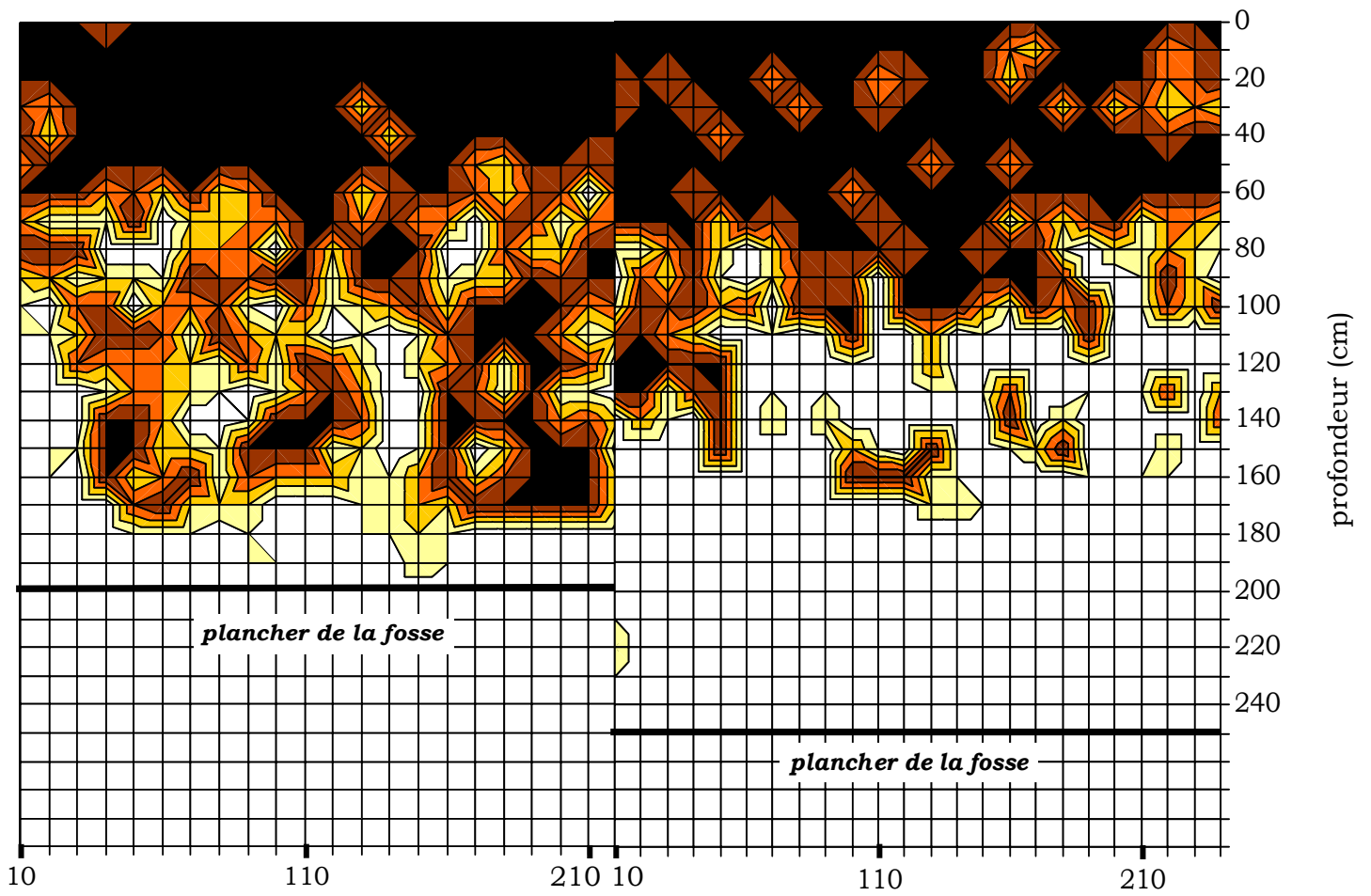
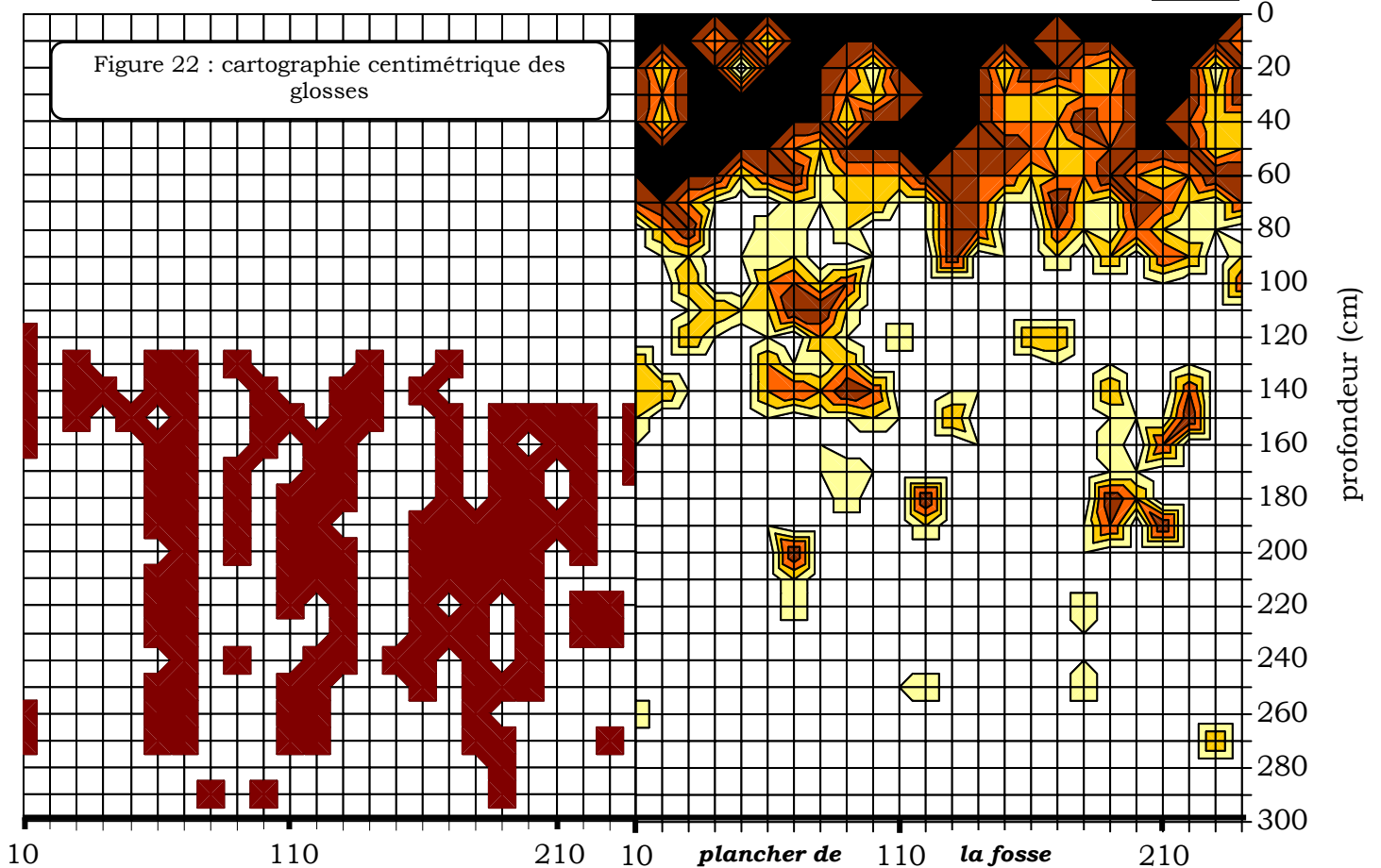
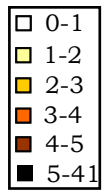


Figure 21 : cartographie centimétrique du nombre de racines fines (<3mm) selon les classes 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-41 pour *Hesse36ans* (en haut à gauche) pour *Fou30ans* (en haut à droite) pour *Fou150ans* (en bas à droite)



Une cellule peut-être affectée d'une seule couleur ou d'une gamme de couleur rendant compte du nombre de racine selon les classes 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 ou plus de 5 racines.

Les classes proposées permettent de mettre en évidence les zones avec peu de racines et sans racine en profondeur à *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans* (**figure 21**).

Lors des comptages dans les tranches de sol profondes, c'est dans des glosses, dépôts de couleur ocre, en forme de langues et décolorées dans la partie centrale, que les racines fines sont observées à Fougères. Une cartographie des glosses en dessous de 120 cm est réalisée (**figure 22**)

En comparant la cartographie des glosses réalisée sur le *Fou150ans* et la cartographie des racines fines il apparaît une concordance entre cette microstructure du sol et la colonisation racinaire. Cependant, les racines apparaissent relativement moins fréquemment que les glosses. Aussi, avons nous cherché la présence d'obstacles structuraux au niveau du sol qui pourraient limiter l'enracinement.

1.2- Caractéristiques physiques (structurales) du sol et enracinement

La diminution des racines avec la profondeur apparaît liée à l'augmentation de la densité apparente comme l'atteste une relation établie, très globalement, entre les densités apparentes déterminées au cylindre (cf. chap. bilan hydrique) et au gammamètre en fonction des densités racinaires (**figure 23**).

Pour le site *Hesse36ans*, les variations de densité racinaires et de densité apparente, en fonction de la profondeur de sol, présentent des évolutions très similaires (**figure 24**).

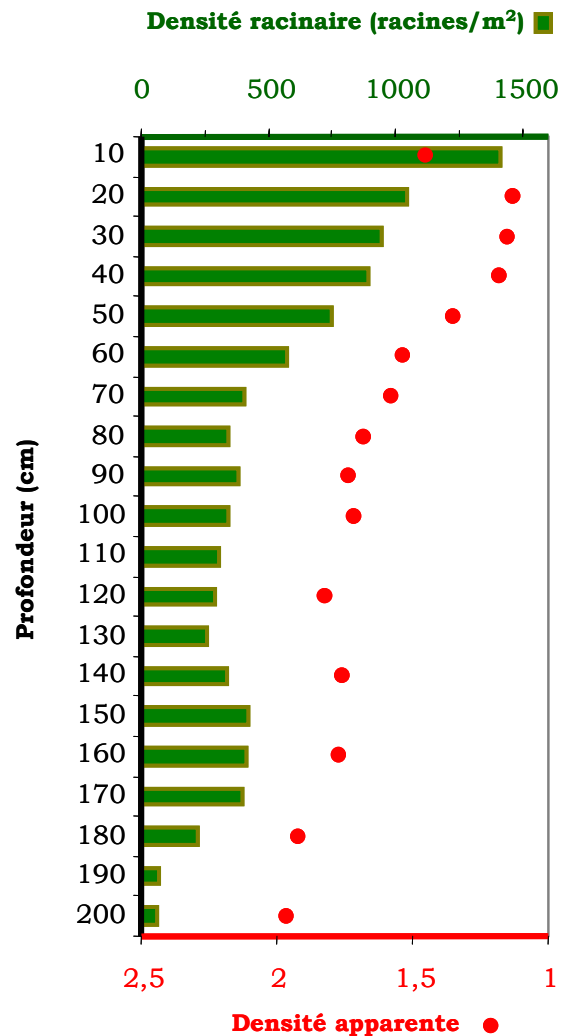
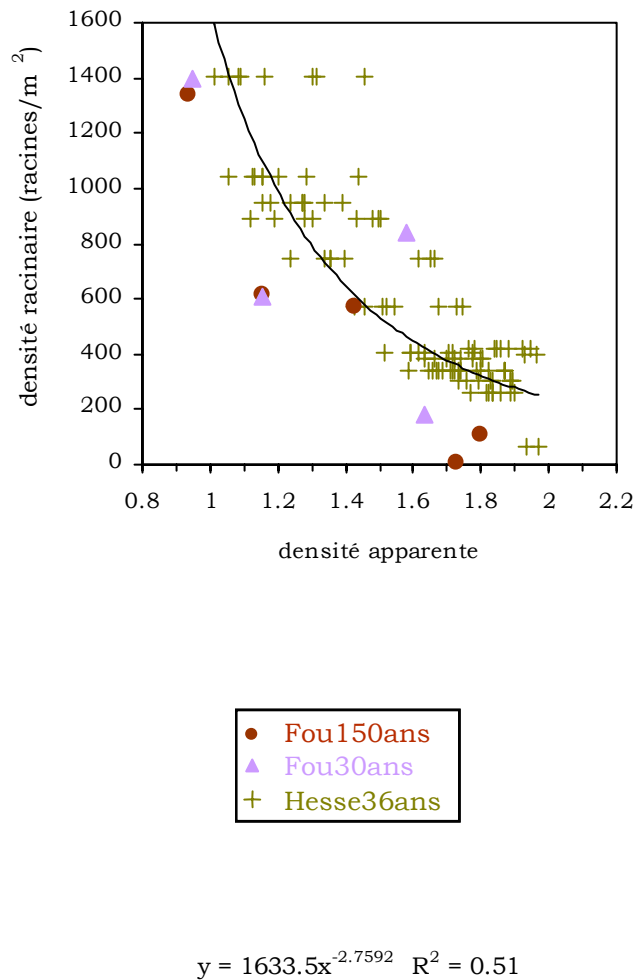


Figure 23 : Variation de la densité racinaire établie en 2003 en fonction de la densité apparente, de 8 emplacements, mesurée par gammamètre en 1996 (tubes n°60 à n°67, 1996), pour *Hesse36ans*. Et, variation de la densité racinaire établie en 2003 en fonction de la densité apparente mesurée au cylindre en 2003, pour *Fou30ans* et pour *Fou150ans*. On a indiqué la régression linéaire et le coefficient de détermination établis sur l'ensemble des données

Figure 24 : Profils de densité racinaire (2003) et de densité apparente du tube n° 64 (gammamètre) en fonction de la profondeur, sur le site *Hesse36ans*

2- Humidité dans le sol

Nous avons donc montré que l'enracinement en profondeur est sous l'effet de la densité apparente, qui est plus élevée en profondeur. Les racines et la variation du stock d'eau étant intimement liées, nous examinons les variations hydriques à différente profondeur.

2.1 – Les humidités volumiques

Pour *Hesse36ans*, la moyenne journalière des humidités volumiques est calculée à partir des mesures horaires pour chacune des profondeurs instrumentées au cours de deux années successives, 2002 et 2003 (**figure 25**). Globalement, les humidités volumiques à 10, 30 et 55 cm de profondeur évoluent d'une façon similaire et nettement différemment de celles à 80 et 120 cm.

La valeur minimum et la durée de la période sèche montrent que les conditions hydriques du sol sont plus drastiques durant l'été 2003 qu'en 2002 aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120 cm (les différences entre les minimums d'humidité volumique des 2 années, HV2002-HV2003, sont respectivement 6.2, 4.4, 4.3, 4.5, et 1.1%).

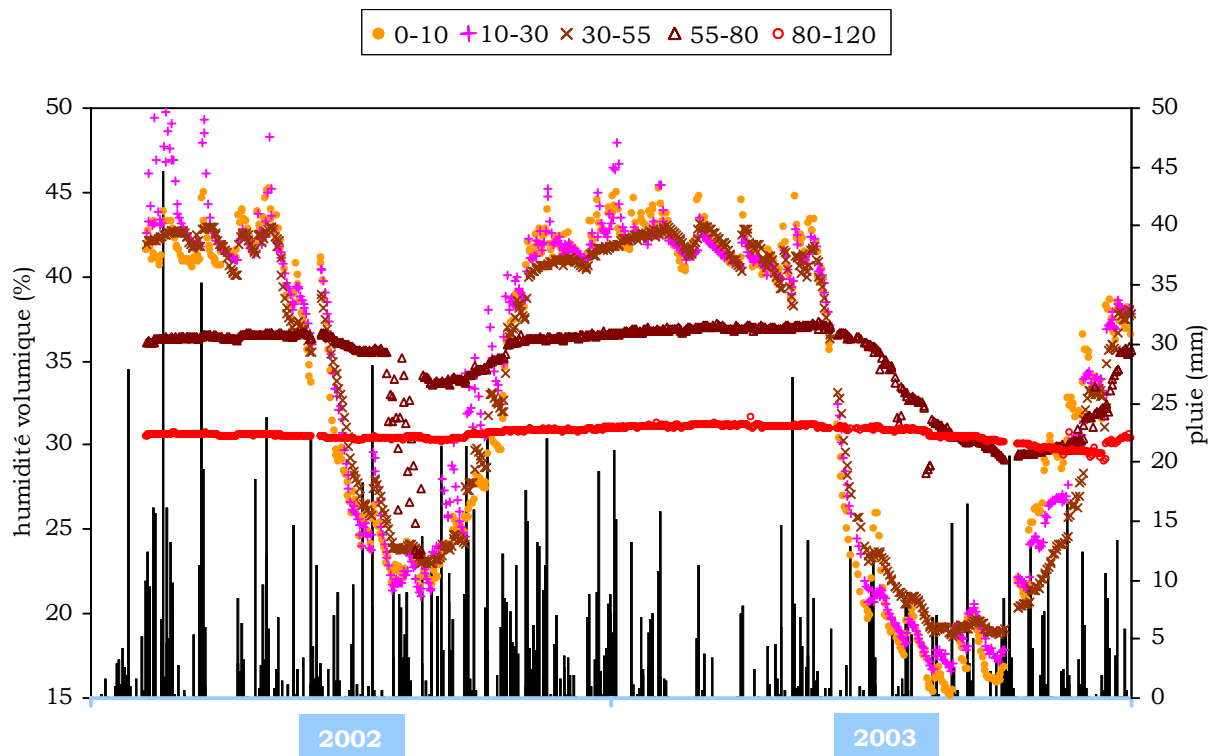


Figure 25 : Humidité volumique journalière moyenne, mesurée par des sondes TDR, au pas de temps horaire, au cours des années 2002 et 2003, à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur, dans le sol de *Hesse36ans*. Les épisodes pluvieux sont représentés par des barres verticales.

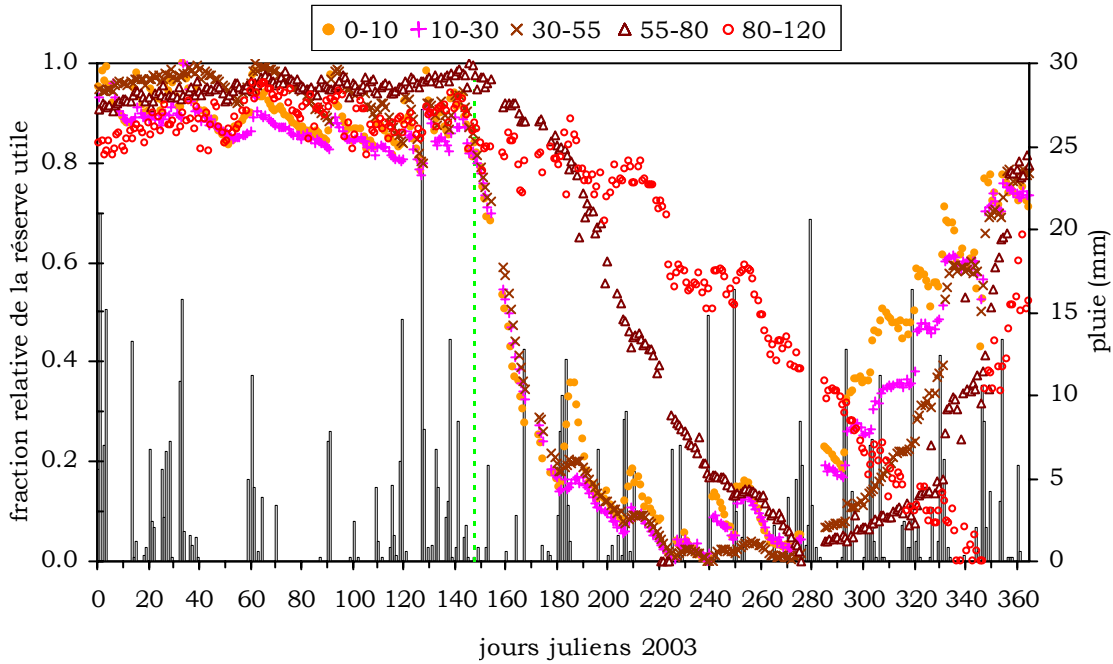


Figure 26 : Comparaison de l'évolution journalière de la fraction disponible de réserve en eau de 5 tranches de sol de *Hesse36ans* : 0-10, 10-30, 30-55, 55-80 et 80-120 cm. Les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été déterminées à partir des mesures TDR de l'année 2003. Les épisodes pluvieux sont représentés par des barres verticales. La date de la fin de mise en place foliaire est représentée par une ligne en pointillé, jour 148.

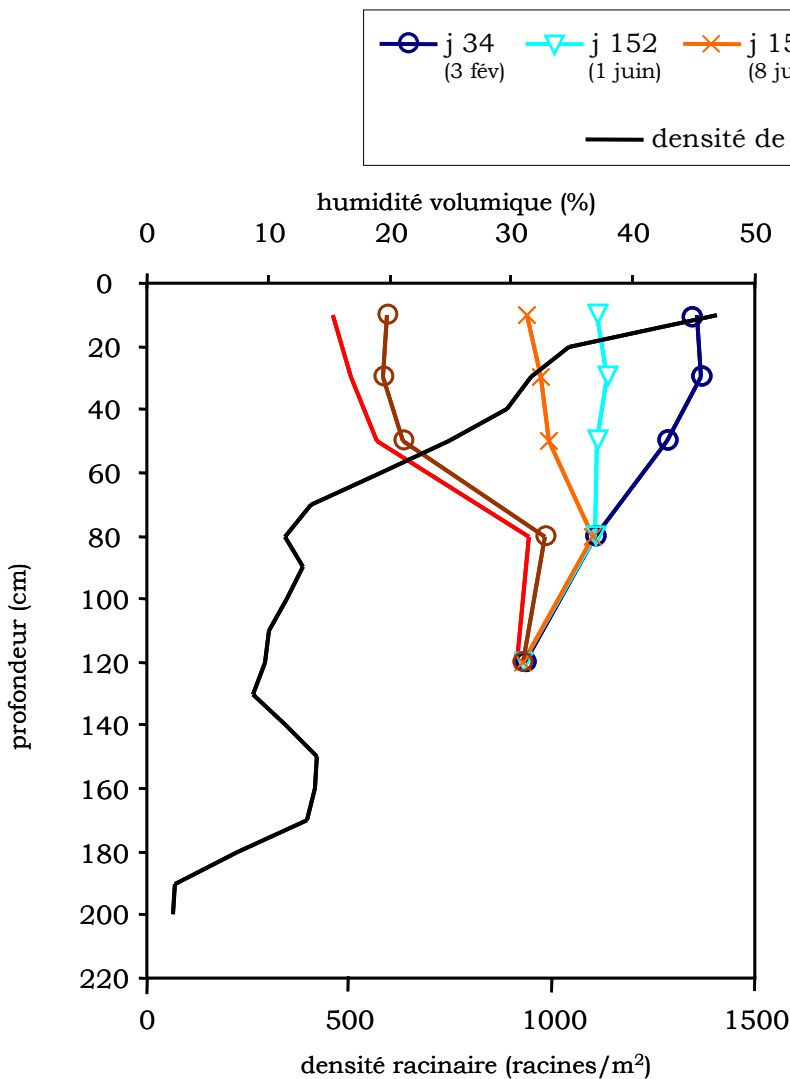


Figure 27: Comparaison du profil racinaire et de l'évolution de l'humidité volumique au cours de l'année 2003 à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur, pour *Hesse36ans*

2.2 – Les réserves en eau des sols

En utilisant l'humidité volumique de la mesure TDR, au cours de la saison 2003, les fractions relatives de la réserve utile, REW, sont calculées selon l'équation 6, journalièrement par tranche du sol ; une représentation graphique de l'évolution de la REW au cours de l'année 2003 est réalisée pour *Hesse36ans* (**figure 26**), *Fou30ans* (**figure 28**) et *Fou150ans* (**figure 29**).

Pour *Hesse36ans*, il apparaît que la diminution des réserves hydriques diminue seulement après la fin de la mise en place foliaire.

Cette diminution est réalisée plus rapidement pour les tranches situées proche de la surface (**figure 26**).

L'absorption épuise la tranche de sol 80-120 après les autres tranches (**figure 26**). D'ailleurs, une comparaison entre le profil racinaire et les mesures d'humidité volumique montre qu'une diminution de la densité de racine correspond à cette absorption (**figure 27**). Ce qui sous-tend la notion d'espace racinaire effectif.

Des prélèvements tardifs apparaissent encore entre les jours 286 à 346, ils indiquent que la reconstitution de réserve profonde, se fait après un délai de 60 jours, par rapport à celles de surface, lors de la réhydratation automnale (**figure 26**).

Pour *Fou30ans*, il ressort une diminution des réserves de la tranche 0-10 cm avant la fin de la mise en place foliaire. Au cours de la saison de végétation, les variations s'enchaînent entre les tranches de sol sans présenter des délais de retard, entre les tranches de surface et les tranches de profondeur, aussi nets que pour Hesse. (Les pannes sont responsables des données manquantes) (**figure 28**).

Pour *Fou150ans*, il apparaît une diminution des variations des réserves, pour les tranches 0-10, 10-30, 55-80, 200-250, très largement avant la fin de la mise en place foliaire (d'après les mesures d'interceptions de rayonnement réalisées sur le *Fou30ans*). Les variations des tranches 30-55, 80-120, 120-160, 160-200 ne sont calculées qu'après la fin de la mise en place foliaire, en raison de pannes du système de mesure (**figure 29**). On peut avancer l'hypothèse d'un excès d'eau hivernal en train de s'écouler, l'influence des captages d'eau alimentant la ville de Fougères et, pour une partie, un prélèvement d'eau réalisé par le houx.

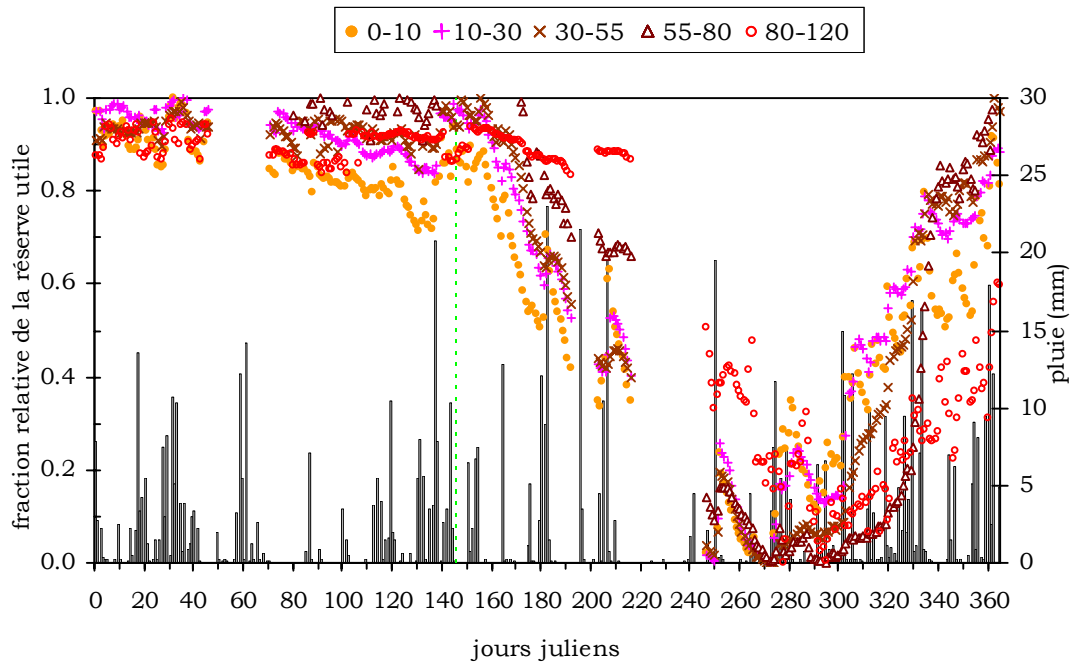


Figure 28 : Comparaison de l'évolution journalière de la fraction disponible de réserve en eau de 5 tranches de sol de *Fou30ans* : 0-10, 10-30, 30-55, 55-80 et 80-120 cm. Les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été déterminées à partir des mesures TDR de l'année 2003. Les épisodes pluvieux sont représentés par des barres verticales. La date de la fin de mise en place foliaire est représentée par une ligne en pointillé, entre les jours 146 et 147.

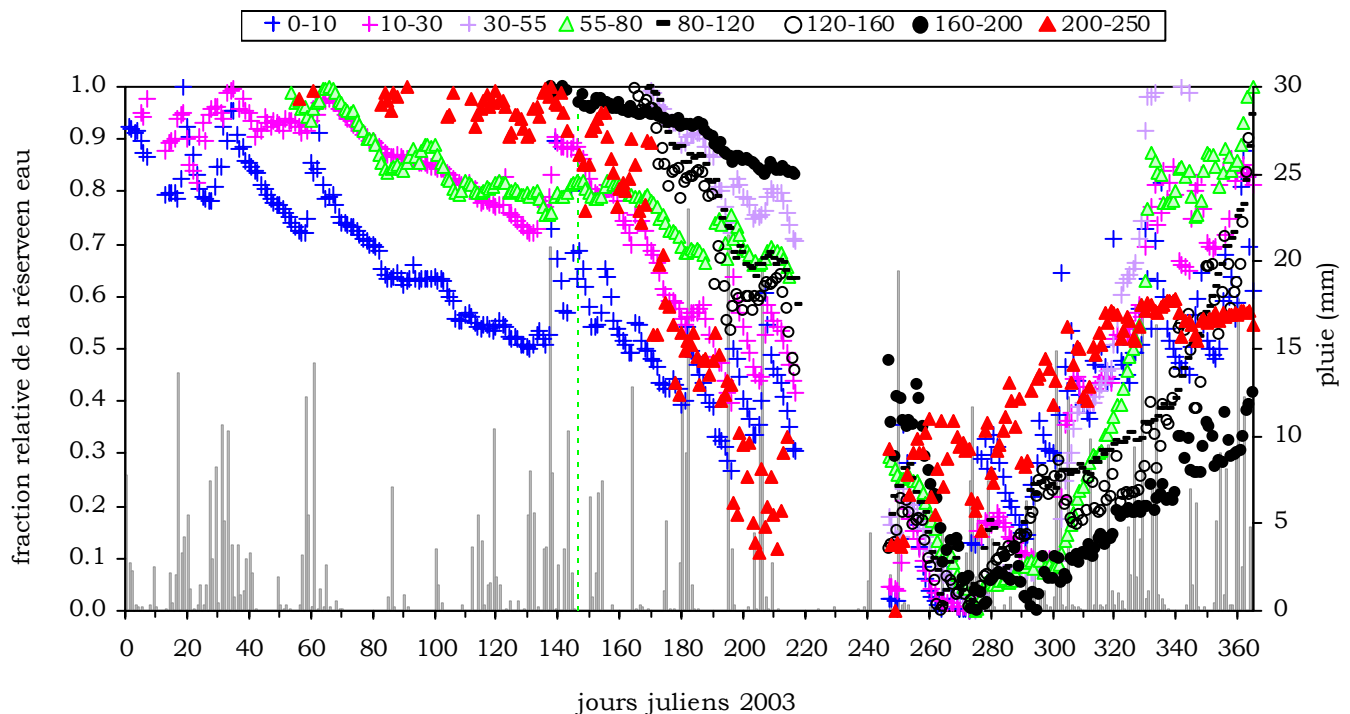


Figure 29 : Comparaison de l'évolution journalière de la fraction disponible de réserve en eau de 8 tranches de sol de *Fou150ans* : 0-10, 10-30, 30-55, 55-80, 80-120, 120-160, 160-200, 200-250 cm. Les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été déterminées à partir des mesures TDR de l'année 2003. Les épisodes pluvieux sont représentés par des barres verticales. La date de la fin de mise en place foliaire est représentée par une ligne en pointillé, entre les jours 146 et 147.

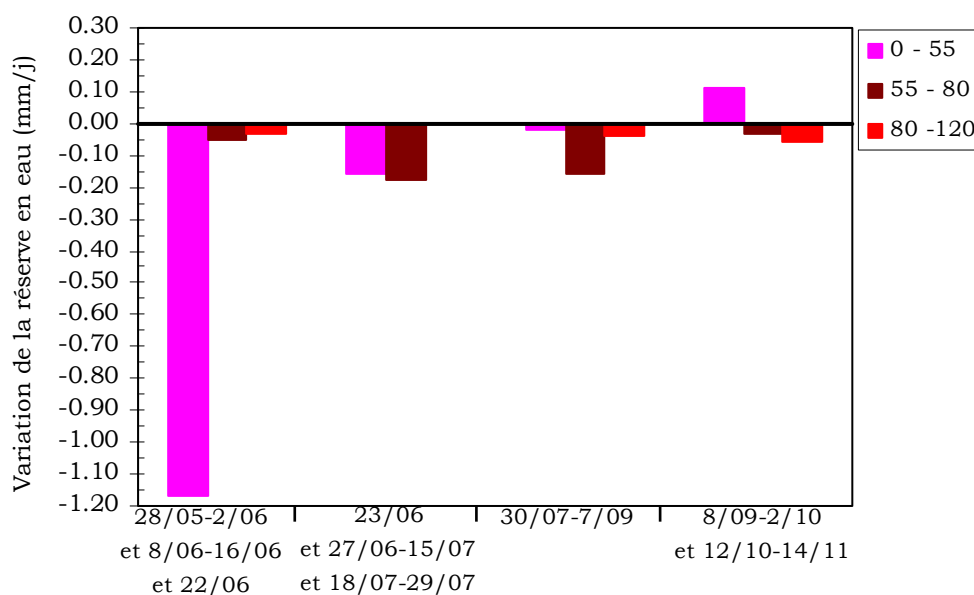


Figure 30 : Variation moyenne de la réserve journalière en eau, établie pour 4 épisodes de 2003 et en distinguant 3 tranches de sol (0-55, 55-80, 80-120 cm) pour *Hesse36ans*. Dans chacun des épisodes, les dates exclues sont des données manquantes.

Afin de quantifier les variations de réserve, mettant en évidence les principaux épisodes du prélèvement et de la réhydratation (observés figure 26) en mm/jour, nous appliquons l'équation 5. On admet que les écarts positifs représentent une période où l'alimentation en eau est prédominante et qu'à l'inverse, les écarts négatifs correspondent à une période où les prélèvements sont majoritaires. Cette quantification n'est pas dégagée des incertitudes liées aux phénomènes pluvieux et aux transferts verticaux.

À *Hesse36ans*, au cours de la première période, la réserve de la tranche 0-55 est prélevée intensément (-1.17 mm/j) soit 23 à 39 fois plus que les tranches 55-80 (-0.05 mm/j) et 80-120 (-0.03 mm/j). Pendant la deuxième période, les prélèvements ne sont réalisés que dans les tranches 0-55 et 55-80 (-0.16 et -0.18 mm/j). Au cours de la troisième période, les prélèvements s'effectuent majoritairement pour la tranche 55-80 (-0.16 mm/j) et davantage pour la tranche 80-120 que 0-55 (-0.04 et -0.02 mm/j).

Finalement, en fin de saison, la tranche 80-120 continue à être prélevée (-0.06 mm/j) ainsi que la tranche 55-80 (-0.03 mm/j) alors qu'en surface la pluie reconstitue la réserve (0.11 mm/j).

Globalement, il ressort que la consommation des réserves en eau touche les tranches plus profondes, au fur et à mesure que les tranches plus superficielles sont vidées (**figure 30**).

3 - Potentiel de base

Nous représentons l'évolution du potentiel de base moyen entre le 24 juillet et le 5 septembre 2003, pour chaque arbre de *Hesse36ans*, en distinguant les mesures réalisées sur les rameaux prélevés à 14 m et 10 m.

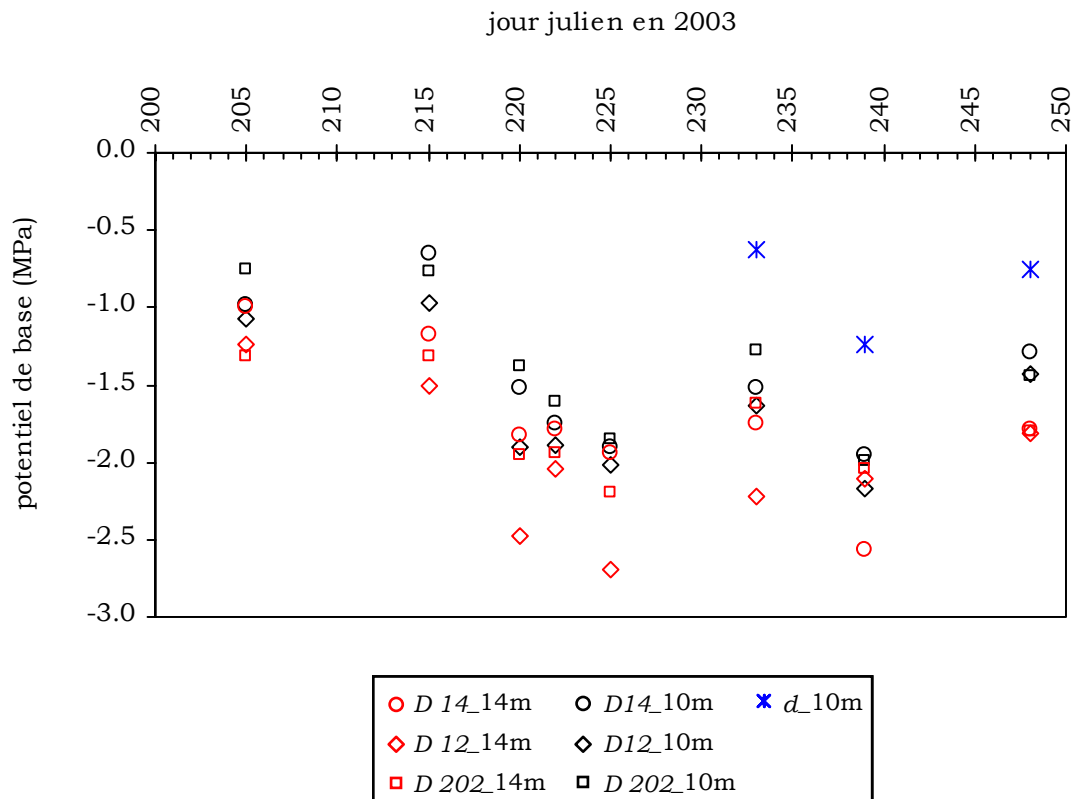


Figure 31 : Évolution saisonnière du potentiel de base moyen par arbre, établi par des mesures sur des rameaux foliaires échantillonnés à différentes hauteurs dans la couronne des hêtres de *Hesse36ans*.

Il apparaît que les potentiels de base entre les arbres *D12*, *D14* et *D202* présentent une certaine variabilité et, que les mesures réalisées pour les rameaux de la partie supérieure du houppier ont tendance à être inférieures aux mesures réalisées sur les rameaux situés dans le houppier, à 10 mètres depuis le sol. Les potentiels de base les plus faibles sont de -2.69 MPa à 14 mètres de haut, ce qui correspond à un pF de 4.43 et, de -2.17 MPa à 10 mètres de haut, ce qui correspond à un pF de 4.34 (**figure 31**).

Au cours des trois dernières campagnes de terrain, le potentiel de base de l'individu dominé, *d*, a été mesuré et atteint au plus bas -1.24 MPa. Ce potentiel de base correspond à un pF de 4.09 et apparaît le jour 239 (27 août), date à laquelle nous avons déjà repéré la valeur minimale de -2.17 MPa pour les rameaux prélevés à 10 mètres sur arbres dominés.

Afin d'appréhender les disponibilités en eau, reflétées par le potentiel de base, des sites de *Hesse15ans* et *Hesse36ans*, nous établissons un potentiel moyen pour chaque site et date du suivi. L'arbre dominé, *d*, a été exclu de cette analyse. Les potentiels de base moyens entre les deux sites progressent avec cohérence en réponse aux périodes sèches et pluvieuses (**figure 32**). (les mesures du potentiel de base du jour 229 ont été réalisées sur les feuilles prélevées au niveau du sol encore sèches et bien avant le gros de l'averse).

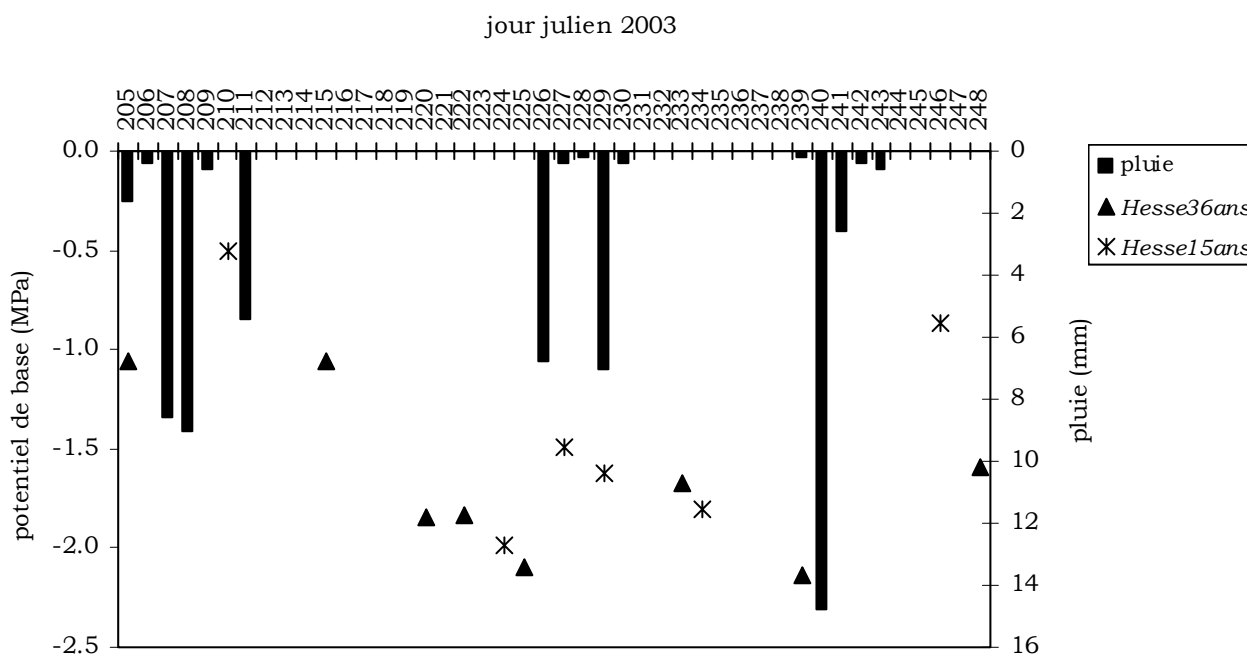


Figure 32 : Évolution du potentiel de base moyen de *Hesse15ans* et *Hesse36ans* en fonction du temps. On a indiqué les précipitations journalières.

Aucune différence de disponibilité en eau ne se dégage pour ces hêtraies d'âge différent.

Une approche indépendante consiste à établir une relation générale entre le potentiel de base et la réserve en eau du sol.

En utilisant, les potentiels de base moyens de *Hesse15ans* et, les potentiels de base moyens de *Hesse36ans* des rameaux prélevés à 10 m du sol, en ajoutant des mesures, d'une période sans

déficit hydrique, réalisées sur *Hesse36ans* en 1996 (Granier A., *comm.pers.*) et les valeurs journalières de REW, par exemple, simulées par biljou.

L'équation : $\psi_{b_{ajustés}} = -2.5 + (2.6 + 18.67 \times REW - ((2.6 + 18.67 \times REW)^2 - 2.8 \times 2.6 \times 18.67 \times REW)^{0.5}) / 1.4$ est établie.

La régression linéaire, entre les ψ_b ajustés et les potentiels de base mesurés, passe par zéro avec un coefficient de corrélation de 0.71. Cette régression démontre que la relation « $\psi_{b_{ajustés}}$ » modélise assez robustement les potentiels de base.

Les potentiels $\psi_{b_{ajustés}}$, les potentiels de base moyens de *Hesse15ans* et *Hesse36ans* en 2003 et, les potentiels de base de *Hesse36ans* en 1996 sont représentés en fonction de la REW établie par le modèle biljou (**figure 33**).

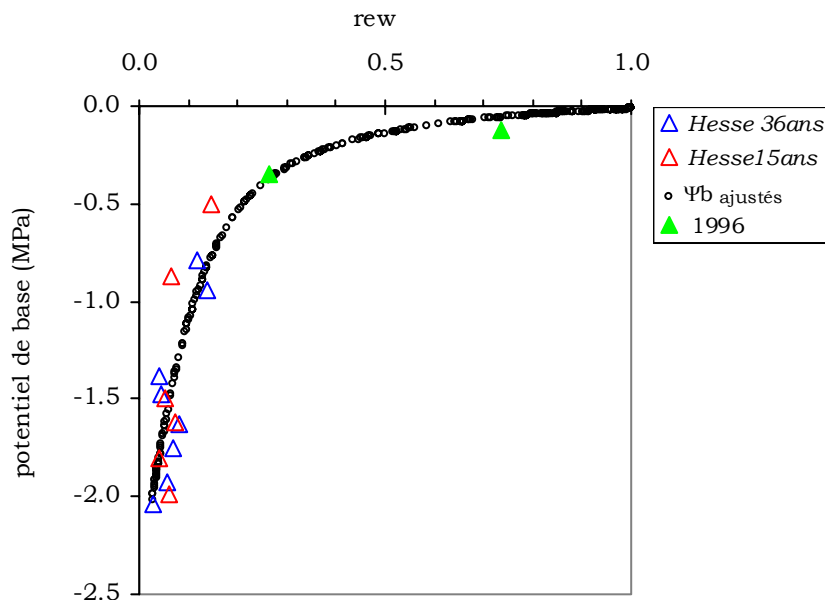


Figure 33 : Évolution des potentiels de base 1) mesurés en 2003 pour les hêtres de *Hesse36ans* et *Hesse15ans*, 2) établis par l'ajustement mathématique ψ_b , 3) mesurés en 1996 pour les hêtres de *Hesse36ans* en fonction de la réserve utile relative du sol.

L'évolution du potentiel de base permet de représenter les différents niveaux de contrainte hydrique auxquels les arbres ont été soumis pendant la saison de végétation. Des travaux réalisés sur le chêne avaient déjà permis de montrer que le potentiel de base reflète le niveau de contrainte hydrique du sol (Bréda *et al.*, 1995).

Signalons que la transformation potentiels de base en pF montre que les hêtres prélèvent en-dessous du seuil théorique fixé par les agronomes (pF=4.2), comme d'autres essences (Bréda *et al.*, 2002a, Carlier *et al.*, 1992). Mais que finalement, ces conditions climatiques sévères touchent plus modérément le hêtre de statut social dominé, nommé *d*.



*Deuxième
partie*



*Établissement des flux minéraux
et (carbonés)*

Introduction

Le cycle biogéochimique des éléments nutritifs est décrit par des modèles simples à compartiment et à flux. Ces modèles permettent d'évaluer la variation d'un compartiment pour un élément donné, en écrivant que, pour un pas de temps donné, cette variation est égale à la somme algébrique des flux entrant et sortant de ce compartiment. Après une quantification de ces flux, par mesures ou calculs, il est possible d'établir le bilan des éléments nutritifs disponibles pour un compartiment particulier ou pour l'écosystème entier, durant un temps déterminé. À l'échelle de la placette forestière, ce bilan rend compte d'un équilibre (Ranger et Bonneau, 1984) dont les flux géochimiques essentiels (Ranger J. et Turpault M.P., 1999) sont représentés par :

$$\begin{array}{r}
 \Delta S \\
 \text{STOCK} \\
 \text{BIODISPONIBLE}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \text{ENTRÉES} \\
 \bullet \text{ apports atmosphériques totaux} \\
 + \\
 \bullet \text{ flux d'altération}
 \end{array}
 -
 \begin{array}{c}
 \text{SORTIES} \\
 \bullet \text{ exportations par les récoltes} \\
 + \\
 \bullet \text{ pertes par drainage}
 \end{array}$$

Granier et *al.*, (1995) ont décrit les mécanismes fonctionnels qui interagissent dans biljou. Ce programme utilise un fichier de paramètres (**fichier 1**). Ces paramètres concernent essentiellement les caractéristiques des deux interfaces : couvert et sol/racines Ce paramétrage est non seulement spécifique à chacun des sites d'étude mais évolue d'une année à l'autre, notamment lorsque les paramètres concernant le couvert foliaire varient (LAI, phénologie). Dans le modèle le couvert est constitué de deux strates (peuplements et sous-étage). Les sol est découpé en n tranches qui correspondent soit aux horizons pédologiques, soit à un découpage arbitraire selon les besoins (n=1 à 12). Ce modèle tient compte des variations de densité apparente avec l'humidité du sol (cas des sols argileux).

Dans les sorties journalières du modèle biljou (**fichier 2**) les différents flux hydriques disponibles sont :

- la pluie incidente (Pi) qui est un rappel des données météorologiques du fichier météo introduit dans les calculs du modèle (**fichier 3**)
- la pluie au sol (Psol) qui découle de l'interception (In) (Aussenac, 1975)

- la pluie ruisselant le long des troncs (P_{tr}) qui est calculée à l'aide d'une relation obtenue sur des hêtres âgés ; P_{sol} et P_{tr} sont donc obtenues par deux procédures indépendantes de calcul.
- l'ETP Penman, ou Penman-Monteith,
- l'ETR (évapotranspiration réelle), $ETR = Tr + ET_{se}$,
- la transpiration des arbres (Tr) et du sous-étage (ET_{se}),
- les drainages des différentes tranches du sol (ici, Dr_1 à Dr_7),
- la réserve en eau du sol ($Reserv$) qui correspond à la somme des lames d'eau des différentes tranches de sol ($lame_1$ à $lame_7$)

Dans cette seconde partie, nous déterminons les apports atmosphériques et les pertes par drainage à différentes profondeurs, à l'échelle de la parcelle forestière, pour 2002 et 2003.

Un premier chapitre est consacré aux flux hydriques. Une récapitulation synthétique des entrées et du paramétrage du modèle de bilan hydrique est faite. Les paramètres, qui vont permettre de simuler les variations de la macroporosité du sol, sont des résultats d'expérimentations de laboratoire, qui sont présentés de façon détaillée. On a également présenté des comparaisons, entre des flux de simulation et des flux mesurés, qui justifient les hauteurs d'eau qui seront en définitive couplés avec la chimie.

Un deuxième chapitre présente les données de concentrations minérales et carbonées « brutes » des eaux. Elles concernent la qualité des pluies incidentes, des pluies modifiées par le passage au travers de la canopée et la chimie des solutions de sol. Certains arrangements sont inévitables pour parvenir à notre objectif de couplage ; ils apparaissent dans ce chapitre.

Enfin, le couplage eau-minéraux permet de calculer certains des flux géochimiques sur les trois sites étudiés qui sont *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les résultats sont rapprochés des profils racinaires de la partie I.

Chapitre I - Le bilan hydrique

I – MATÉRIEL ET MÉTHODES

1 – Les flux d'eau

Les mesures de pluviométrie décrites dans la première partie (chap. le couvert forestier) sont utilisées en vue d'un rapprochement avec les sorties de simulation. Comme les sorties du modèle sont réalisées à un pas de temps qui correspond à une journée complète (24 h00), nous avons additionné les relevés de terrain successifs dans les cas où plusieurs pluies journalières étaient mêlées dans un même relevé (averse nocturne ou journée avec pluie intermittente).

Le nombre de mesures disponibles est de 20 données pour les gouttières de *Hesse36ans*, 23 données pour les gouttières de *Fou30ans*, 25 données pour les pluviomètres pour *Hesse36ans*, 25 estimations de hauteurs d'eau écoulées le long des troncs de *Hesse36ans* et 23 pour *Fou30ans*.

2 – Les densités apparentes du sol

En conditions contrôlées, une dessiccation expérimentale est suivie par des sondes TDR « P2G » fabriquées par IMKO et par une méthode gravimétrique.

La sphère d'influence de l'onde électromagnétique est inférieure aux volumes échantillonnés de 7 litres (d'après IMKO).

Neuf échantillons représentatifs des différents horizons des sites *Fou30ans* et *Fou150ans* ont été prélevés en ouvrant une fosse sur les deux sites. Deux prélèvements de sol en un seul bloc sont réalisés : simultanément 7000 cm³ et 98 cm³. Les profondeurs échantillonnées sont 10, 30, 67.5 et 120 cm pour *Fou30ans* et 10, 30, 67.5, 140 et 240 cm pour *Fou150ans*.

• Les échantillons des cylindres de 98 cm³ (avec 5 répétitions) ont servi à établir les teneurs en eau pour différentes valeurs de potentiel matriciel. Le Laboratoire de Science du Sol de l'INRA de Rennes a procédé à la détermination des faibles potentiels hydriques ($pF < 3$), en posant les échantillons sur un lit de kaolin dont le potentiel est réglé hydrauliquement (tables à succion), et à la détermination des potentiels élevés ($pF \geq 3$) en appliquant une pression pneumatique au moyen des marmites de Richards. Les teneurs en eau pondérales déterminées sont W_0 à $pF=0$,

$W_{1.0}$ à $pF=1.0$, $W_{1.5}$ à $pF=1.5$, $W_{2.0}$ à $pF=2$, $W_{2.5}$ à $pF=2.5$, $W_{3.0}$ à $pF=3.0$ et $W_{4.2}$ à $pF=4.2$ (**annexe A5**). La densité apparente a également été déterminée.

- Le suivi de la dessiccation expérimentale est réalisé au laboratoire de Phytoécologie de l'Inra de Nancy. Ce suivi est réalisé après avoir placé artificiellement les blocs de sol de 7 litres à la capacité au champ (W_{cc}). Pour ce faire, les blocs ont été placés verticalement dans des containers remplis d'eau pour que la réhumectation s'établisse, sur le principe des vases communicant. Cette phase est stoppée lorsque l'eau apparaît au sommet du cylindre et un temps de ressuyage est observé, jusqu'à ce que l'eau ne s'écoule plus de l'échantillon.

Les humidités pondérales des échantillons de sol réhumectés de 7000 cm^3 sont comparées avec celles des sols de 98 cm^3 , à différents potentiels matriciels. Les humidités pondérales les plus proches correspondent à des potentiels allant de $W_{2.5}$ à W_0 et sont en conformité avec des valeurs de sols saturés (Bruand et al., 1996).

Nous supposons que la réhumectation permet un suivi des humidités depuis la capacité au champ.

Nous avons réalisé un suivi des teneurs en eau, par TDR et par méthode gravimétrique. Nous avons donc estimé la teneur en eau du sol, au moyen d'approches indépendantes et en l'occurrence, par rapport à un volume de sol et un poids de sol. L'application de la relation [7] permet de suivre les variations de densité apparente des sols de Fougères.

$$Da = HV \div HP \quad \textcircled{7}$$

Da : densité apparente

HV et HP : humidités volumique et pondérale.

Souvenirs de campagnes de mesures



Ouverture d'une fosse pédologique



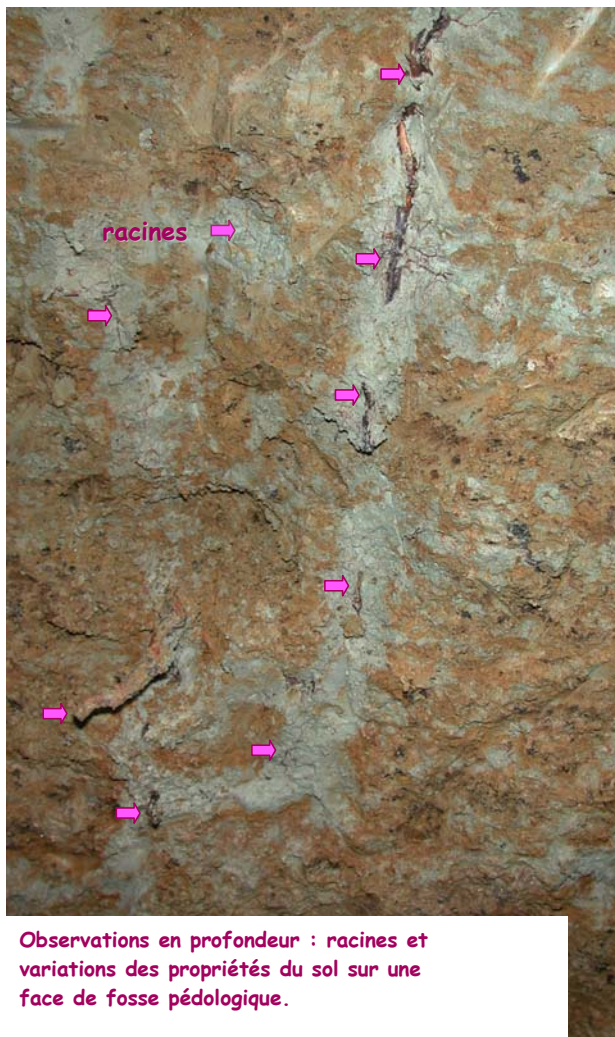
Observations en surface : l'enracinement apparaît au travers d'une grille de comptage racinaire.



Prélèvement *in-situ* d'un échantillon de sol non remanié de 7 litres.



Les mesures TDR sont réalisées par des sondes P2G *in-situ* pour Fou30ans et Fou150ans.

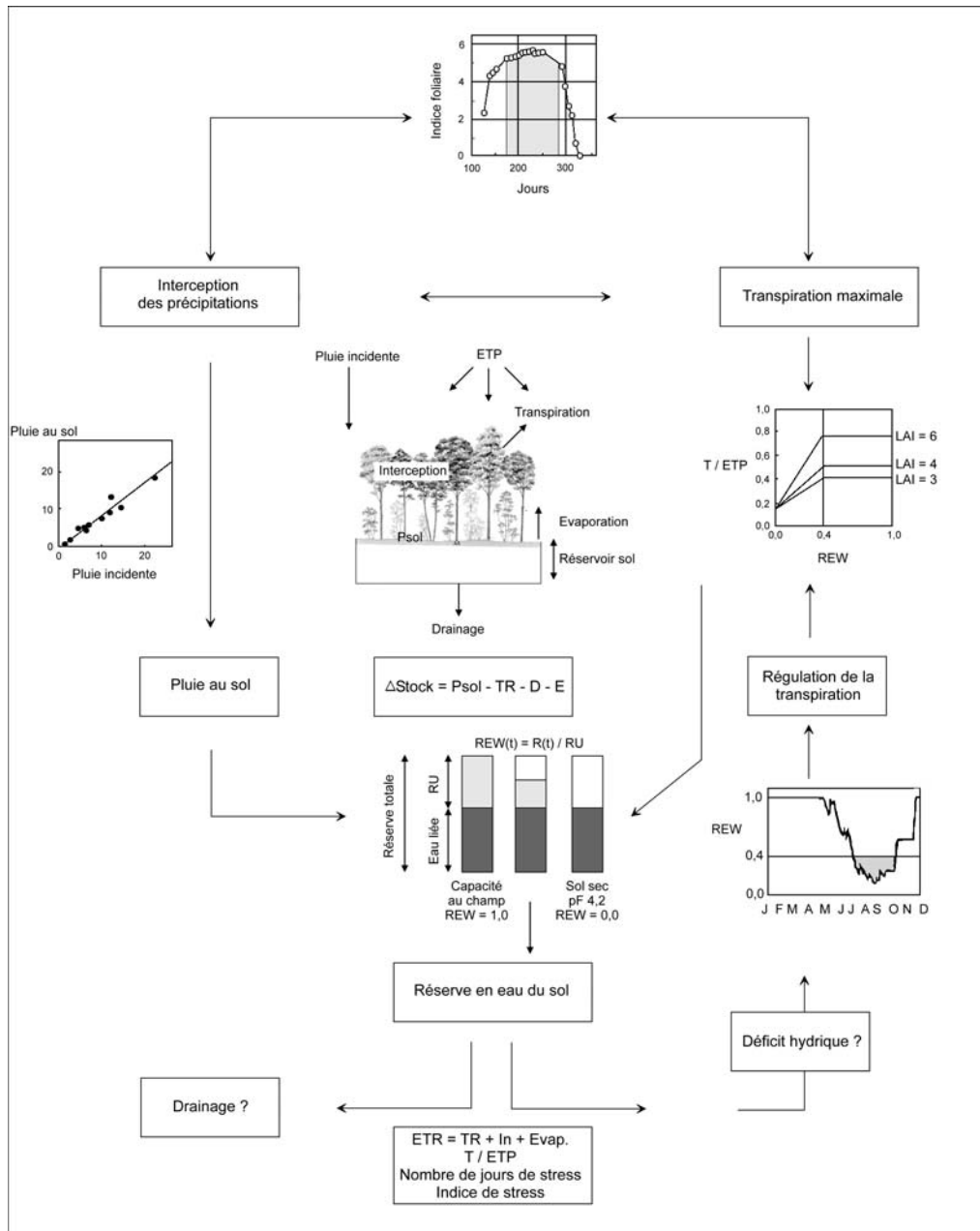


Observations en profondeur : racines et variations des propriétés du sol sur une face de fosse pédologique.



Mesure simultanée des humidités pondérale et volumique.

Schéma général du modèle de bilan hydrique journalier. D'après Granier *et al.*, 1995.



II – LE MODÈLE DE BILAN HYDRIQUE

Un schéma général du modèle est donné page précédente.

1- Les entrées du modèle

Les données journalières entrées dans le modèle sont la pluviométrie et les variables élémentaires pour les calculs de l'ETP : température de l'air, vent, rayonnement global et déficit de saturation de l'air (à Hesse) ou hygrométrie dans l'air (à Fougères). Ces données sont acquises au-dessus de la placette d'étude à Hesse par un poste météo Inra ou bien, hormis le rayonnement global, dans une clairière en forêt de Fougères par un poste météorologique Renécofor. Le rayonnement global est acquis à la station Météo-France de Louvigné-du-désert (16 Km de Fougères).

2 - Les paramètres concernant le sol

Le modèle de bilan hydrique a été paramétré avec nos données expérimentales.

Les données acquises en forêt (cf. partie I), permettant de paramétrer le modèle, sont récapitulées dans ce chapitre. Nous présentons dans le détail les données expérimentales acquises, spécialement au laboratoire, pour paramétrer le modèle. L'ensemble des paramètres du modèle, ont été réunis dans un seul tableau (**tableau 8**).

❖ *Nombre de compartiments*

Dans notre travail, les sols sont représentés par une série de tranches ou réservoirs qui correspondent aux horizons pédologiques observés *in-situ*. Pour les trois sites d'études, le découpage du sol a conduit à distinguer 7 tranches :

-les planchers des 6 premières tranches sont situés à -10cm, -30cm, -55cm, -80cm, -120cm et -160cm de profondeur.

-la profondeur d'enracinement maximale est introduite dans la dernière tranche ; en conséquence, le plancher de cette tranche est à -2 m à *Hesse36ans*, à -2.4m à *Fou30ans* et à -3m à *Fou150ans* .

Pour tous les sites, le plancher de chaque compartiment jusqu'à -120 cm correspond donc au niveau de sol instrumenté en lysimètre avec tension ou sans tension, selon le site.

❖ Répartition des racines dans le sol

Par tranche de sol du modèle, une densité moyenne de racines fines est calculée pour les trois sites d'étude à partir des comptages présentés dans la partie I.

❖ Densité apparente

Deux méthodes sont utilisées pour déterminer la densité apparente.

- D'une part, la méthode des cylindres.

Le Laboratoire de Science du Sol de l'INRA de Rennes (Y. Bénard) a déterminé la densité apparente, D_{app} , des sols de Fougères (**tableau 9**).

Les mesures tirées du travail de Quentin *et al.* (2001) sont utilisées pour les sols de Hesse.

- D'autre part, nous avons suivi les variations de densité apparente en fonction de l'humidité des sols, pour les sols de Fougères. Un double suivi, par TDR et par méthode gravimétrique est utilisé. Exprimé selon la relation [7], nous exprimons cette densité apparente en fonction de l'humidité pondérale. L'ajustement linéaire [8] permet d'établir ah et bh (**figures 34 et 35**) qui sont utilisés comme paramètres du modèle.

$$da = (ah \times \text{humidité pondérale}) + bh$$

⑧

Profondeur (cm)	Fou30ans		Fou150ans	
	D_app	c.v. (%)	D_app	c.v. (%)
-10	0.95	14.1	0.93	8.6
-30	1.15	2.1	1.15	3.8
-67.5	1.58	4.6	1.42	5.6
-120	1.63	1.6		
-140			1.80	3.1
-240			1.73	1.3

Tableau 9 : Densité apparente moyenne et coefficient de variation (%) en fonction de la profondeur et du site échantillonné en juin 2003.

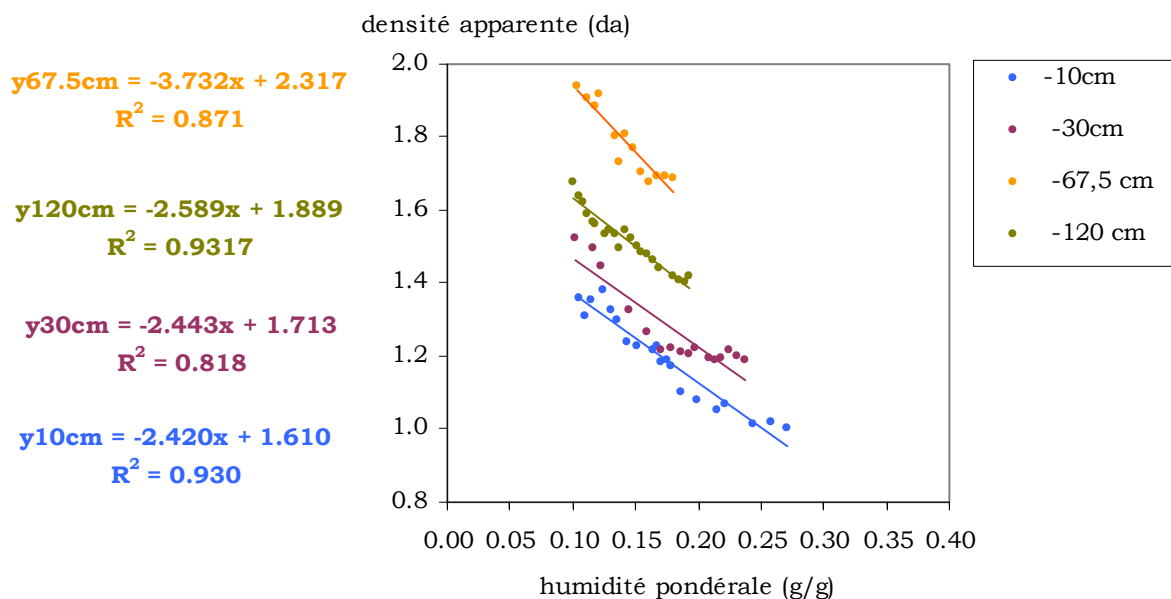


Figure 34 : Densité apparente en fonction de l’humidité pondérale à différentes profondeurs pour les sols du Fou30ans : détermination expérimentale des paramètres ah et bh , pour Fou30ans.

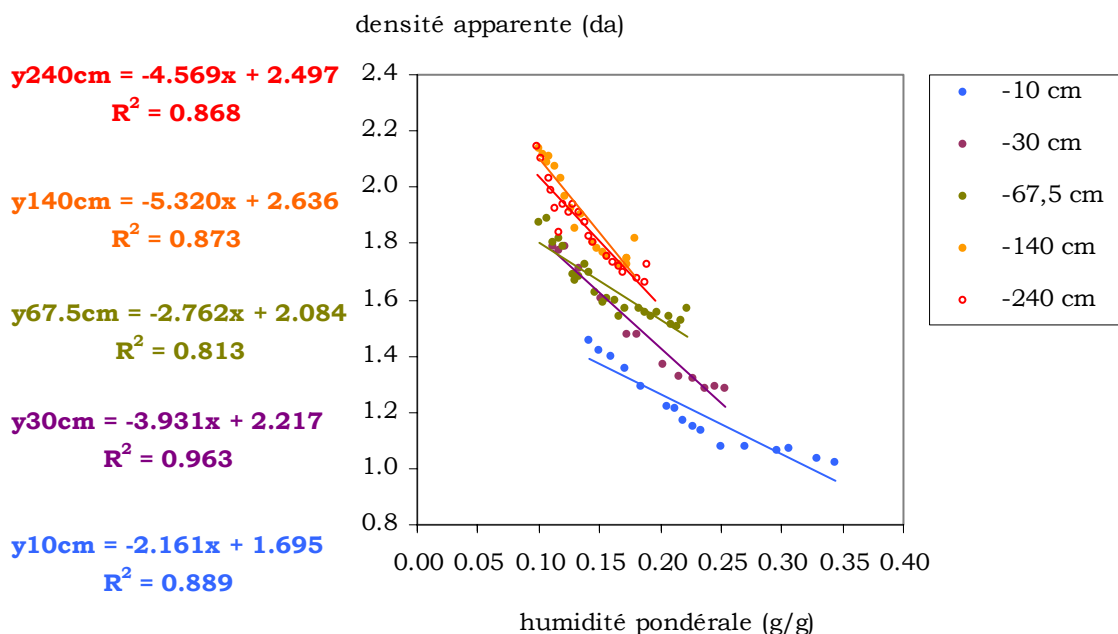


Figure 35 : Densité apparente en fonction de l’humidité pondérale à différentes profondeurs pour les sols du Fou150ans : détermination expérimentale des paramètres ah et bh , pour Fou150ans.

Les paramètres *ah* et *bh* de *Hesse36ans* figurent dans le **tableau 8** (Bréda, com. pers.).

En s'appuyant sur le travail réalisé par Villette (1994), les porosités sont exprimées en indice des vides selon les formules [9]

$$\text{indice des vides} = \frac{\text{volume des vides}}{\text{Volume de solide}} \times 100 = \frac{D_{re} - \text{densité apparente}}{\text{densité apparente}} \times 100 \quad (9)$$

avec : D_{re} : densité réelle

Alors, la relation [9] est exprimée en fonction des deux types de densités expérimentales pour permettre de caractériser une porosité de retrait (Villette, 1994) que nous appelons macroporosité.

Une porosité totale est formulée par l'expression [10] et une porosité de motte humide, poromothum, est formulée selon l'expression [11]

$$\text{porototale} = \frac{D_{re} - D_{app}}{D_{app}} \times 100 \quad (10)$$

$$\text{poromothum} = \frac{D_{re} - da}{da} \times 100 \quad (11)$$

Pour chaque horizon, le calcul de la macroporosité [12] utilise les équations [10] et [11] :

$$p_{macro} = (\text{porototale} - \text{poromothum}) / \text{porototale} \quad (12)$$

Dans biljou : - le drainage est proportionnel à la macroporosité et au flux entrant

- ce qui ne draine pas va dans la microporosité

❖ **Humidité au point de flétrissement (*hp_flet*)**

Les humidités pondérales au point de flétrissement (g d'eau/g de sol) ont été obtenues au moyen d'une cellule de Richards. Ces humidités sont déterminées par le Laboratoire de Science

du Sol de l'INRA de Rennes (Y. Bénard), pour les sols de Fougères et par Quentin *et al.* (2001), pour les sols de Hesse.

❖ Réserve utile et profondeur d'enracinement

Pour chaque tranche de sol, la réserve utile est déterminée *in-situ* en appliquant la méthode des paliers.

La détermination de la capacité au champ, par cette méthode, est décrite dans *Le guide des analyses en pédologie* (Baize, 2000) : « Il suffit de mesurer l'humidité d'un horizon pendant les périodes de pluies et de ressuyage (hiver et printemps), si possible à des intervalles de temps courts (quelques jours). Il peut s'agir d'humidités pondérales sur prélèvements de surface ou sur carottage à la tarière ou bien de mesures d'humidités volumiques neutroniques. Une fois ces mesures positionnées sur un diagramme humidité/ temps, on peut en général distinguer 3 types de valeurs :

- des valeurs correspondant à un excès d'eau ;
- des valeurs correspondant notoirement à un début de dessèchement (rares en ces saisons) ;
- des valeurs intermédiaires, très voisines les unes des autres, se reproduisant régulièrement en période de ressuyage, formant parfois des paliers sur plusieurs jours ou plusieurs semaines en l'absence de précipitations importantes. Ces valeurs permettent ainsi de déterminer l'humidité correspondant à la capacité au champ (HCC). »

Nous avons mis en application cette méthode en utilisant les mesures d'humidités réalisées par sonde à neutron et TDR :

- dans un premier temps, lors des saisons hivernales et printanières pour déterminer une humidité correspondant à la capacité au champ (HCC) ;
- dans un second temps, lors des périodes estivales et automnales (en 2003) pour déterminer l'humidité au maximum du dessèchement (HMD).

La variation maximale d'humidité multipliée par l'épaisseur de la tranche détermine la réserve utile d'une tranche, selon la formule [13] :

$$RU_{\text{de chaque tranche}} = (HCC - HMD) \times e \quad (13)$$

avec : *RU* : réserve utile (mm)

HCC et *HMD* : humidités volumiques, respectivement à la capacité au champ et au maximum de dessèchement (en %)

e : épaisseur de l'horizon (dm)

Les enracinements observés déterminent l'épaisseur de sol sur laquelle on calcule une RU : jusqu'à 2 m pour *Hesse36ans*, jusqu'à 2,4 m pour *Fou30ans* et jusqu'à 3 m pour *Fou150ans*. Toutefois, le mode d'occupation des racines en profondeur délimite des zones avec racines et sans racine ; ceci est notamment le cas des glosses qui limitent latéralement l'expansion du système racinaire.

La réserve utile pour chaque tranche de l'équation [13] n'est disponible qu'en partie pour l'alimentation hydrique des arbres. En effet, lors du comptage de terrain, à travers la grille de maille décimétrique (cf. partie I comptage racinaire), certaines mailles étaient vides. La réserve utile est recalculée en tenant compte de la proportion de maille avec au moins 1 racine : l'équation [14] a été appliquée dès la 5^{ème} tranche (horizon où l'hétérogénéité de la colonisation racinaire apparaît) pour déterminer la réserve utile.

$$RU_i = (HCC_i - HMD_i) \times e_i \times MR_i \quad (14)$$

avec : RU : réserve utile (mm)

HCC et HMD : humidités volumiques, respectivement à la capacité au champ et au maximum de dessèchement (en %)

e : épaisseur de l'horizon (dm)

MR : pourcentage de mailles avec racines (%)

3 - Paramètres concernant le peuplement

- ❖ Afin de simuler la phénologie, les dates de débourrement et de chute des feuilles déterminées dans la première partie (chap. le couvert forestier) paramètrent le modèle.
- ❖ Les indices de surface foliaire (LAI) paramètrent la fonction de transpiration du peuplement, ils proviennent des campagnes de terrain présentées dans la partie I.

paramètres	année 2002	année 2003
site	Hesse36ans	Hesse36ans
• nom du fichier météo journalier	d:\data\newmod\meteo\t2003.hes	d:\data\newmod\meteo\t2003.hes
• jours de débourrement et de chute des feuilles	113 296	113 314
• coeff Transpi_max /ETP à LAI saturant	0.75	0.75
• LAI, coefficient extinction lumière et WAI hiver	7.7 0.4 1.6	7.7 0.4 1.6
• seuil de pluie où interception=100%	1	1
• nombre de tranches de sol	7	7
• paramètres sol, par tranche	prof RU racines hp_ D_ D_ (cm) (mm) (%) flet app re ah bh	RU racines hp_ D_ D_ (mm) (%) flet app re ah bh
tranche1	10 29 0.16 0.12 1.18 2.4 -0.916 1.1312	29 0.16 0.12 1.2 2.4 -0.916 1.131
tranche2	30 50 0.19 0.12 1.23 2.4 -0.916 1.1312	50 0.19 0.12 1.2 2.4 -0.916 1.131
tranche3	55 52.5 0.19 0.12 1.44 2.5 -3.825 2.0039	52.5 0.19 0.12 1.4 2.5 -3.825 2.004
tranche4	80 32.5 0.10 0.12 1.65 2.5 -3.825 2.0039	32.5 0.10 0.12 1.7 2.5 -3.825 2.004
tranche5	120 8.95 0.13 0.12 1.77 2.5 -4.347 2.4967	8.95 0.13 0.12 1.8 2.5 -4.347 2.497
tranche6	160 3.05 0.12 0.11 1.85 2.5 -4.347 2.4967	3.05 0.12 0.11 1.8 2.5 -4.347 2.497
tranche7	200 1.7 0.11 0.11 1.95 2.5 -4.347 2.4967	1.7 0.11 0.11 2 2.5 -4.347 2.497
site	Fou30ans	Fou30ans
• nom du fichier météo journalier	d:\data\newmod\meteo\t2003.fou	d:\data\newmod\meteo\t2003.fou
• jours de débourrement et de chute des feuilles	113 296	113 314
• coeff Transpi_max /ETP à LAI saturant	0.75	0.75
• LAI coefficient extinction lumière et WAI hiver	8.15 0.4 1.6	3.73 0.4 1.6
• seuil de pluie où interception=100%	1	1
• nombre de tranches de sol	7	7
• paramètres sol, par tranche	prof RU racines hp_ D_ D_ (cm) (mm) (%) flet app re ah bh	RU racines hp_ D_ D_ (mm) (%) flet app re ah bh
tranche1	10 26 0.20 0.22 0.95 2.4 -2.420 1.610	26 0.20 0.22 1 2.4 -2.420 1.610
tranche2	30 46.4 0.17 0.19 1.15 2.4 -2.443 1.713	46.4 0.17 0.19 1.2 2.4 -2.443 1.713
tranche3	55 55.3 0.21 0.13 1.58 2.5 -3.732 2.317	55.3 0.21 0.13 1.6 2.5 -3.732 2.317
tranche4	80 33.3 0.19 0.13 1.58 2.5 -3.732 2.317	33.3 0.19 0.13 1.6 2.5 -3.732 2.317
tranche5	120 7.5 0.14 0.15 1.63 2.5 -2.589 1.889	7.5 0.14 0.15 1.6 2.5 -2.589 1.889
tranche6	160 4.2 0.07 0.15 1.63 2.5 -2.589 1.889	4.2 0.07 0.15 1.6 2.5 -2.589 1.889
tranche7	240 1.6 0.02 0.15 1.63 2.5 -2.589 1.889	1.6 0.02 0.15 1.6 2.5 -2.589 1.889
site	Fou150ans	Fou150ans
• nom du fichier météo journalier	d:\data\newmod\meteo\t2003.fou	d:\data\newmod\meteo\t2003.fou
• jours de débourrement et de chute des feuilles	113 296	113 314
• coeff Transpi_max /ETP à LAI saturant	0.75	0.75
• LAI, coefficient extinction lumière et WAI hiver	4.67 0.4 1.6	4.51 0.4 1.6
• seuil de pluie où interception=100%	1	1
• nombre de tranches de sol	7	7
• paramètres sol, par tranche	prof RU racines hp_ D_ D_ (cm) (mm) (%) flet app re ah bh	RU racines hp_ D_ D_ (mm) (%) flet app re ah bh
tranche1	10 22.7 0.25 0.29 0.93 2.4 -2.161 1.695	22.7 0.25 0.29 0.9 2.4 -2.161 1.695
tranche2	30 55 0.23 0.16 1.15 2.4 -3.931 2.217	55 0.23 0.16 1.2 2.4 -3.931 2.217
tranche3	55 35.3 0.21 0.15 1.42 2.5 -2.762 2.084	35.3 0.21 0.15 1.4 2.5 -2.762 2.084
tranche4	80 20.5 0.15 0.15 1.42 2.5 -2.762 2.084	20.5 0.15 0.15 1.4 2.5 -2.762 2.084
tranche5	120 5.4 0.07 0.12 1.8 2.5 -5.320 2.636	5.4 0.07 0.12 1.8 2.5 -5.320 2.636
tranche6	160 4.7 0.05 0.12 1.8 2.5 -5.320 2.636	4.7 0.05 0.12 1.8 2.5 -5.320 2.636
tranche7	300 9.1 0.05 0.14 1.73 2.5 -4.569 2.497	9.1 0.05 0.14 1.7 2.5 -4.569 2.497

Tableau 8 : Paramètres et données des simulations de BILJOU53 pour Hesse36ans, Fou30ans et Fou150ans. Les variables climatiques sont le rayonnement global, le déficit de saturation de l'air, la pluie, la température moyenne et le vent. RU = réserve utile, hp_flet = humidité pondérale au pF4.2, D_app = densité apparente, D_re = densité réelle du matériau, ah, bh = coefficients de la régression.

III – Les flux hydriques simulés et mesurés

1- Le peuplement arboré

✦ La pluie au sol est obtenue à partir des calculs du modèle biljou.

L'écart entre les simulations journalières et les mesures de pluie au sol est calculé comme la différence (pluie simulée – mesurée). La moyenne par classes d'intensité, est représentée en fonction de la pluie mesurée au sol (**figure 36**). Les mesures de terrain ont été relevées manuellement entre mai et novembre 2002, à Hesse. Nous avons additionné les relevés de terrain successifs dans les cas où plusieurs pluies journalières étaient mêlées dans un même relevé (averse nocturne ou journée avec pluie intermittente).

Pour *Hesse36ans*, on constate que l'écart entre les simulations et les mesures tend à augmenter avec les classes de hauteur d'eau. Pour *Fou30ans*, une diminution est décelée pour la classe 10-19 mm et l'écart devient positif pour la classe >19 mm. À ce sujet, mentionnons (données non montrées) la forte différence des précipitations journalières entre les sites d'étude. En effet, des pluies journalières de 30 mm voire 47 mm se sont abattues à Fougères alors qu'à Hesse le maximum, pendant ces campagnes de mesures, est de 24 mm/j. Les systèmes de mesure en place ne sont pas conçus pour de telles averses et peuvent déborder.

On peut aussi supposer que les fortes averses correspondent, pendant cette période, à des précipitations orageuses, qui présentent une forte variabilité spatiale, ce qui peut se traduire par une différence entre la pluie mesurée au poste météo et la quantité qui tombe réellement sur le site.

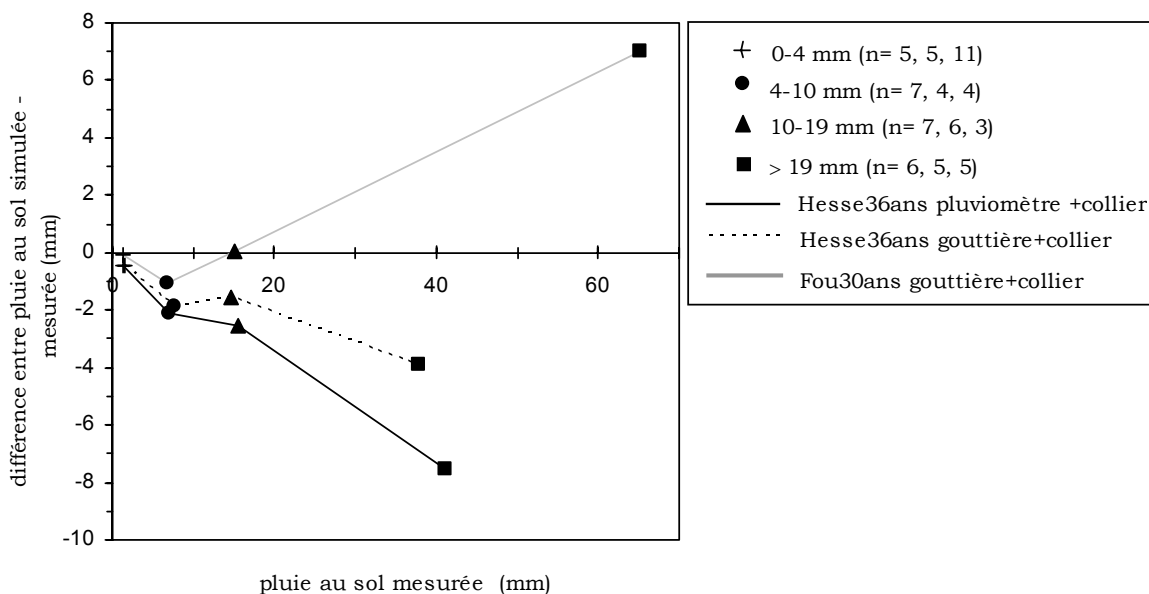


Figure 36 : Moyenne des écarts de l'eau au sol simulée et mesurée en fonction des classes 0-4, 4-10, 10-19, >19mm de pluie mesurée au sol, représentées par une valeur moyenne, pour *Fou30ans* et *Hesse36ans*, séparément pour les estimations pluviomètres et gouttières. Le nombre de données, n, ordonné de la gauche vers la droite correspond à l'effectif des classes de pluie au sol de *Hesse36ans*-pluviomètre, *Hesse36ans*-gouttière et *Fou30ans*.

Afin de chiffrer le biais du modèle, nous avons représenté la différence (pluie simulée – mesurée), par classes d'intensité, mais cette fois en fonction de la pluie incidente et seulement pour le site de Hesse (**figure 37**).

On retrouve un écart négatif qui augmente avec l'intensité des précipitations. Afin de chiffrer l'écart sur les précipitations tombées entre le jour 113 et le jour 296 de l'année 2002, nous avons établi une régression linéaire, appliquée sur les précipitations journalières. Les écarts cumulés représentent 51.1 mm pour des précipitations cumulées de 558.2 mm. Ainsi, au cours de la saison de végétation 2002, le modèle sous-estime la pluie au sol de 9.2%.

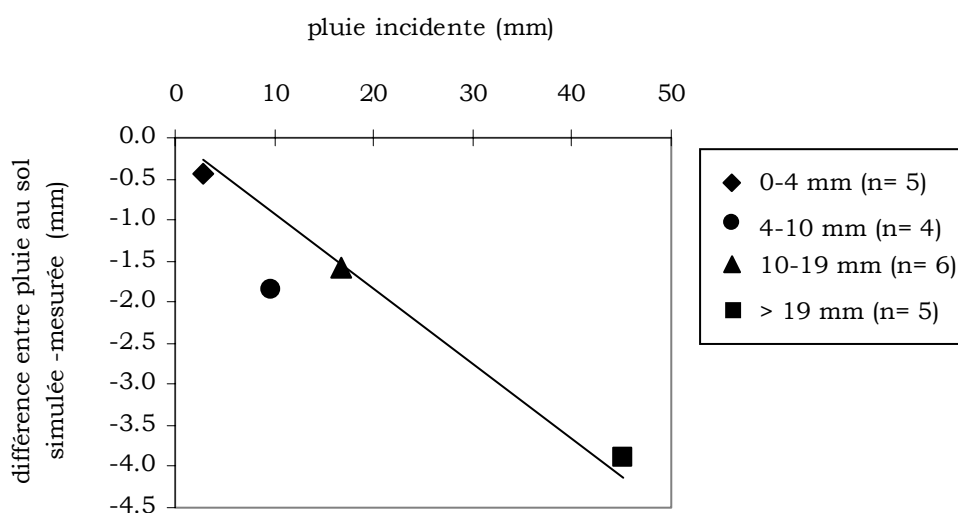


Figure 37 : Écart moyen entre simulations et mesures de pluie au sol en fonction de la pluie incidente. On a établi les moyennes par classes de pluie mesurée en distinguant les intensités 0-4mm, 4-10mm, 10-20mm et >19mm. Les mesures sont réalisées par collier et gouttière sur *Hesse36ans* ; n indique le nombre de données par classe.

➔ L'écoulement le long des troncs

Une comparaison des simulations et des mesures est réalisée.

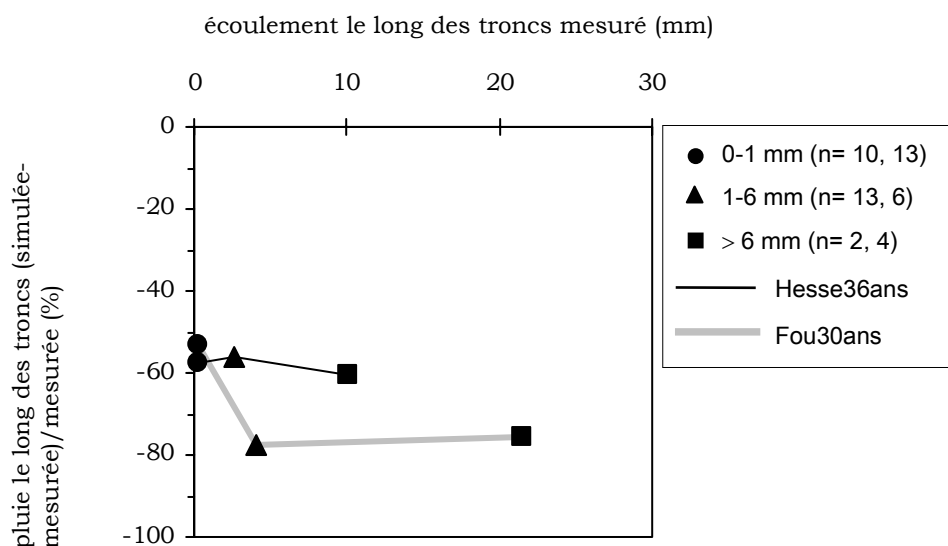


Figure 38 : Écart relatif moyen entre simulations et mesures d'écoulement le long des troncs en fonction de la classe de pluie écoulee le long des troncs de *Hesse36ans* et de *Fou30ans*. Les classes distinguent les intensités 0-1 mm, 1-6 mm et >6 mm ; n, le nombre de données par classe, est précisé pour *Hesse36ans* et puis pour *Fou30ans*.

L'écart entre les simulations journalières et les mesures d'écoulement le long des troncs est évalué : la différence (simulation – mesure) établie, en moyenne pour des classes d'intensité, est représentée en fonction de la pluie mesurée le long des troncs.

Il apparaît que le biais des hauteurs d'eau simulées pour l'écoulement le long des troncs est très important (**figure 38**). Le modèle utilise une relation moyenne qui ne peut pas s'appliquer au cas des jeunes hêtraies.

Nous rappelons que des résultats différents pour les deux sites ont été montrés pour des mesures d'écoulements le long des troncs établies par des captures d'épisodes pluvieux souvent journaliers. En moyenne, 23% des précipitations incidentes arrivent au sol par les troncs sur *Fou30ans* et 11% pour *Hesse36ans* (**figure 14**, chapitre le couvert foliaire). Pour la même essence, Koch A. et Matzner E. (1993) estiment que 14-20% des précipitations atteignent le sol via les troncs. Précisons que ces chiffres varient énormément dans la littérature selon l'essence étudiée. Laclau J.P. (2001) estime que ce flux représente 1% de P_i pour l'eucalyptus.

Ainsi, lors du couplage avec les teneurs minérales et carbonées, nous utiliserons les mesures relevées par un opérateur, chaque mois, par lecture des compteurs à auget.

Ces mesures d'écoulement le long des troncs cumulées, par exemple pour l'année 2003, s'élèvent à 26 mm pour *Fou150ans*, 91 mm pour *Hesse36ans* et 121 mm pour *Fou30ans*. Il apparaît donc, une très forte différence entre le site d'arbres âgés et les sites d'arbres trentenaires.

Les données manquantes sont reconstituées à l'aide de régressions linéaires établies entre les précipitations incidentes du modèle cumulées mensuellement (P_i) et les mesures de l'écoulement de tronc dont nous disposons (**figure 39**).

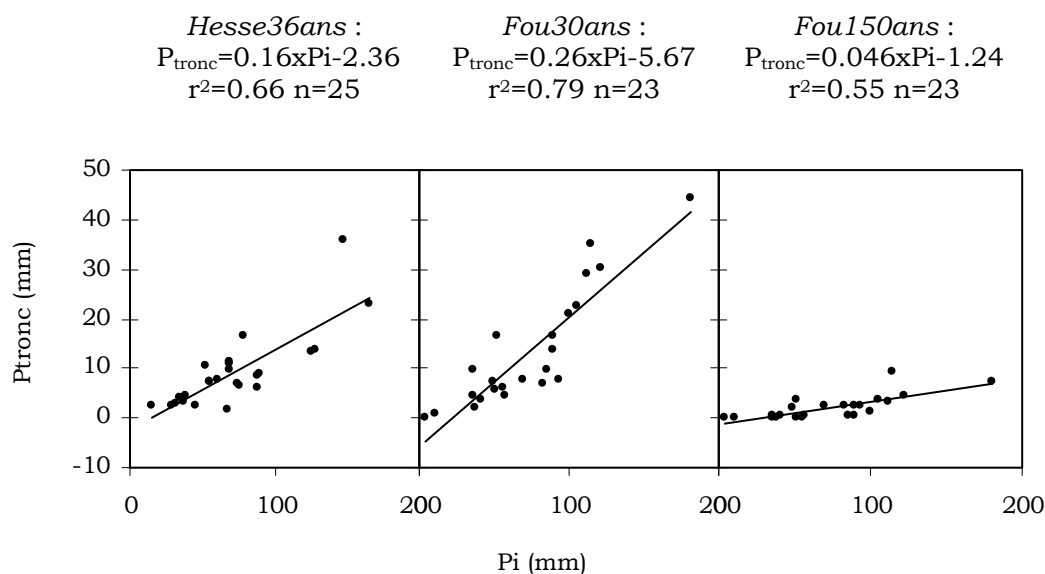


Figure 39 : relations linéaires $P_{\text{tronc}} = a \times P_i$ établies pour estimer les valeurs des données manquantes d'écoulements le long des troncs pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*.

Afin de comparer l'écoulement le long des troncs avec la pluie incidente ou la pluie au sol, nous représentons l'évolution mensuelle des hauteurs d'eau d'écoulements le long des troncs, de pluie incidente et de pluie au sol pour les trois sites d'étude. Généralement, les trois hauteurs d'eau varient de façon synchrone pour chacun des sites bien qu'on observe un décrochage des courbes en avril 2002 et en janvier 2003 pour *Fou30ans* (**figure 41**) et *Fou150ans* (**figure 42**). Aucun décrochage n'apparaît pour *Hesse36ans* (**figure 40**).

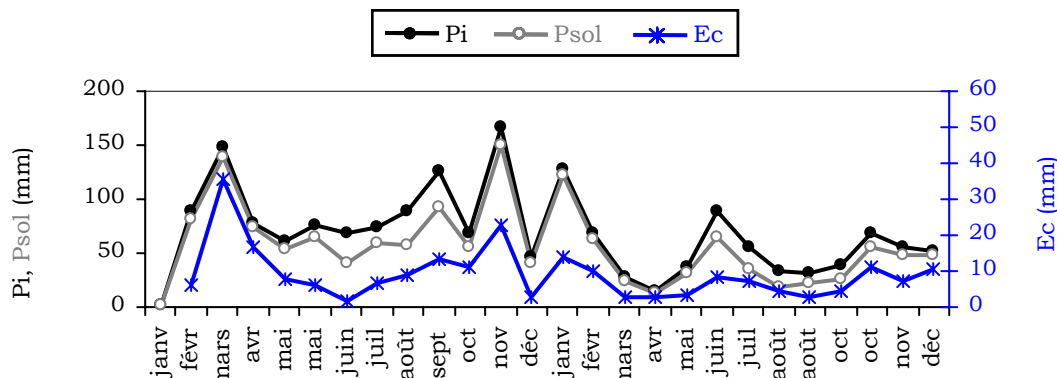


Figure 40 : Variations de la pluie incidente (Pi), de la pluie au sol simulée (Psol) après cumul mensuel et de la hauteur d'eau relevée chaque mois par les écoulements le long des troncs (Ec) en 2002 et 2003 pour *Hesse36ans*.

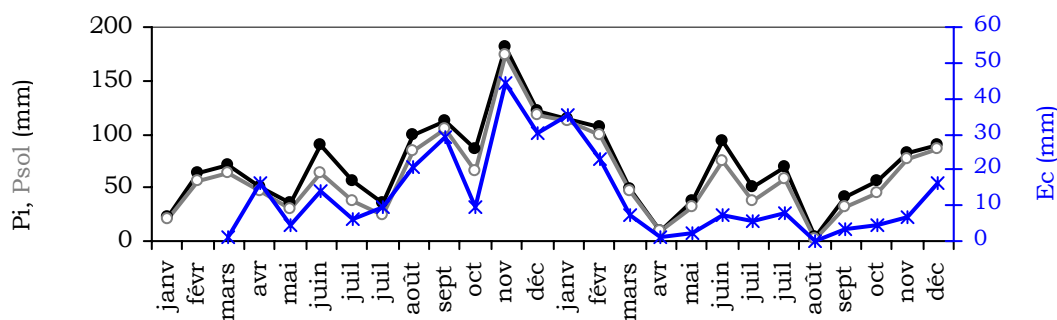


Figure 41 : Variations de la pluie incidente (Pi), de la pluie au sol simulée (Psol) après cumul mensuel et de la hauteur d'eau relevée chaque mois par les écoulements le long des troncs (Ec) en 2002 et 2003 pour *Fou30ans*.

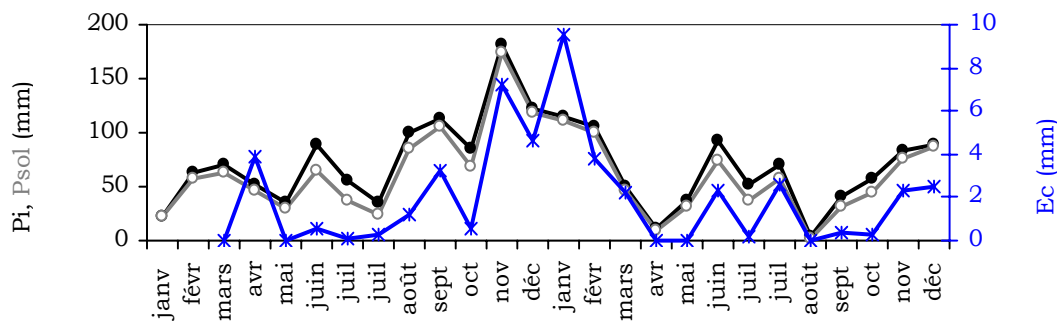


Figure 42 : Variations de la pluie incidente (Pi), de la pluie au sol simulée (Psol) après cumul mensuel et de la hauteur d'eau relevée chaque mois par les écoulements le long des troncs (Ec) en 2002 et 2003 pour *Fou150ans*.

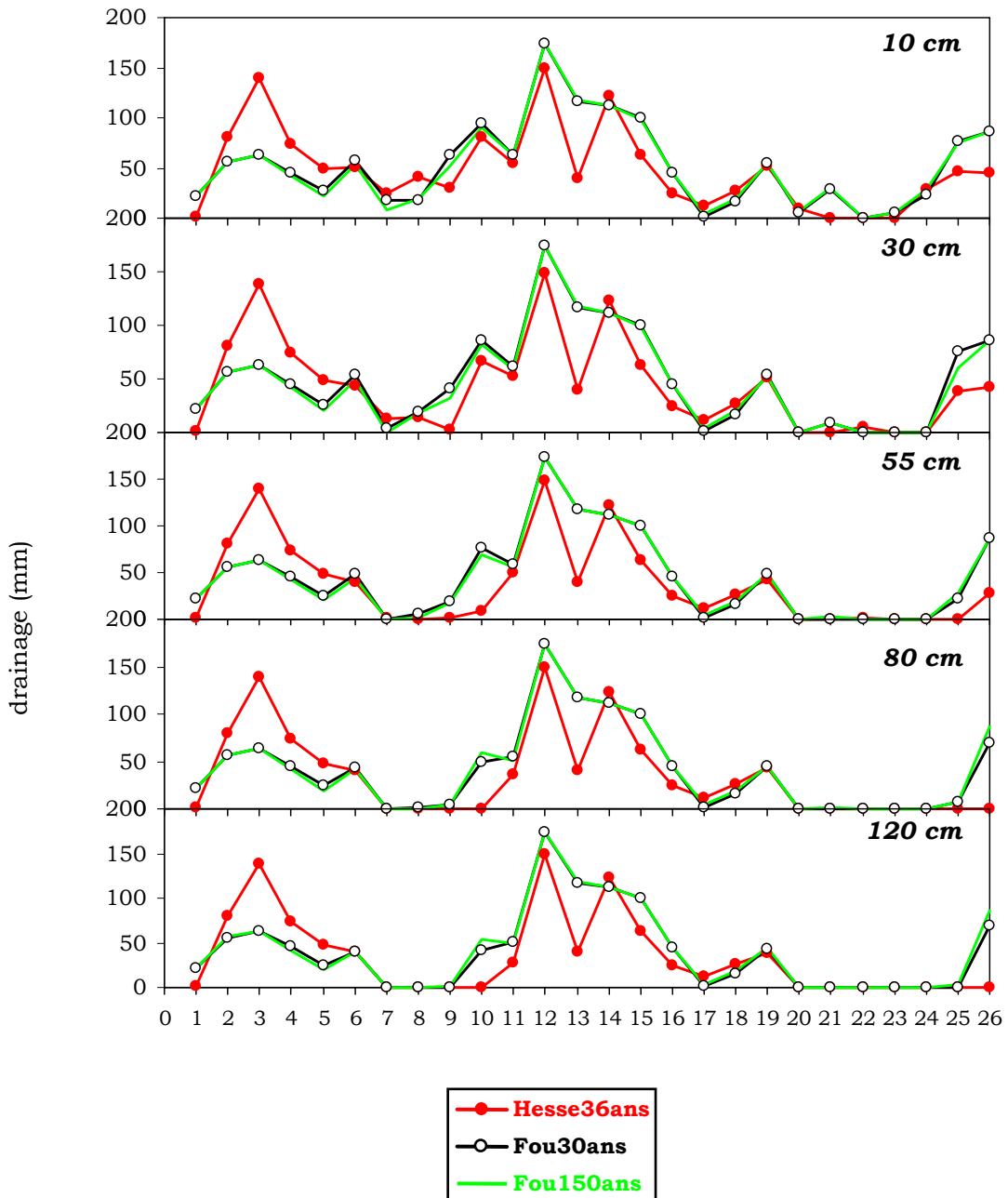


Figure 43 : Évolution des hauteurs d'eau drainées par période mensuelle en 2002 et 2003 pour Hesse36ans, pour Fou30ans et pour Fou150ans à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur.

2- Le drainage de l'eau dans le sol

Les évolutions du drainage mensuel de *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans* sont représentées à 10, 30, 55, 80 et -120 cm de profondeur. Quelque soit la profondeur, les drainages de *Hesse36ans* sont le plus souvent inférieurs aux autres (**figure 43**) ; ce qui peut d'ailleurs s'observer sur les cumuls annuels (**annexe A7**).

Afin d'illustrer la distribution des flux hydriques lors des simulations de biljou, nous présentons les cumuls journaliers de la pluie au sol, des drainages, de la transpiration additionnée de l'évapotranspiration pour *Hesse36ans* en 2002 et 2003.

Nous rappelons que le bilan hydrique s'équilibre pour 7 tranches de sol ; les tranches de sol correspondent aux profondeurs des prospections racinaires qui s'étendent au delà des 5 tranches équipées de lysimètres.

Lorsque les flux de transpiration sont activés en 2002, après le débourrement, on constate que les drainages cumulés dr10 et dr30 continuent à augmenter alors qu'un palier apparaît pour les drainages profonds. En toute rigueur, il convient de préciser qu'exceptionnellement les simulations établissent des drainages profonds, y compris pour la tranche 7, lorsque les averses sont fortes, mais qu'ils sont masqués dans ce palier.

En 2003, les flux cumulés dr10 et dr30 sont nettement moins forts et présentent presque un palier pendant toute la saison de végétation. Le palier observé pour les flux profonds persiste même alors que les flux de transpiration ont stoppé. Ainsi, la faiblesse des précipitations de 2003 se traduit d'une part par des flux de drainage en surface très faibles et d'autre part un drainage dr200 qui continue à rester nul après arrêt de la transpiration (**figure 44**).

Exception faite des fortes averses, la pluie arrivant au sol pendant la saison de végétation, ne sort pas de la sphère racinaire (dr200 est très fréquemment égal à zéro) : elle est utilisée pour la transpiration, l'évapotranspiration et la reconstitution de la réserve.

On remarque que le cumul annuel des flux de transpiration et d'évapotranspiration, pour deux années très contrastées, varie beaucoup moins que celui des drainages (**figure 44**).

Le cumul annuel masque les variations saisonnières de la transpiration. En fait, le drainage annuel perdu pour la sphère racinaire découle de la différence entre la pluie et les flux additionnels de transpiration, d'évapotranspiration et d'interception, c'est à dire de l'évapotranspiration réelle, ETR.

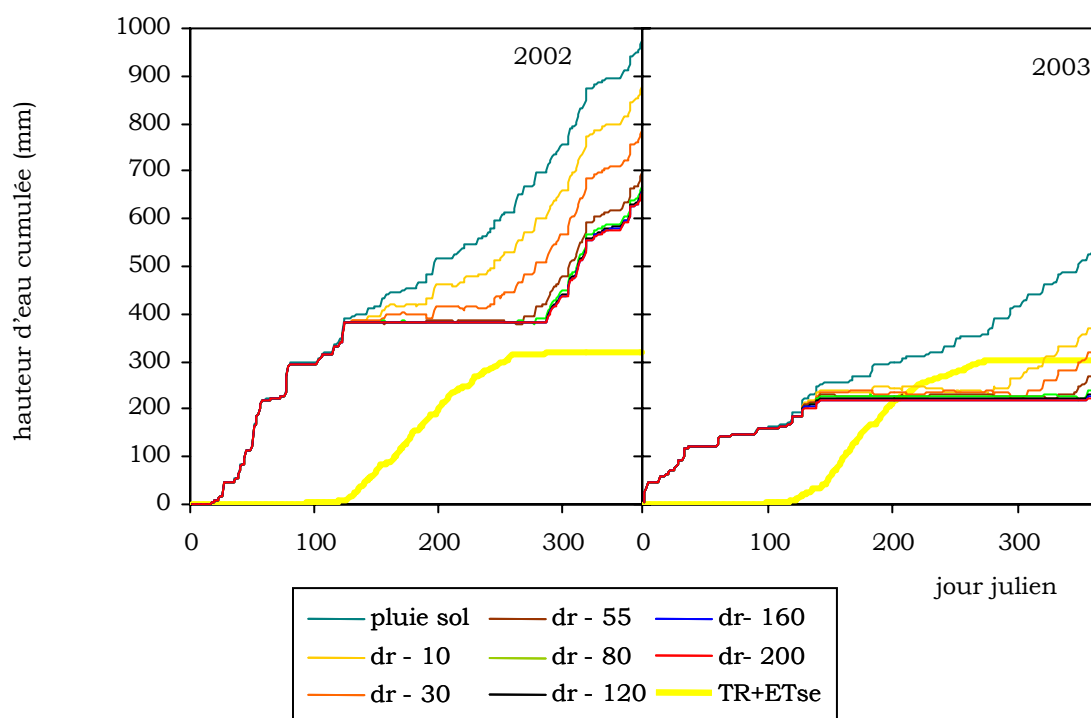


Figure 44 : Cumul de la hauteur d'eau simulée quotidiennement pour le drainage à 10, 30, 55, 80, 120, 160 et au-delà de 160 cm de profondeur, pour la pluie au sol et pour la transpiration additionnée de l'évapotranspiration en fonction du temps, pour *Hesse36ans* en 2002 (à gauche) et 2003 (à droite).

On peut chercher à montrer les variations de l'ETR simulé en établissant les écarts relatifs avec l'ETP.

Ainsi, la différence entre l'ETP cumulée chaque jour depuis le début de l'année, ($ETP_{J,cum}$), et l'ETR journalier également cumulée depuis le début de l'année, ($ETR_{J,cum}$), est exprimée par rapport à leur différence la plus forte, $(ETP_{J,cum} - ETR_{J,cum})_{max}$. On a réalisé ces calculs pour *Hesse36ans*, en 2002 et 2003.

Évidemment, en-dehors de la saison de végétation, la différence cumulée s'élève constamment. Pendant la période de végétation, on observe une phase ①, où l'écart chute, traduisant des journées avec une ETR supérieure à l'ETP et une phase ② où l'ETP est supérieure à l'ETR.

Bien que la transpiration du peuplement soit toujours inférieure à l'ETP, l'évapotranspiration et l'interception se cumulent aux flux hydriques sortants.

Les drainages qui sont modélisés découlent de nombreuses interactions qui évoluent au cours de la saison de végétation (**figure 45**).

Pour les années 2002 et 2003, nous avons présenté les cumuls annuels établis par le modèle biljou dans l'**annexe A7**.

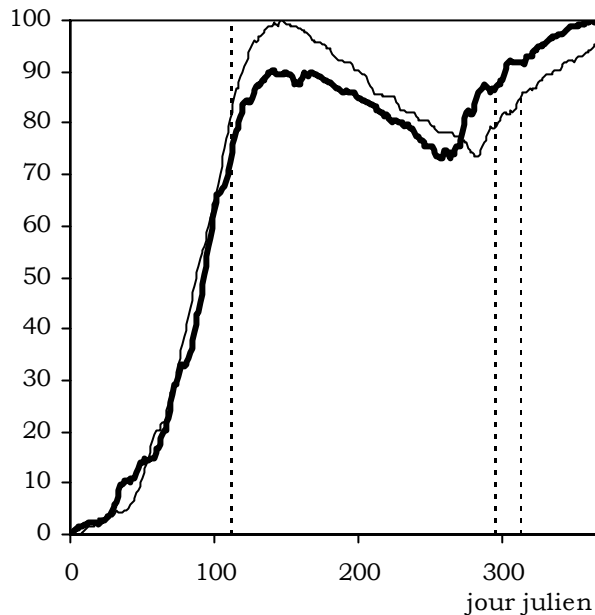


Figure 45 : Différence relative entre ETP et ETR cumulées quotidiennement en fonction du temps, en 2002 (trait gras) et 2003 (trait fin), pour *Hesse36ans*. On a indiqué les dates de débourrement et de chute des feuilles, par un trait pointillé vertical : jour 113 et 296 en 2002, jour 113 et 314 en 2003.

N.B.: Les flux annuels mettent en scène des couples de hauteurs d'eau et de concentrations minérales et carbonées formés comme suit :

- les hauteurs de pluie incidente avec les compositions chimiques des précipitations collectées au-dessus du couvert
- les mesures d'écoulements le long des troncs avec la composition chimique des écoulements le long des troncs
- la différence : « pluie au sol » simulée par biljou - mesures d'écoulements le long des troncs est multipliée avec la chimie des solutions recueillies par les collecteurs de pluviolessivats
- les sorties de simulation « pluie au sol » sont multipliées avec les concentrations des solutions de la litière
- les sorties de simulation « drainage », à différentes profondeurs, sont multipliées avec les analyses des solutions collectées par TL et ZTL, aux profondeurs correspondantes (10, 30, 55, 80 et 120 cm).

Chapitre II – Résultats des analyses minérales et carbonées

I – MATÉRIEL ET MÉTHODES

1- Calendrier des prélèvements

Les campagnes de terrain des prélèvements sont réalisées à un pas de temps mensuel qui correspond exactement à 28 jours pour Fougères et varie de 22 à 35 jours pour Hesse.

Afin de pouvoir comparer graphiquement les prélèvements réalisés à une date *grosso modo* identique entre sites, nous avons attribué une numérotation continue. Ci-dessous, la correspondance entre les numéros des campagnes de terrain et les dates calendaires des prélèvements.

Pour le site de Hesse :

2002

date	14/1	11/2	8/3	8/4	2/5	31/5	27/6	26/7	28/8	26/9	18/10	17/11	19/12
n° de période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

2003

date	14/1	17/2	14/3	7/4	7/5	5/6	10/7	7/8	29/8	2/10	28/10	21/11	16/12
n° de période	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

Pour les sites de Fougères :

2002

date	15/1	12/2	12/3	9/4	7/5	4/6	2/7	30/7	27/8	24/9	22/10	19/11	17/12
n° de période	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

2003

date	14/1	11/2	11/3	8/4	6/5	3/6	1/7	29/7	26/8	23/9	21/10	18/11	16/12
n° de période	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

2 - Les dispositifs collecteurs concernant le peuplement

Les mesures de concentration chimique des solutions des sites de la chronoséquence de Fougères a démarré en décembre 1997. Depuis janvier 2002, l'instrumentation progressive du site *Hesse36ans* permet une caractérisation chimique ; on précisera les dates des premières analyses chimiques si elles sont postérieures à janvier 2002. Parmi ces prélèvements seuls ceux réalisés en 2002 et 2003 et sur les sites de *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*, sont présentés dans ce travail de thèse.

- Des précipitations au-dessus du couvert (dépôts humides et dépôts secs), sont récoltées par une gouttière fixée au sommet d'un échafaudage. Les surfaces de collecte sont 8.99 dm² pour le site *Hesse36ans* et 6.50 dm² pour le site *Fou30ans*. L'installation fonctionne depuis avril 2002 à Hesse, à la fois pour les mesures qualitatives et quantitatives.
- Les modifications de la composition chimique des eaux de pluie au cours du transfert à travers le feuillage ont été évaluées à partir de deux systèmes. Il s'agit, d'une part, des collecteurs de pluviollessivats qui sont des systèmes de gouttières installés sous le couvert et dont la surface correspond environ à 0.5m², d'autre part, des systèmes de collier qui entourent le tronc des arbres. Les sites *Hesse36ans*, *Fou30ans* sont équipés de deux systèmes collectant les pluviollessivats et huit d'écoulement le long des troncs et, le site *Fou150ans* de six systèmes collectant les pluviollessivats et six d'écoulement le long des troncs.

Pour *Hesse36ans*, les équipements quantifient et mesurent les écoulements le long des troncs depuis février 2002 et les pluviollessivats depuis avril 2002.

Pour les sites de Fougères, les hauteurs d'eau d'écoulement le long des troncs ne sont mesurées qu'à partir d'avril 2002 (date d'installation des compteurs à auget).

Pour toutes les installations décrites ci-dessus, l'eau réceptionnée arrive au niveau du sol via un tuyau et transite dans un caisson fermé. Dans le caisson, l'eau est quantifiée par un auget, dont le nombre de basculements est mesuré par un compteur. Au fond du caisson, deux voies de sortie ont été aménagées, la première est une ouverture qui permet d'évacuer l'eau non échantillonnée et la seconde est un tuyau qui est relié à un bidon collecteur.

Pour les pluviollessivats, les bidons de collecte ont une contenance de 60 ou 120 litres. Pour les écoulements le long des troncs et la pluie incidente, les bidons de collecte ont une contenance de 1 litre. Pour évacuer le trop plein, une ouverture a été percée sur les bouchons des bidons collectant les écoulements le long des troncs.

Chaque mois, un opérateur prélève 150 ml de chaque échantillon (bouteilles ou bidons). Certains des échantillons sont regroupés : la caractérisation chimique des solutions s'écoulant le long des troncs et des pluviollessivats est réalisée en fonction du protocole de prélèvement et regroupement décrit ci-dessous (**tableau 10**):

site	type de collecteur	nombre de collecteurs	nombre de prélèvements de 150 ml	nombre d'analyses au laboratoire
<i>Hesse36ans</i>	EC	8	8	2
	pluviollessivats	2	2	2
<i>Fou30ans</i>	EC	8	8	1
	pluviollessivats	2	2	1
<i>Fou150ans</i>	EC	8	8	1
	pluviollessivats	6	6	3

Tableau 10 : 1) description des installations de terrain : type de collecteur, nombre de collecteurs, nombre de prélèvements et 2) nombre d'analyses au laboratoire pour *Hesse36ans*, *Fou30ans*, *Fou150ans*. EC= écoulement le long des troncs

3 - Les dispositifs collecteurs au niveau du sol

➔ dans les litières :

Des dispositifs réceptionnent les eaux des litières :

- à Hesse, dix systèmes collecteurs des eaux de litière sont installés, chacun ayant une dimension de 2.5 cm x 10.5 cm, surface totale = 294 cm².
- à Fougères, il y a neuf éléments de 2.5 cm x 40cm, le système de prélèvement a une surface totale de 900 cm².

À Fougères, les bidons de collecte ont une contenance de 30 litres et se trouvent dans une fosse. À Hesse, l'eau est ramenée, par dépression, dans une bouteille de verre de 2500 ml située dans un cabanon.

➤ Eau dans le sol

Deux types de lysimètre collectent l'eau dans le sol :

- Des bougies en céramique auxquelles une dépression de 40 kPa est appliquée constituent les Lysimètres avec Tension (TL) qui sont utilisés à Hesse.

Cette tension se situe dans la moyenne des valeurs utilisées dans ce type d'installation. Dans la littérature, on trouve des dépressions appliquées sur les TL qui sont différentes : 10kPa pour caractériser des eaux gravitaires et 60kPa pour caractériser de l'eau liée (Laclau J.P, 2001), 20kPa pour caractériser une eau de drainage d'une chênaie-hêtraie (Chang & Matzner, 2000), 30kPa pour collecter des solutions de sol de la rhizosphère de jeunes plants de *Fagus sylvatica* et de *Picea abies* à l'aide de micro bougies (Wang et al., 2000), 60kPa au maximum pour le sous-réseau CATAENAT (Ulrich E et al., 1998), 75kPa pour le prélèvement d'eau « capillaire » (Marques, 1996). L'eau prélevée s'achemine par des tuyaux vers des bouteilles de verre de 2500 ml disposées dans un cabanon. Une évacuation du trop plein est assurée par un second tuyau.

- Des Lysimètres avec une Tension égale à Zéro (ZTL) collectent uniquement l'eau par gravité : il s'agit de plaques, de 30 cm x 40 cm, insérées dans le sol de Fougères uniquement. Des tuyaux branchés aux ZTL débouchent dans une fosse où sont installés les bidons de 30 litres qui recueillent les solutions. Les sites de Fougères, sont également équipés de Lysimètres avec Tension.

Les profondeurs de sol instrumentées sont à 10, 30, 55, 80 et 120 cm, pour tous les sites.

Certains des échantillons sont regroupés (Hossann, 1999) pour réduire le nombre important d'analyses : les caractérisations chimiques des solutions de litière et de sol sont réalisées en fonction d'un protocole, de prélèvements et regroupements :

- Pour Hesse, à chaque profondeur, six collecteurs répartis dans deux fosses récoltent les solutions de sol à partir desquelles l'opérateur constitue deux échantillons d'analyse : 1 par profondeur et par fosse (**tableau 11**).

• La caractérisation chimique des solutions de *Fou30ans*, est réalisée par une seule analyse de solution gravitaire (ZTL), pour chaque profondeur. Cette solution se compose du regroupement de cinq solution de sol pour les prélèvements réalisés au niveau de la litière jusqu'à 55 cm de profondeur. À 80 et 120 cm de profondeur, une seule solution est prélevée dans le sol. Ce mode opératoire est celui appliqué depuis mars 2003, alors qu'auparavant deux échantillons différents étaient analysés pour les solutions de litière et les solutions de sol jusqu'à 55 cm (**tableau 12**).

Pour la seconde méthode de prélèvement avec tension, on dispose de quatre TL par profondeur. Les solutions de sol récupérées produisent, par regroupement, un échantillon d'analyse par profondeur (le dispositif n'est pas décrit par un tableau).

• à partir de mars 2003, la caractérisation chimique des solutions de *Fou150ans* est faite par trois analyses, depuis la litière et, avec des ZTL, jusqu'à 55 cm de profondeur de sol, ou, par deux analyses, pour les solutions de sol de 80 cm à 120 cm. Le dispositif est décrit dans le **tableau 13**.

profondeur (niveau d'insertion)	TL	fosses	échantillons analysés
Litière	6	2	2
- 10cm	6	2	2
- 30 cm	6	2	2
-55 cm	6	2	2
-80cm	6	2	2
-120cm	6	2	2

Tableau 11: 1) description de l'installation de terrain de *Hesse36ans* : nombre de TL et nombre de fosses contenant les TL en fonction de la profondeur et 2) nombre d'échantillons analysés.

profondeur (niveau d'insertion)	ZTL	fosses	échantillons analysés
Litière	5	2	2 puis 1*
- 10cm	5	2	2 puis 1*
- 30 cm	5	2	2 puis 1*
-55 cm	5	2	2 puis 1*
-80cm	1	1	1
-120cm	1	1	1

Tableau 12: 1) description de l'installation de terrain de *Fou30ans* : nombre de ZTL, nombre de fosses contenant les ZTL en fonction de la profondeur et 2) nombre d'échantillons analysés. * = changement de protocole à partir de mars 2003.

profondeur (niveau d'insertion)	faces			échantillons analysés
	ZTL	fosses	de fosses	
Litière	6	3	4	4 puis 3 *
- 10cm	6	3	4	4 puis 3 *
- 30 cm	10	3	4	4 puis 3 *
-55 cm	10	3	4	4 puis 3 *
-80cm	2	1	1	2
-120cm	2	1	1	2

Tableau 13 : 1) description de l'installation de terrain de *Fou150ans*: nombre de ZTL, nombre de fosses contenant les ZTL, nombre de faces de fosse contenant les ZTL en fonction de la profondeur et 2) nombre d'échantillons analysés. * = changement de protocole à partir de mars 2003.

Pour récapituler, chaque mois:

-les compteurs avec auget et les volumes collectés par les lysimètres avec tension et sans tension sont relevés.

-un échantillonnage de 150 ml, au maximum, des différentes solutions est réalisé

-les gouttières au sol et les bidons de 30, 60 et 120 litres, sont frottés avec un brosse et un rinçage avec le surplus des eaux recueillies est réalisé. Les colliers entourant le tronc sont également rincés avec l'eau excédentaire.

4 - Conditionnement et laboratoire

L'échantillon de 150 ml prélevé sur le terrain est conservé au laboratoire à 4°C. Les solutions sont filtrées à 0,45 µm (filtres Gelman en ester de cellulose).

L'ensemble des analyses a été réalisé au laboratoire de Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers de Nancy par un même opérateur pour les éléments entrant dans la balance ionique (C. Hossann) et par la même opératrice pour le carbone (L. Gelhaye). S, P, K, Ca, Mg, Na, Mn, Fe, Si, Al ont été dosés sous leur forme totale par spectrométrie d'émission à plasma induit (Jobin-Yvon JY 180 ULTRACE). N-NO₃, N-NH₄, Cl, par colorimétrie (Auto-analyseur Bran Luebbe, c'est-à-dire Traacs 2000). La mesure du carbone dissous est réalisé par absorption infrarouge du CO₂ dégagé après combustion du carbone (Shimadzu TOC 5050)

N.B.: Les résultats pour les composés azotés (NH₄ et NO₃) sont exprimés par leur contenu (masse) en azote. C'est pourquoi les concentrations et les dépôts sont indiqués en N-NH₄, N-NO₃.

5 - Calculs des flux d'éléments minéraux et de carbone

Dans une première étape, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*, on calcule les concentrations moyennes, **C.Moy.**, en éléments minéraux et en carbone pour chacune des campagnes de terrain. Ces concentrations moyennes, **C.Moy.**, sont réalisées pour chaque type de collecteurs (pluie le long des troncs, pluviollessivats) et pour chaque profondeur de sol (percolats recueillis par les lysimètres avec et sans tension)

Dans une deuxième étape, nous avons établi des flux hydriques à un pas de temps mensuel, **F.Eau**. Pour les pluies incidentes, les pluies au sol et les drainages, en cumulant les sorties journalières du modèle biljou sur chaque période comprise entre deux campagnes de terrain. Pour les écoulements le long des troncs, nous avons préféré utiliser les lectures des compteurs à auget relevées au moment des prélèvements des solutions en raison de la grande différence

entre le modèle et les mesures (cf. chap.II). La lecture des compteurs à auget a été réalisée à partir de février 2002 à *Hesse36ans* et mars 2003 à *Fou30ans* et *Fou150ans*.

La concentration moyenne ($C_{Moy.}$) est alors multipliée par le flux hydrique ($F_{Eau.}$) : un flux mensuel d'éléments minéraux ou de carbone ($F_{M.Min.}$) est établi selon l'équation [15] :

$$F_{M.Min.} = (C_{Moy.} \times F_{Eau.}) \times 0.01 \quad (15)$$

Avec :

$F_{M.Min.}$: flux mensuel d'un élément minéral ou de carbone (en kg/ha/mois)

$C_{Moy.}$: concentration moyenne (en mg/l), par type de collecteur et par profondeur de sol pour les lysimètres.

$F_{Eau.}$: flux hydrique au pas de temps mensuel (en mm, or 1mm = 1 litre sur 1 m²)

Nous estimons alors les flux minéraux et carbonés annuels en totalisant les $F_{M.Min.}$ d'une année selon l'équation [16]:

$$F_{A.Min.} = 0.01 \sum_1^{13} F_{Eau.} \times C_{Moy.} \quad (16)$$

Avec :

$F_{A.Min.}$: flux annuel d'un élément (en kg/ha/an)

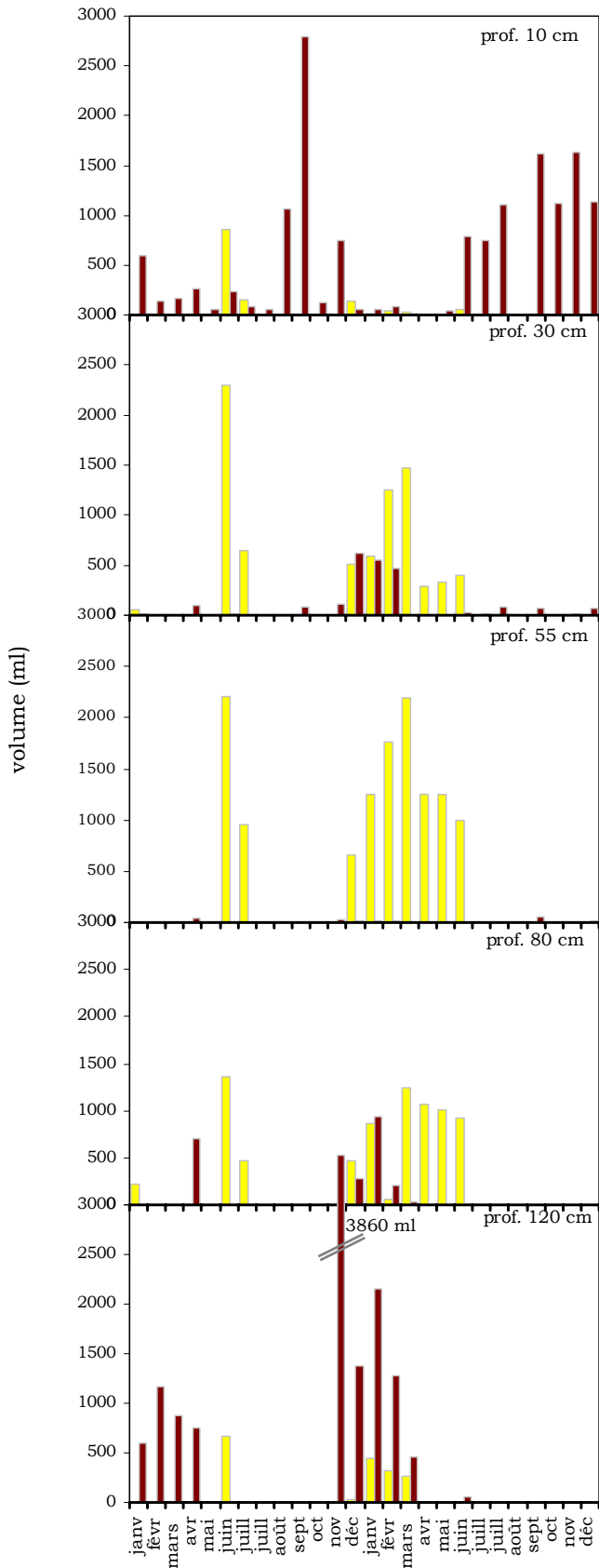
$F_{Eau.}$: flux hydrique au pas de temps mensuel (en mm)

$C_{Moy.}$: concentration moyenne (mg/l), par type de collecteur et par profondeur de sol pour les lysimètres.

$i=1$ à 13 : l'année est constituée de 13 périodes

6 – Problèmes méthodologiques

À chaque fois que les teneurs correspondent à des valeurs aberrantes, elles sont supprimées et, le cas est signalé par les abréviations t.a. À Hesse, le dispositif de tuyaux servant aux connections de tous les lysimètres installés au niveau du sol n'était pas inerte : le dispositif générait du carbone et du soufre ; nous avons, par exemple, supprimé les drainages à 10 cm de profondeur qui sont de 1845.5 kg/ha de carbone et 592 kg/ha de soufre en 2002.



■ lysimètre avec tension (TL)
 ■ lysimètre zéro tension (ZTL)

Figure 46 : volume moyen collecté par les lysimètres sans tension (ZTL) et les lysimètres avec tension (TL) en fonction de la profondeur et des différentes campagnes de terrain réalisées en 2002 et 2003 pour Fou30ans.

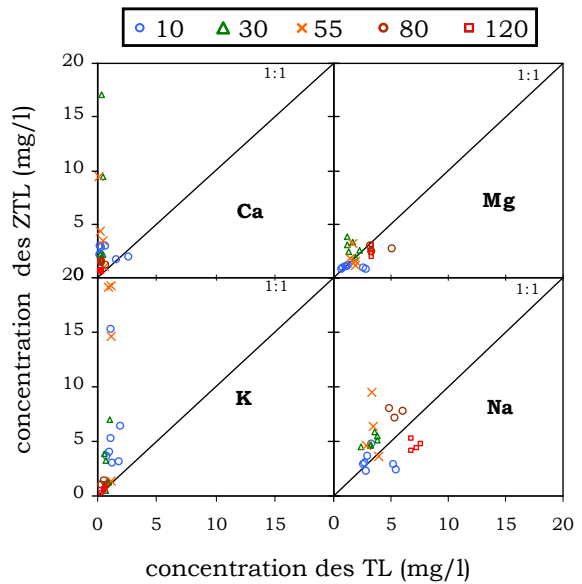


Figure 47 : Comparaison des concentrations des eaux collectées par ZTL en fonction des eaux collectées par TL pour le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium. Les profondeurs de 10 cm, 30 cm, 55 cm, 80 cm et 120 cm ont été distinguées et la droite 1:1 a été représentée.

II – RÉSULTATS

1 – La collecte des solutions

Au cours des 26 campagnes de terrain, réalisées mensuellement en 2002 et 2003, les bidons étaient parfois vides pour les solutions de sol. Les lysimètres, insérés en dessous de la litière, ont permis d'extraire des solutions 6 à 15 fois à *Hesse36ans*, 6 à 24 fois à *Fou30ans* et 7 à 24 fois à *Fou150ans*, selon les profondeurs. Il apparaît que la détermination au pas de temps mensuel, des entrées-sorties en éléments minéraux, sera affectée d'un nombre important de données manquantes : 76.9% des relevés à -10 cm pour *Hesse36ans*, 76.9% et 73.1% pour *Fou30ans* et *Fou150ans* à 80 cm (**tableau 14**).

Type de collecteur	nombre de collectes mensuelles avec échantillons			% de données manquantes sur 2002-2003		
	Hesse36ans	Fou30ans	Fou150ans	Hesse36ans	Fou30ans	Fou150ans
pluie extérieure	23	25		11.5	3.8	
pluiolessivats	23	25	25	11.5	3.8	3.8
écoulement tronc	24	24	22	7.7	7.7	15.4
lysimètre litière	24	25	25	7.7	3.8	3.8
lysimètre 10 cm	6 (TL)	24 (ZTL)	24 (ZTL)	76.9 (TL)	7.7 (ZTL)	7.7 (ZTL)
lysimètre 30cm	13 (TL)	14 (ZTL)	17 (ZTL)	50 (TL)	46,1 (ZTL)	34.6 (ZTL)
lysimètre 55 cm	15 (TL)	8 (ZTL)	13 (ZTL)	42.3 (TL)	69.2 (ZTL)	50 (ZTL)
lysimètre 80 cm	12 (TL)	6 (ZTL)	7 (ZTL)	53.8 (TL)	76.9 (ZTL)	73.1 (ZTL)
lysimètre 120 cm	11 (TL)	10 (ZTL)	9 (ZTL)	57.7 (TL)	61.5 (ZTL)	65.4 (ZTL)

Tableau 14 : Nombre de collectes où au moins un échantillon de solution a été prélevé et pourcentage de données manquantes sur la période 2002-2003, selon le type de collecteurs, à *Hesse36ans*, *Fou30ans*, *Fou150ans*. TL = lysimètres avec tensions et ZTL = lysimètres sans tension.

Pour chaque campagne de terrain réalisée sur le site *Fou30ans*, en 2002 et 2003, nous comparons les volumes moyens prélevés à différentes profondeurs par les lysimètres avec tensions (TL) et les lysimètres sans tension (ZTL). Aucune méthode n'apparaît être à privilégier :

par exemple, les ZTL sont plus aptes à fournir de l'eau à 10 cm de profondeur alors qu'elles sont nettement moins efficaces que les TL à 55 cm de profondeur (**figure 46, annexe A6**).

Les ZTL capturent l'eau qui, par gravité, est drainée dans la macroporosité alors que les TL extraient l'eau des micropores. En fait, les eaux collectées par ZTL et TL correspondent à une eau dont le temps de résidence est différent (Marques et *al*, 1996).

Afin de montrer les différences de composition chimique d'une solution collectée par TL d'une solution collectée par ZTL, nous confrontons les concentrations de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium obtenues par chacune des deux méthodes de prélèvement, en distinguant les différentes profondeurs d'instrumentation (**figure 47**). Les concentrations sont différentes et aucun écart systématique ne se dégage. Des différences entre méthode ont également été observées par Marques et *al*, (1996) et Laclau et *al*. (2003). Nous écartons donc définitivement l'idée d'utiliser les caractérisations chimiques des eaux collectées avec TL, pour palier aux données manquantes, sur les sites de Fougères.

Ca

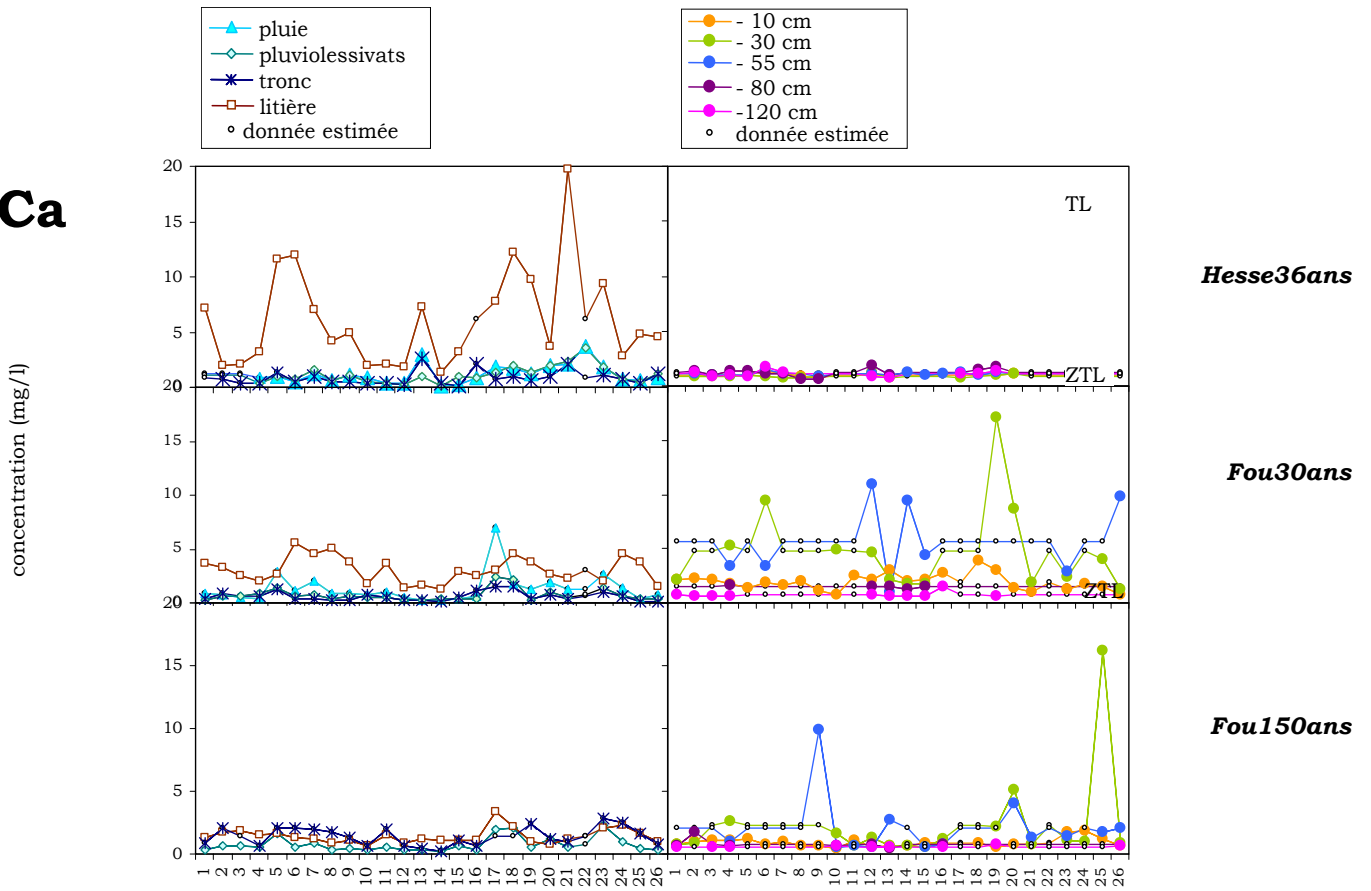


Figure 48 : Évolution de la concentration mensuelle de calcium au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements des sites sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL.

Mg

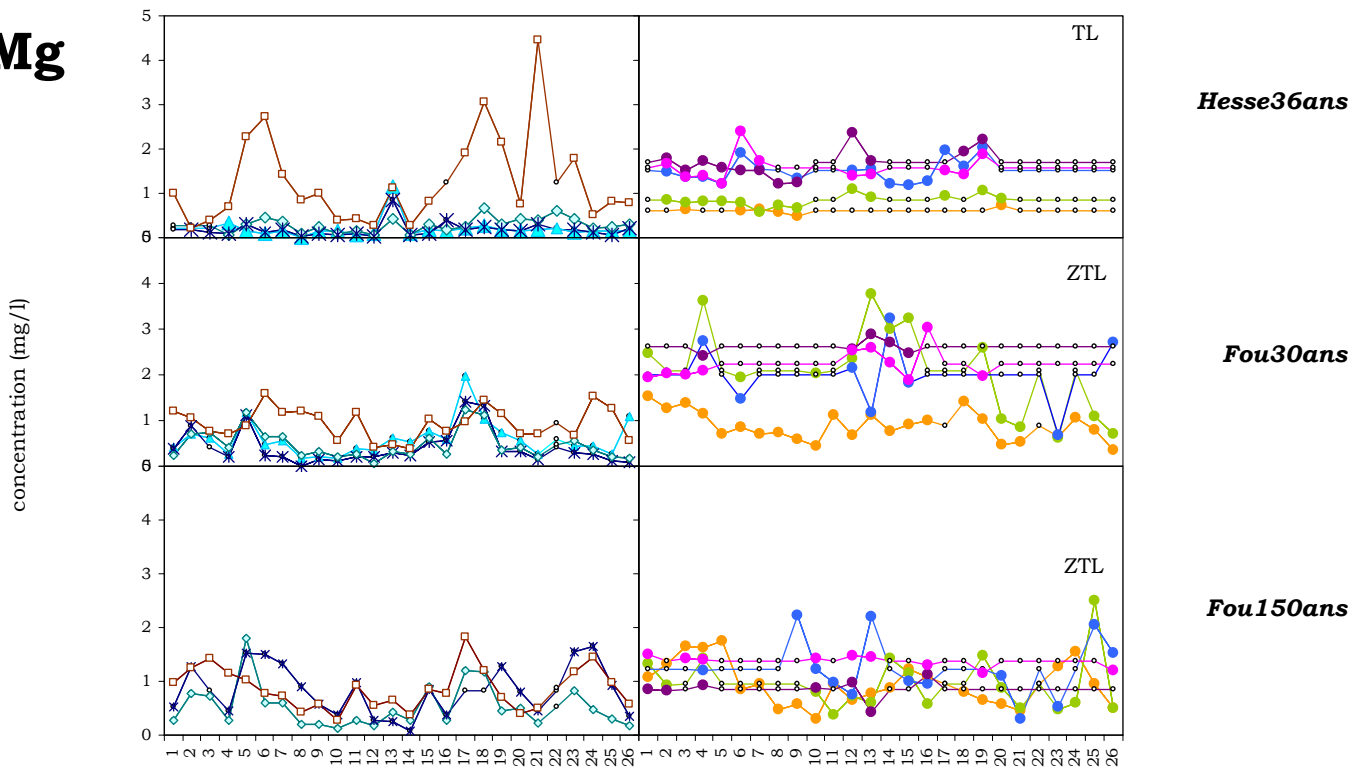


Figure 49 : Évolution de la concentration mensuelle de magnésium au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL.

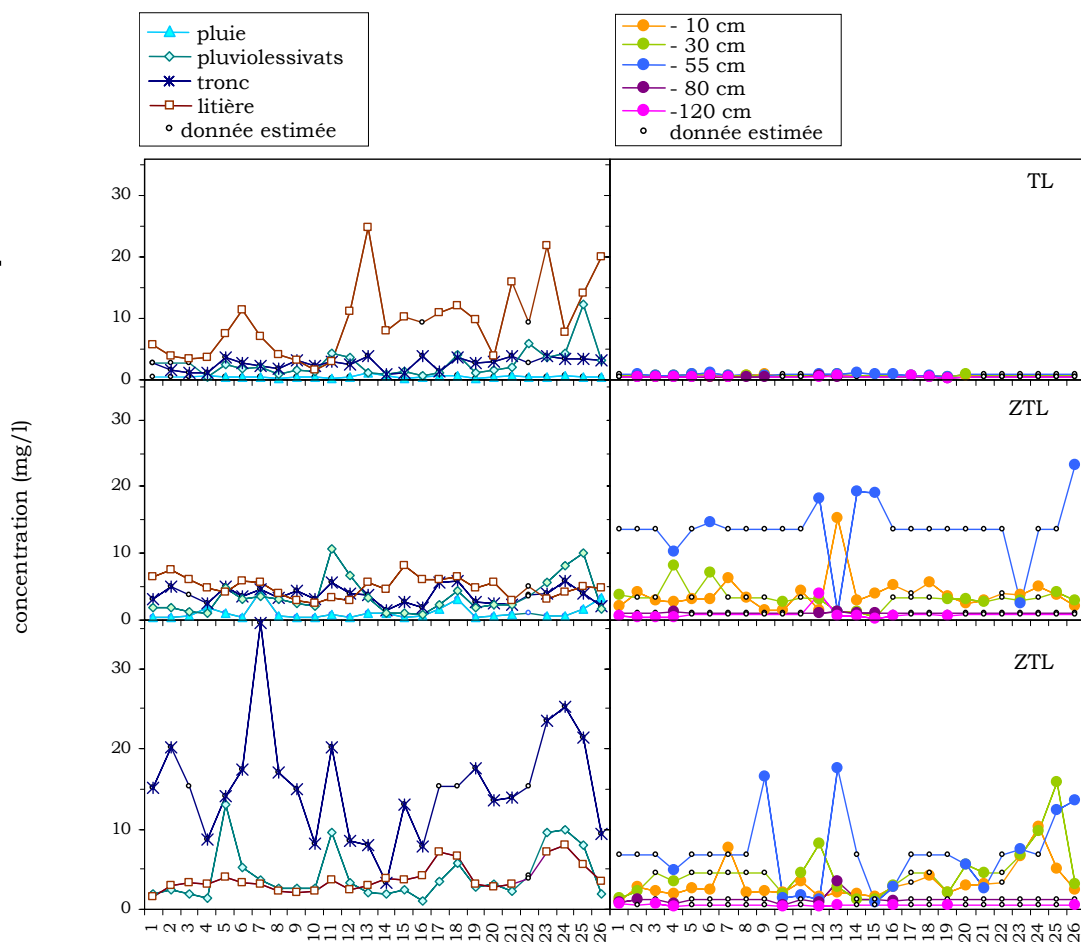
K**Hesse36ans****Fou30ans****Fou150ans**

Figure 50 : Évolution de la concentration mensuelle de potassium au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL.

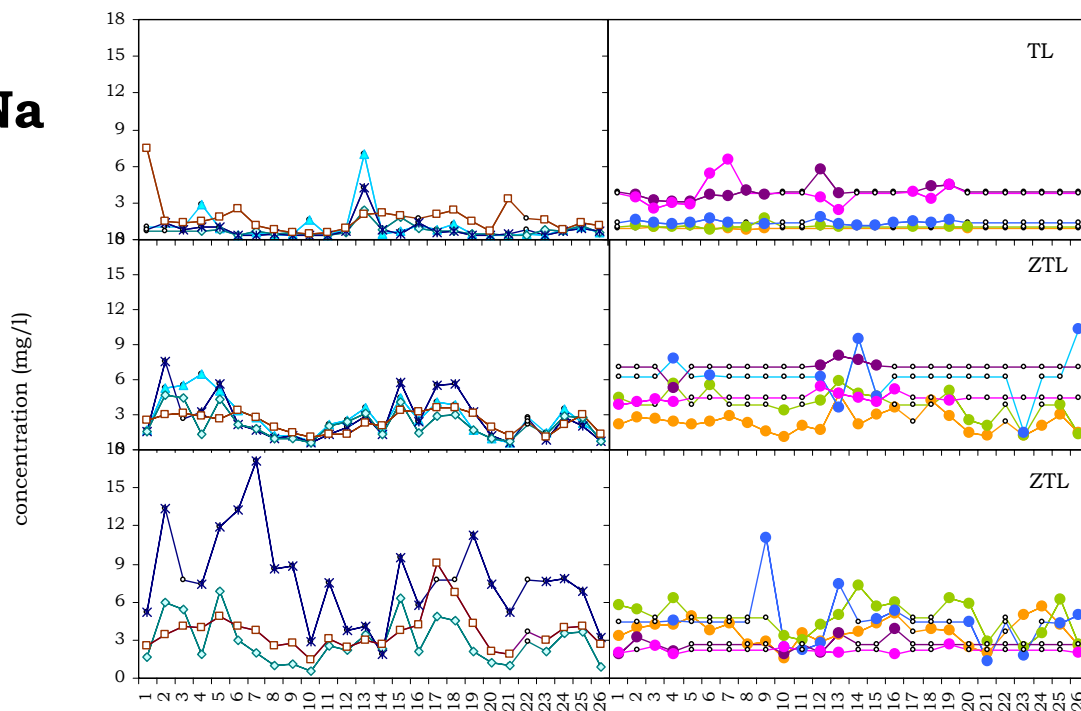
Na**Hesse36ans****Fou30ans****Fou150ans**

Figure 51 : Évolution de la concentration mensuelle de sodium au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL.

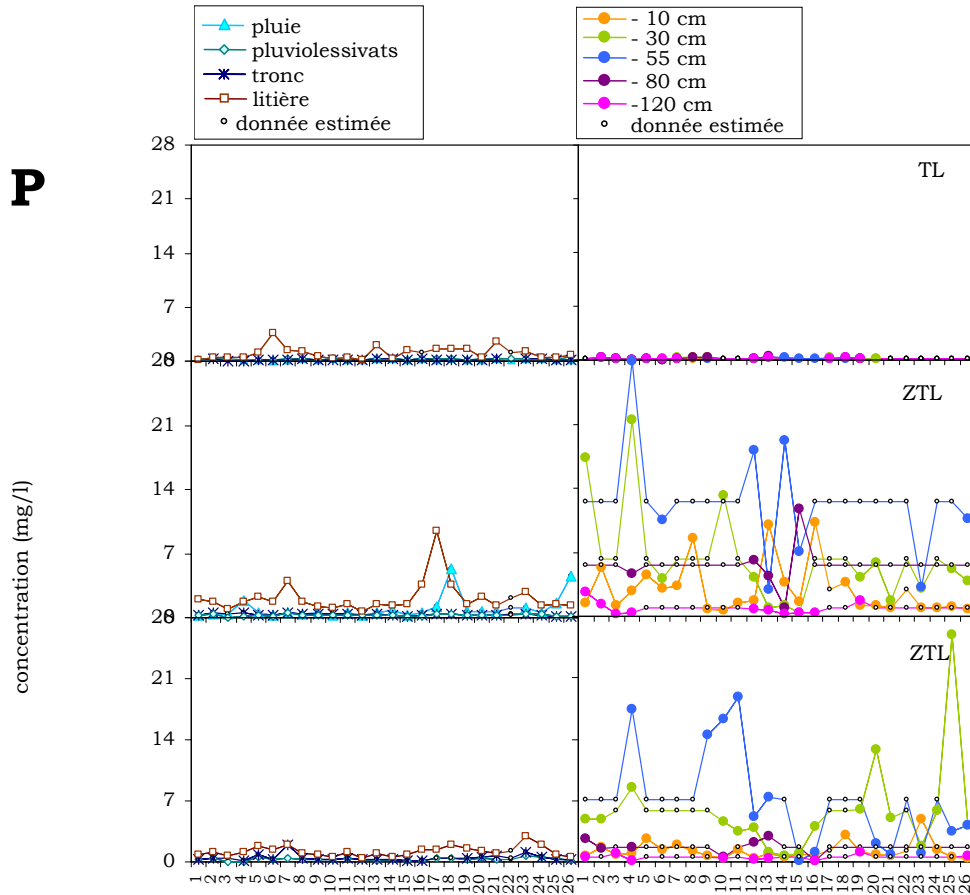
P*Hesse36ans**Fou30ans**Fou150ans*

Figure 52 : Évolution de la concentration mensuelle de phosphore au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL

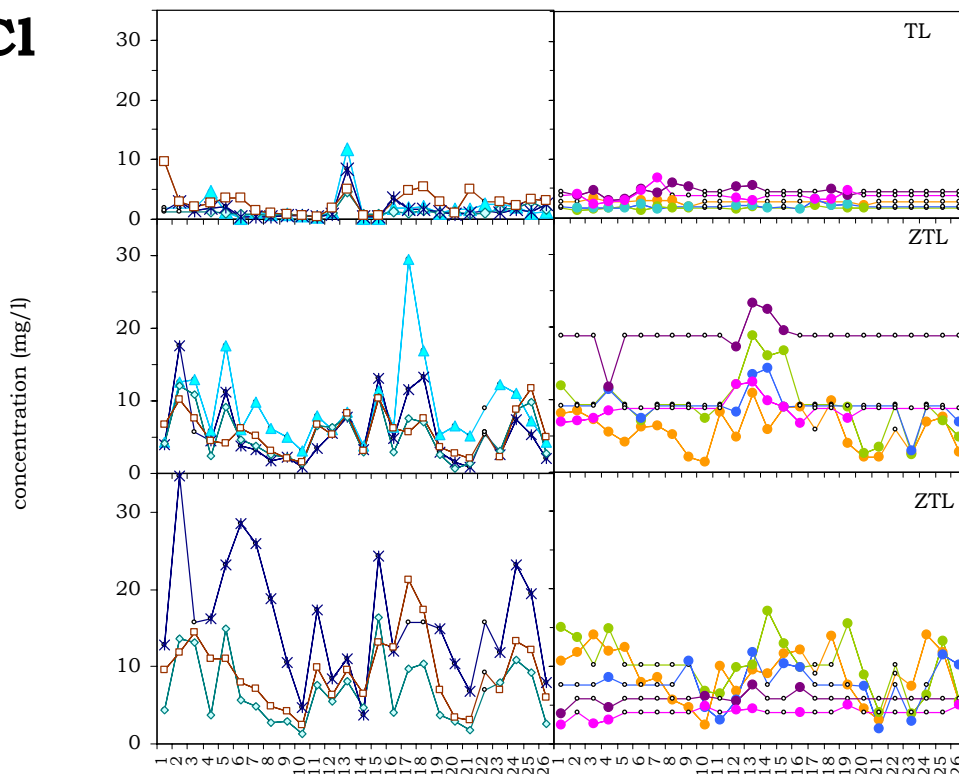
C1*Hesse36ans**Fou30ans**Fou150ans*

Figure 53 : Évolution de la concentration mensuelle de chlore au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL.

N-NO3

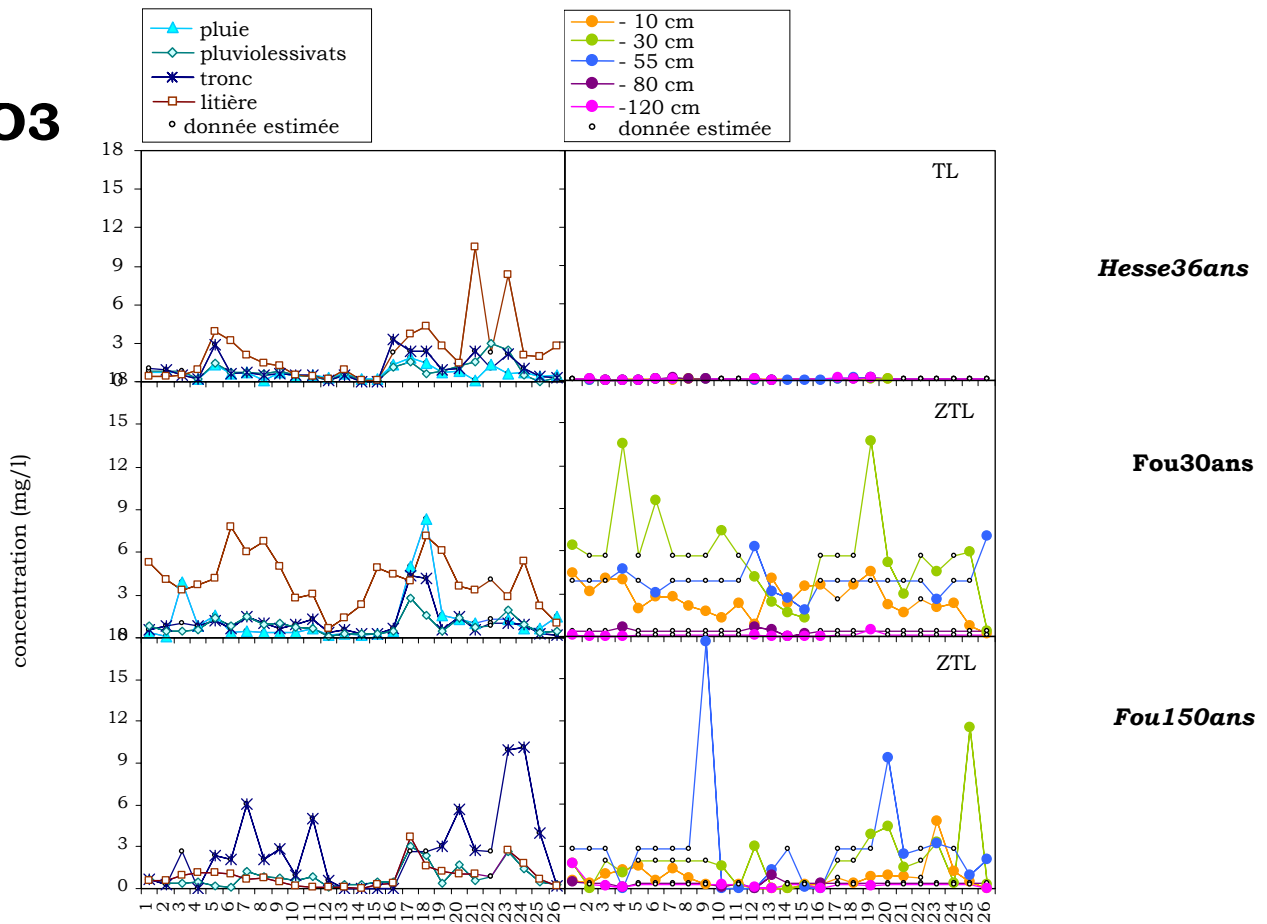


Figure 54 : Évolution de la concentration mensuelle de N-NO3 au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL

N-NH4

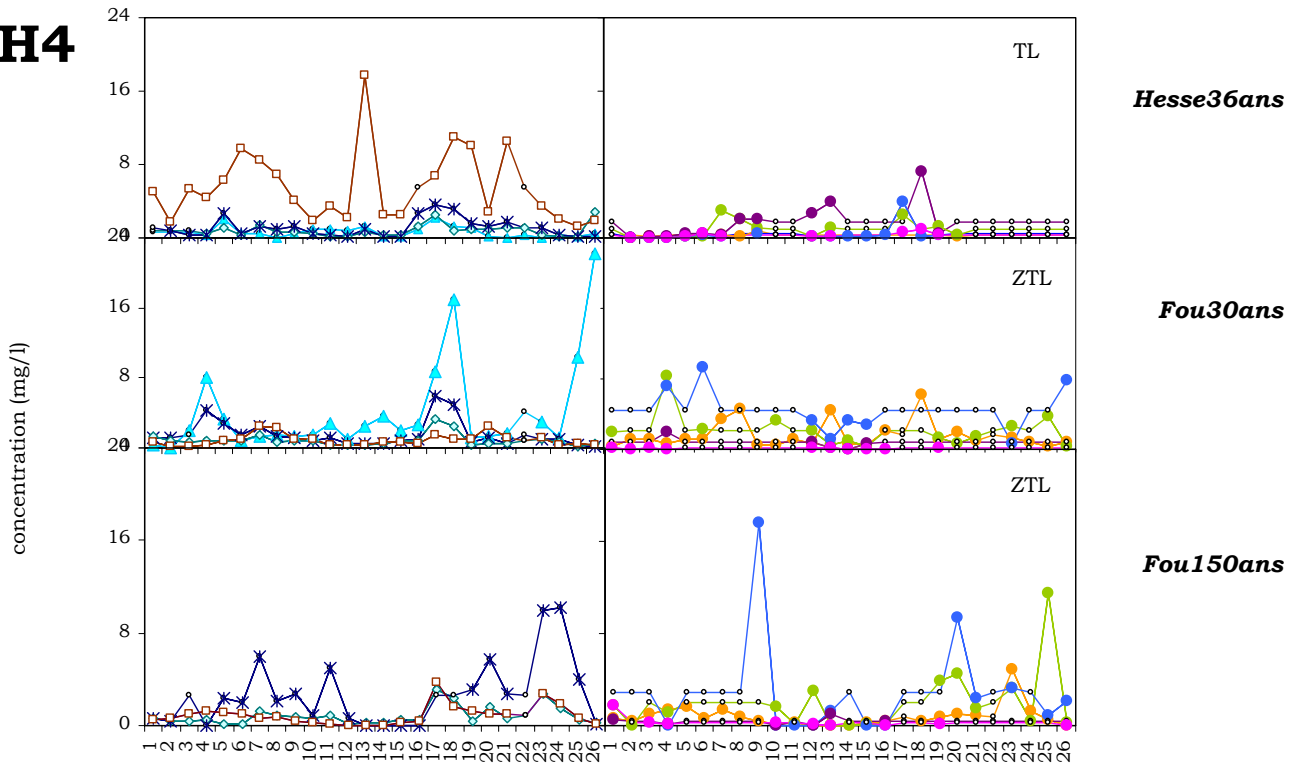


Figure 55 : Évolution de la concentration mensuelle de N-NH4 au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL

C

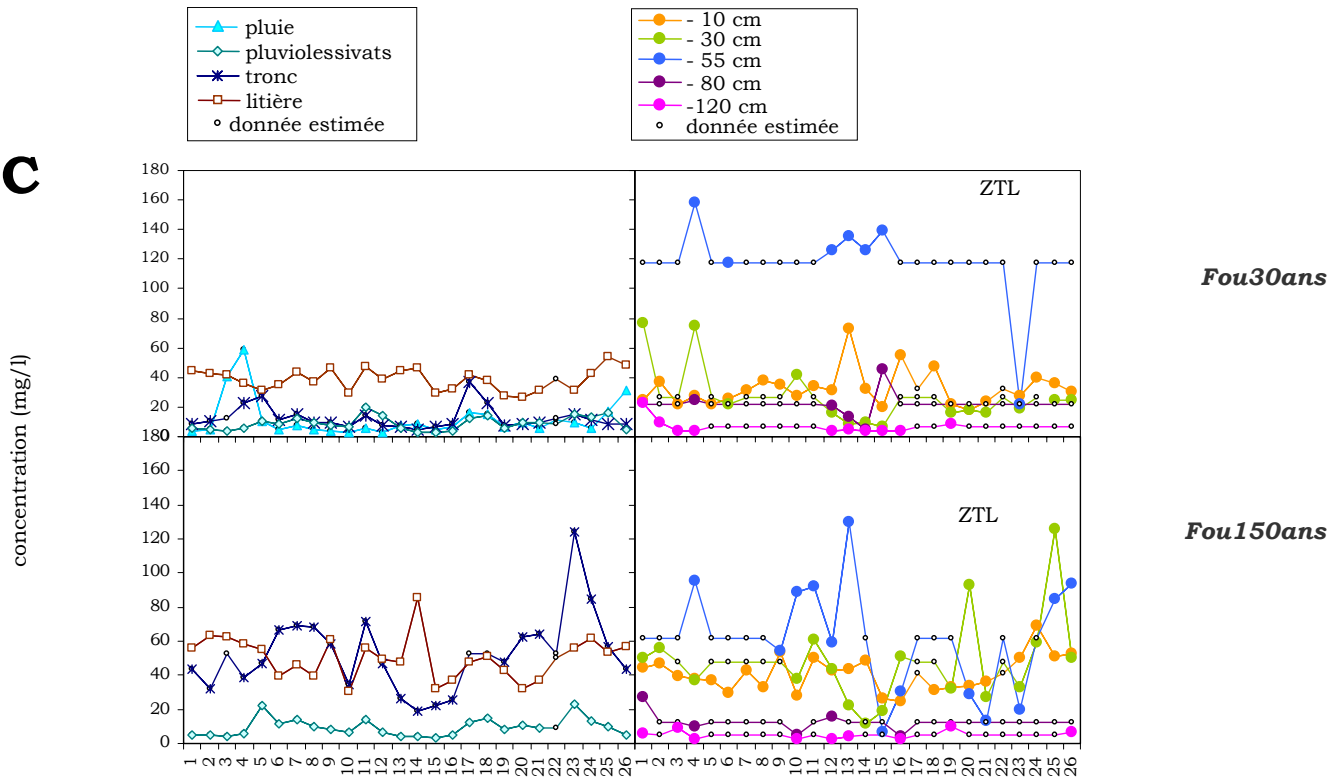


Figure 56 : Évolution de la teneur mensuelle de carbone au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées par gravité avec les ZTL

RÉSULTATS DES ANALYSES MINÉRALES ET CARBONÉES

	Sites	pluie incidente (mg/l)		pluiolessivats (mg/l)		tronc (mg/l)		Litière (mg/l)	
		moy	i. c.	moy	i. c.	moy	i. c.	moy	i. c.
Ca	<i>Hesse36ans</i>	1.21	0.38	1.15	0.35	0.86	0.27	6.12	1.91
	<i>Fou30ans</i>	1.32	0.57	0.71	0.23	0.60	0.18	3.06	0.50
	<i>Fou150ans</i>			0.77	0.24	1.39	0.33	1.41	0.25
Mg	<i>Hesse36ans</i>	0.20	0.10	0.29	0.07	0.18	0.07	1.25	0.45
	<i>Fou30ans</i>	0.59	0.16	0.47	0.13	0.40	0.16	0.94	0.14
	<i>Fou150ans</i>			0.53	0.17	0.83	0.22	0.86	0.16
K	<i>Hesse36ans</i>	0.50	0.08	2.71	1.09	2.67	0.42	9.38	2.67
	<i>Fou30ans</i>	1.11	0.44	3.50	1.13	3.72	0.56	4.95	0.62
	<i>Fou150ans</i>			4.17	1.34	15.3	3.23	3.8	0.71
Na	<i>Hesse36ans</i>	1.04	0.61	0.73	0.21	0.79	0.34	1.73	0.60
	<i>Fou30ans</i>	2.79	0.68	2.16	0.51	2.62	0.83	2.37	0.36
	<i>Fou150ans</i>			2.88	0.75	7.74	1.71	3.62	0.65
P	<i>Hesse36ans</i>	0.2	0.03	0.26	0.05	0.20	0.04	1.06	0.36
	<i>Fou30ans</i>	1.00	0.52	0.27	0.05	0.33	0.05	2.14	0.72
	<i>Fou150ans</i>			0.32	0.06	0.48	0.18	1.21	0.25
Cl	<i>Hesse36ans</i>	1.86	1.01	1.30	0.38	1.55	0.72	2.84	0.88
	<i>Fou30ans</i>	9.04	2.40	5.35	1.41	5.61	1.91	5.63	1.16
	<i>Fou150ans</i>			6.92	1.80	15.76	3.63	9.30	1.90
N-NO3	<i>Hesse36ans</i>	0.69	0.21	0.84	0.33	1.04	0.41	2.26	1.08
	<i>Fou30ans</i>	1.28	0.77	0.86	0.26	1.04	0.45	4.06	0.77
	<i>Fou150ans</i>			0.85	0.33	2.66	1.35	0.89	0.35
N-NH4	<i>Hesse36ans</i>	0.64	0.26	0.82	0.30	1.06	0.43	5.49	1.70
	<i>Fou30ans</i>	4.06	2.22	0.87	0.29	1.52	0.63	0.89	0.27
	* <i>Fou30ans</i>	*(3.00)	*(1.60)						
	<i>Fou150ans</i>			0.95	0.38	3.28	1.51	0.81	0.28
S	<i>Hesse36ans</i>	3.40	0.52	1.09	0.17	1.81	0.35	t.a.	t.a.
	<i>Fou30ans</i>	2.48	0.56	1.18	0.26	1.75	0.42	1.49	0.14
	<i>Fou150ans</i>			1.36	0.33	5.33	1.08	1.81	0.32
Carbone	<i>Hesse36ans</i>	14.87	4.40	8.51	1.66	11.61	2.69	t.a.	t.a.
	<i>Fou30ans</i>	11.70	5.45	9.04	1.92	12.47	3.31	38.63	3.10
	<i>Fou150ans</i>			9.35	2.20	52.32	10.67	50.29	5.18

Tableau 15 : Moyenne des concentrations en Ca, Mg, K, Na, P, Cl, N-NO3, N-NH4, et carbone pour *Hesse36ans*, *Fou30ans*, et *Fou150ans*, établie pour la période 2002-2003 dans les pluies incidentes, les pluiolessivats, le ruissellement le long des troncs et les solutions de litière. L'intervalle de confiance, i.c., correspondant a été calculé et les teneurs aberrantes sont indiquées par les initiales t.a.

* Pour *Fou30ans*, nous avons indiqué les valeurs calculées pour N-NH4 sans les périodes 25 et 26, entre parenthèses.

2 - Évolution des concentrations des solutions

- ❖ Sur l'ensemble de la période 2002-2003, on a calculé les concentrations minérales et carbonées moyennes par type de collecteur et, lorsqu'il s'agit de TL ou ZTL, nous avons distingué les différentes profondeurs d'instrumentation. Ces valeurs moyennes sont un moyen de reconstituer les données manquantes. Les valeurs moyennes 2002-2003 établies, par exemple, pour la pluie incidente, les pluviollessivats, l'écoulement le long des troncs et la solution de litière sont montrées ainsi que l'intervalle de confiance **(tableau 15)**.
- ❖ Au cours de 2002 et 2003, l'évolution de la concentration moyenne mensuelle de chaque élément minéral est représentée pour chacun des sites d'étude ; les pluies collectées à différents niveaux du peuplement sont mises à gauche et les solutions de sol à droite, dans les représentations graphiques. On a aussi fait apparaître les valeurs moyennes, attribuées aux données manquantes, désignées par « donnée estimée » **(figures 48 à 56)**.

Certains résultats attirent l'attention :

- Sur les sites *Hesse36ans* et *Fou30ans*, les solutions de litières sont nettement plus concentrées en calcium, magnésium, potassium, et carbone que les solutions des troncs ; les teneurs de calcium et magnésium sont telles qu'elles conduisent à dégager les litières des autres solutions et, mettent en évidence l'évolution synchrone de ces deux éléments **(figure 48 et 49)**. En revanche, ce sont les solutions des troncs qui se distinguent pour le site *Fou150ans*, avec des concentrations franchement plus élevées pour certains éléments comme le potassium, et des concentrations équivalentes aux solutions de litière pour les éléments comme le calcium, le magnésium et le carbone **(tableau 15)**.
- Pour certains éléments, les moyennes des concentrations sont plus élevées dans la pluie incidente que dans les pluviollessivats. Sur les sites trentenaires, les éléments concernés sont : le phosphore pour *Fou30ans*, N-NH₄ pour *Fou30ans*, le soufre et le carbone pour *Hesse36ans* **(tableau 15)**.
- Sur le site *Fou30ans*, deux pics marquants de N-NH₄ sont uniquement observés dans les pluies incidentes pour les périodes n°25 et n°26. Cette situation est différente des pics des périodes n°4, n°17 et n°18 où des concentrations fortes sont également trouvées dans les écoulements le long des troncs **(figure 55)**.

Nos résultats ne nous permettent pas de nous positionner dans le courant de pensées de divers auteurs.

En effet, dans les travaux de Leonardi et Flückiger (1987), les écoulements le long des troncs de hêtres âgés de 70 à 120 ans, sont considérés comme le reflet de l'absorption ou du lessivage de la canopée.

D'autre part, les études réalisées par Marques et Ranger (1997), sur des peuplements de *Pseudotsuga menziesii* âgés de 20 à 60 ans, permettent pour la plupart des éléments d'établir un gradient croissant d'enrichissement minéral des précipitations : pluie incidente < pluviollessivats < écoulement le long des troncs.

Toutefois :

- Lebret (2002) a chiffré l'importance des mousses et lichens sur la chronoséquence de Fougères, par une étude des retombées au sol (feuilles, fruits, fleurs et chatons, écailles de bourgeons, bois etc...). Les mousses et lichens représentent 158 kg/ha/an, soit 3.2 % de l'ensemble des retombées de *Fou150ans* alors que pour *Fou30ans* ces retombées ont été estimées nulles. (Pour *Hesse36ans*, ces retombées sont également estimées nulles.)

Les concentrations très élevées des écoulements le long des troncs du *Fou150ans* peuvent donc s'expliquer par la présence de mousses et lichens sur les troncs des hêtres âgés.

Chapitre III – Couplage des flux hydriques avec les teneurs en minéraux et carbone

L'objet de cette partie est d'établir les entrées et sorties en minéraux à un pas de temps mensuel. Les apports atmosphériques par pluie incidente, les flux sous couvert (au niveau des troncs et des pluviollessivats) et les flux de litière sont établis pour la partie aérienne du peuplement. Les flux de drainage de cinq tranches de sol sont également déterminés. À chaque fois qu'une concentration manquante empêchait un couplage, nous avons déterminé la valeur moyenne des concentrations disponibles sur la période 2002-2003 et avons utilisé cette moyenne comme valeur de concentration.

Les valeurs chiffrées des flux minéraux annuels sont présentées en **annexe A8**.

Une représentation en histogrammes des flux annuels de calcium, magnésium, potassium et sodium, où les flux d'entrée sont symbolisés par une ordonnée positive et les flux de sortie par une ordonnée négative, est réalisée pour les sites de *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*, en 2002 et 2003. Les entrées concernent la pluie incidente, les pluviollessivats, l'écoulement le long des troncs et les solutions de litière ; les sorties concernent les drainages à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur (**figure 57**).

I- Dépôts hors couvert, sous le couvert et flux de litière

Un apport en éléments minéraux plus élevé dans les solutions de litière que dans les dépôts atmosphériques (Pi, Pl^{vats}, Ec) est généralement constaté. Les exceptions concernent 1) le sodium dont le dépôt par pluie incidente est supérieur pour *Hesse36ans* en 2002 et pour *Fou30ans* en 2002 et 2003 et 2) le potassium dont le dépôt par pluviollessivats est supérieur pour *Fou150ans*, en 2002.

Les pluies au-dessus des deux sites de trente ans déposent davantage de Ca, Mg, et Na que les pluies sous couvert (Pl^{vats}) ; les dépôts de K sont en revanche supérieurs sous couvert.

Le dépôt de calcium au-dessus du couvert (Pi) varie de 8.5 à 10.2 kg/ha/an, pour les deux sites de trente ans ; le dépôt sous couvert (Pl^{vats}, Ec) est moins important. Ces résultats diffèrent de ceux du sous-réseau CATAENAT où les dépôts annuels des pluviollessivats sont supérieurs aux dépôts de pluie incidente pour une très grosse majorité des peuplements ; une exception concerne, par exemple, le peuplement *HET30*, en 1994 et 1996. Ils diffèrent également de ceux de Marques (1996) qui raisonne sur l'apport additionnel des pluviollessivats et des écoulements le long des troncs.

Les apports de magnésium, compris entre 1.1 et 2.1 kg/ha/an, au dessus du couvert (Pi) de *Hesse36ans* sont inférieurs à la fourchette des valeurs, 4.4 et 5.1 kg/ha/an, de *Fou30ans*. Les pluviollessivats paraissent moins chargés que la pluie incidente, exception faite de *Hesse36ans* en 2003 ; ce constat diffère encore des augmentations sous forêt observées par le sous-réseau CATAENAT (2.5 fois en moyenne) et par Marques (1996).

Le flux de sodium (Pi, Pl^{vats}, Ec, litière) est plus élevé pour *Fou30ans* que pour *Hesse36ans* (comme celui non représenté des chlorures, voir **annexe A8**). À l'exception du cas de *Hesse36ans* en 2003, les dépôts de sodium charriés par la pluie incidente sont plus importants que de ceux de calcium, magnésium et potassium.

La fourchette des apports de pluie incidente en potassium est supérieure pour *Fou30ans*, 9.1 et 9.3, que pour *Hesse36ans*, 5.2 et 3.4 kg/ha/an. Les apports de potassium sont non seulement plus importants dans les pluviollessivats que les pluies incidentes mais l'écoulement le long des troncs en fournit aussi d'importantes quantités. Cette fois, les résultats reproduisent ceux de Marques (2002).



Une représentation graphique en secteur visualise les flux relatifs annuels de calcium, magnésium, potassium et sodium de chacun des sites en 2002 et 2003 : chaque flux annuel de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium est rapporté à la somme de ces quatre flux, pour les pluies incidentes, les pluviollessivats, les écoulements le long des troncs et les percolats de litière, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans* (**Figure 58**).



On a également réalisé une représentation en secteur qui visualise les flux relatifs annuels de N-NO₃ et de N-NH₄, en 2002 et 2003 : le flux annuel de N-NO₃ et le flux annuel de N-NH₄ est rapporté à la somme des flux de N-NO₃ et N-NH₄, pour la pluie incidentes, les pluviollessivats, les écoulements le long des troncs et les percolats de litière, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans* (**Figure 59**).



Figure 58 : proportion relative du flux de calcium, du flux de magnésium, du flux de potassium et du flux de sodium établie, en rapportant chacun de ces flux annuels sur la somme des quatre. Ces calculs ont été réalisés pour la pluie incidente, les pluviollessivats, les écoulement le long des troncs et la solution de litière, en montrant pour les trois sites d'étude les années 2002 et 2003.

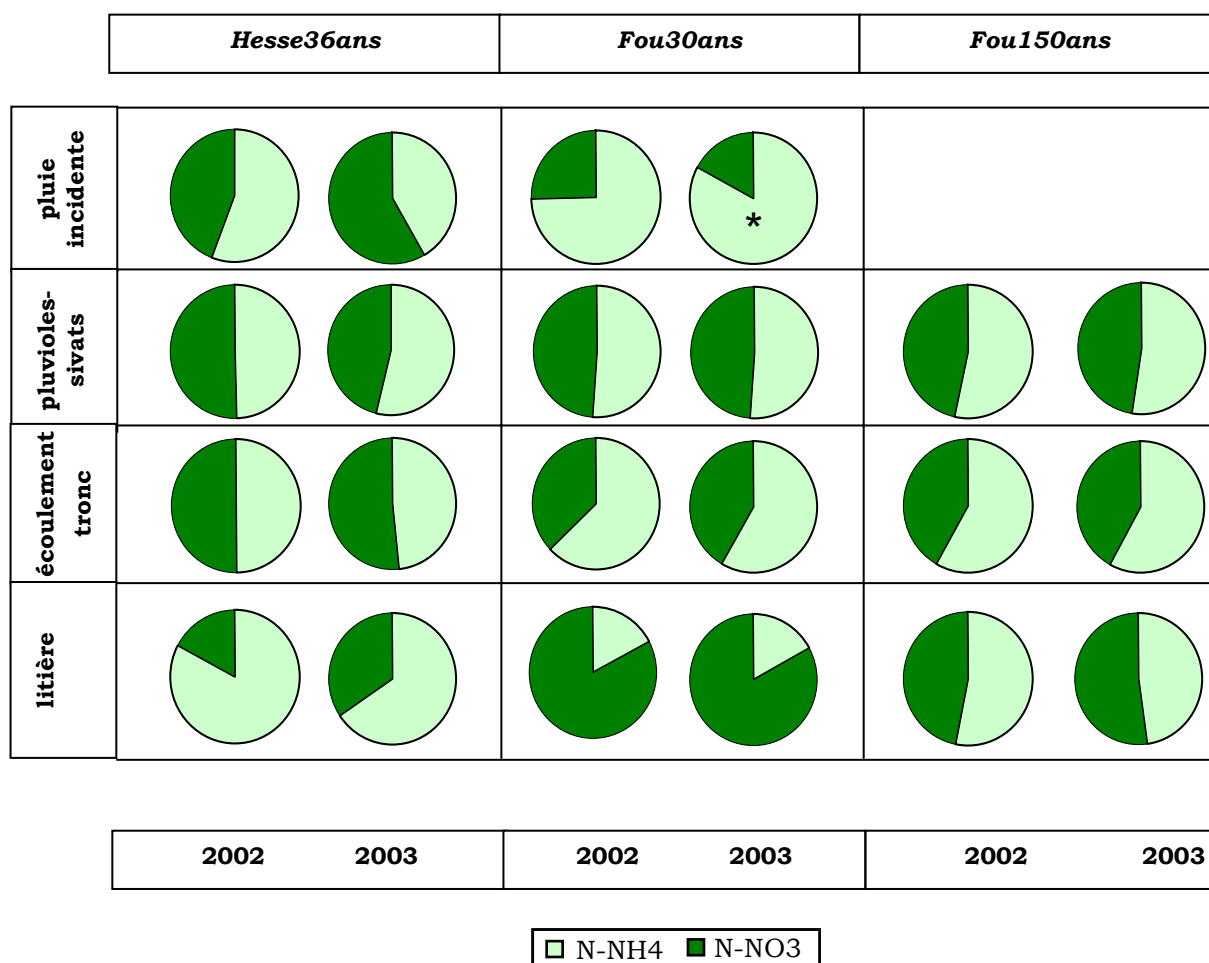


Figure 59 : proportion relative du flux de N-NH4 et du flux de N- NO3, établie en rapportant le flux annuel de chacun des composés azotés sur la somme des deux. Ces calculs ont été réalisés pour la pluie incidente, les pluiolessivats, les écoulements le long des troncs et la solution de litière, en montrant pour les trois sites d'étude les années 2002 et 2003.



* En 2003, on a réalisé pour la pluie incidente du site *Fou30ans*, une seconde représentation, en remplaçant les concentrations mesurées de N-NH4 pendant les périodes n°25 et n°26 par des valeurs estimées, voir ci-contre.

Pour un type de solution déterminé et un site d'étude donné, on peut comparer la composition chimique de 2002 avec celle de 2003, en établissant l'écart des proportions de 2002 et 2003. On rapporte les deux plus élevés d'entre eux et un résumé rapide des autres solutions complète le tour d'horizon :

✓ Pour le calcium, les deux écarts les plus grands que nous observons concernent la pluie incidente de *Hesse36ans* (13%), la solution de litière de *Hesse36ans* (5%). Pour les solutions de tronc ainsi que pour les pluiolessivats, les écarts, tous sites confondus, varient de 0% à 4% (**figure 58**).

✓ Pour le sodium, les deux écarts les plus grands que nous observons concernent la pluie incidente de *Hesse36ans* (17%) et la pluie incidente de *Fou30ans* (14%). Pour les pluviollessivats, l'écoulement le long du tronc et les solutions de litière, les écarts, tous sites confondus, varient de 1% à 10% (**figure 58**).

✓ Pour le potassium, les deux écarts les plus grands que nous observons concernent les écoulements le long des troncs de *Fou30ans* (12%), les solutions de litière de *Fou150ans* (8%). Pour la pluie incidente et les pluviollessivats, les écarts, tous sites confondus, varient de 1% à 6% (**figure 58**).

✓ Pour le N-NH4 en 2002 et 2003, les deux écarts les plus grands que nous observons concernent les solutions de litière de *Hesse36ans* (17%) et la pluie incidente de *Hesse36ans* (14%). Pour les solutions de tronc ainsi que pour les pluviollessivats, les écarts, tous sites confondus, varient de 0% à 5% (**figure 59**).

Entre 2002 et 2003, les plus fortes différences de composition relative mises en évidence concernent donc la litière et la pluie incidente.

NB : nous venons d'établir les comparaisons en utilisant les valeurs de N-NH4 mesurées au-dessus du couvert de *Fou30ans*, pour les périodes n°25 et n°26, en 2003. Or, le suivi du dépôt d'azote, que nous représentons en cumulant les composés azotés N-NH4 et N-NO3, indique que le dépôt a doublé entre 2002 et 2003 ! Alors que la substitution par une valeur estimée pour les périodes n°25 et n°26, amènerait le dépôt de 2003 à ressembler à celui de 2002 (**figure 60**).

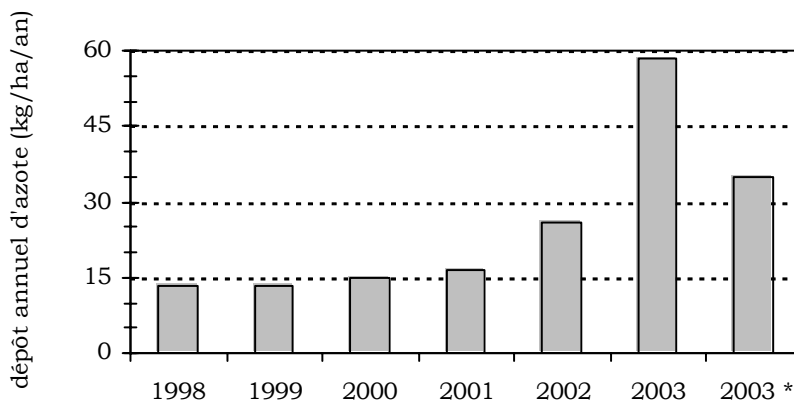


Figure 60 : Évolution du dépôt cumulant les composés azotés N-NH4 et N-NO3, au-dessus du couvert du *Fou30ans*, établi par des collectes mensuelles de 1998 à 2003. * Le dépôt annuel établi à partir d'une valeur estimée pour les périodes n° 25 et n°26 est indiqué.

II- Drainage d'éléments dans le sol



Une représentation en secteur visualise les flux relatifs annuels de calcium, magnésium, potassium et sodium de chacun des sites en 2002 et 2003 : le flux annuel de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium est rapporté à la somme de ces quatre flux, à 10 cm, 30 cm, 55 cm, 80 cm et 120 cm de profondeur, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans* (**figure 61**).

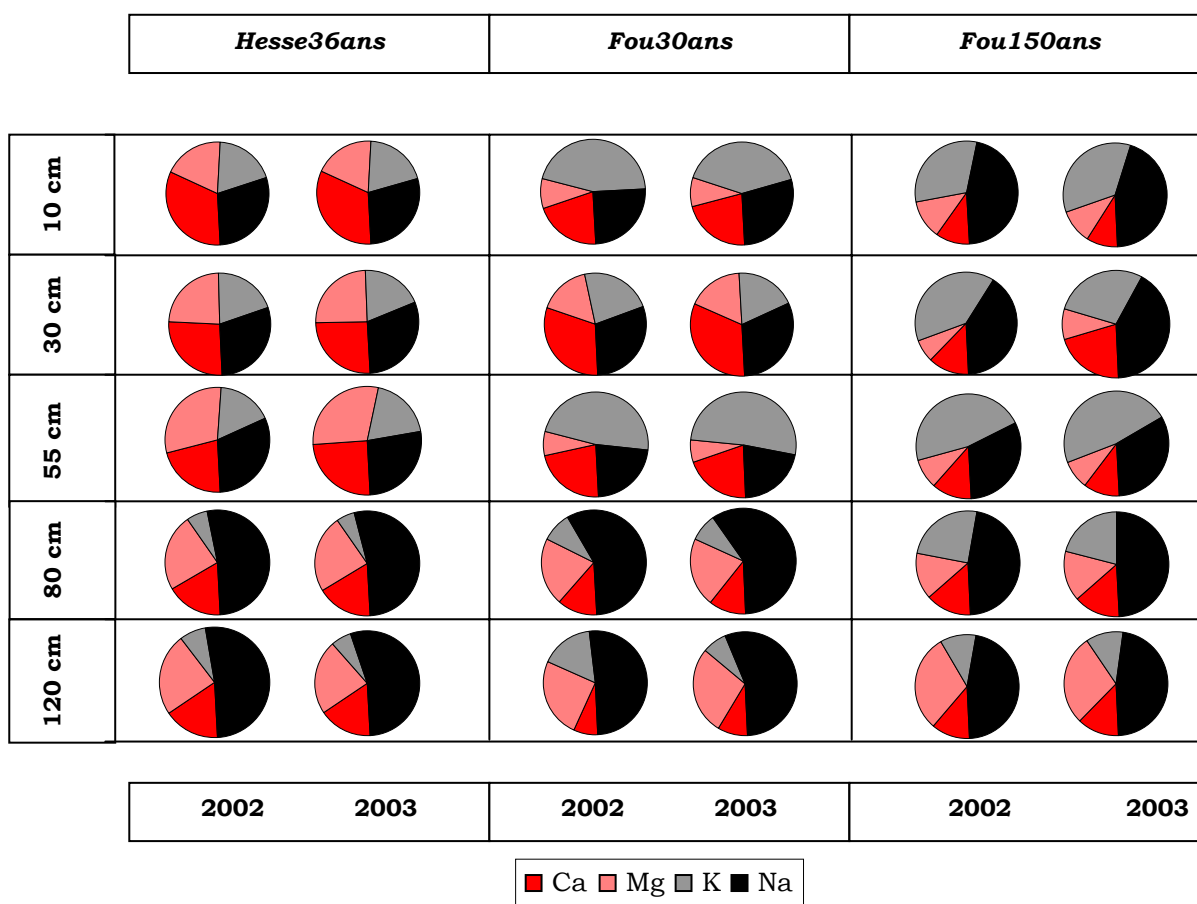


Figure 61 : Proportion relative du flux annuel de calcium, du flux annuel de magnésium, du flux annuel de potassium et du flux annuel de sodium établies par rapport à la somme des quatre flux annuels, en distinguant les années, les profondeurs et les sites.

Au sein de la même profondeur de tranche du sol et pour un site d'étude donné, on peut apprécier la variation inter-annuelle en établissant l'écart entre les proportions de 2002 et 2003. On rapporte les deux plus élevés d'entre eux :

- ✓ Pour le calcium, les deux écarts les plus grands que nous observons concernent *Fou150ans* à 30cm de profondeur (8%) puis *Hesse36ans* à 55 cm de profondeur (3%).
- ✓ Pour le sodium, les deux écarts les plus grands que nous observons concernent *Hesse36ans* à 55 cm de profondeur (4%) et *Fou30ans* à 10 cm, ou 120 cm de profondeur (4%).
- ✓ Pour le potassium, les deux écarts les plus grands que nous observons concernent *Fou150ans* à 30cm de profondeur (11%) et *Fou30ans* à 120cm de profondeur (9%).
- ✓ Pour le magnésium, les deux écarts les plus grands que nous observons concernent *Fou30ans* à 120cm de profondeur (3%) et *Fou150ans* à 10 cm, ou 30 cm, ou 120cm de profondeur (2%).

Pour chacun des sites, une similitude inter-annuelle des proportions relatives de Ca, Mg, K et Na apparaît au sein de chaque tranche de sol.

Les tranches de sol de 10 à 55 cm, d'une part, et de 80 à 120 cm, d'autre part, semblent assez homogènes entre-elles. Afin d'apprécier la variation intra-site de ces deux groupes, on peut présenter séparément les proportions du premier et du second groupe, sans tenir compte de l'année.

Pour le groupe des tranches de 10 à 55 cm de profondeur, une fourchette des proportions est donnée par élément et par site :

- ✓ Pour le calcium, nous observons les proportions
 - * de 22 à 33%, pour *Hesse36ans*, de 20 à 33% pour *Fou30ans*, de 10 à 21 % pour *Fou150ans*.
- ✓ Pour le sodium, nous observons les proportions
 - * de 27 à 31%, pour *Hesse36ans*, de 21 à 31% pour *Fou30ans*, de 31 à 46 % pour *Fou150ans*.
- ✓ Pour le potassium, nous observons les proportions
 - * de 17 à 20%, pour *Hesse36ans*, de 19 à 52% pour *Fou30ans*, de 31 à 48 % pour *Fou150ans*.
- ✓ Pour le magnésium, nous observons les proportions
 - * de 19 à 30%, pour *Hesse36ans*, de 9 à 17% pour *Fou30ans*, de 7 à 12 % pour *Fou150ans*.

Pour le groupe des tranches de 80 à 120 cm de profondeur, une fourchette des proportions est donnée par élément et par site :

- ✓ Pour le calcium, nous observons les proportions
 - * de 16 à 17%, pour *Hesse36ans*, de 7 à 12% pour *Fou30ans*, de 12 à 14% pour *Fou150ans*.
- ✓ Pour le sodium, nous observons les proportions
 - * de 52 à 54%, pour *Hesse36ans*, de 51 à 59% pour *Fou30ans*, de 46 à 49% pour *Fou150ans*.
- ✓ Pour le potassium, nous observons les proportions
 - * de 6 à 8%, pour *Hesse36ans*, de 8 à 17% pour *Fou30ans*, de 11 à 25% pour *Fou150ans*.
- ✓ Pour le magnésium, nous observons les proportions
 - * de 23 à 24%, pour *Hesse36ans*, de 21 à 28% pour *Fou30ans*, de 15 à 31% pour *Fou150ans*.

Globalement, lors des deux années de suivi, les fourchettes de proportion établies sur les sols de 80 à 120 cm présentent des amplitudes de variations plus faibles que celles des sols de 30 à 55 cm de profondeur. Une certaine homogénéité entre les sites apparaît même, pour les grandes profondeurs.

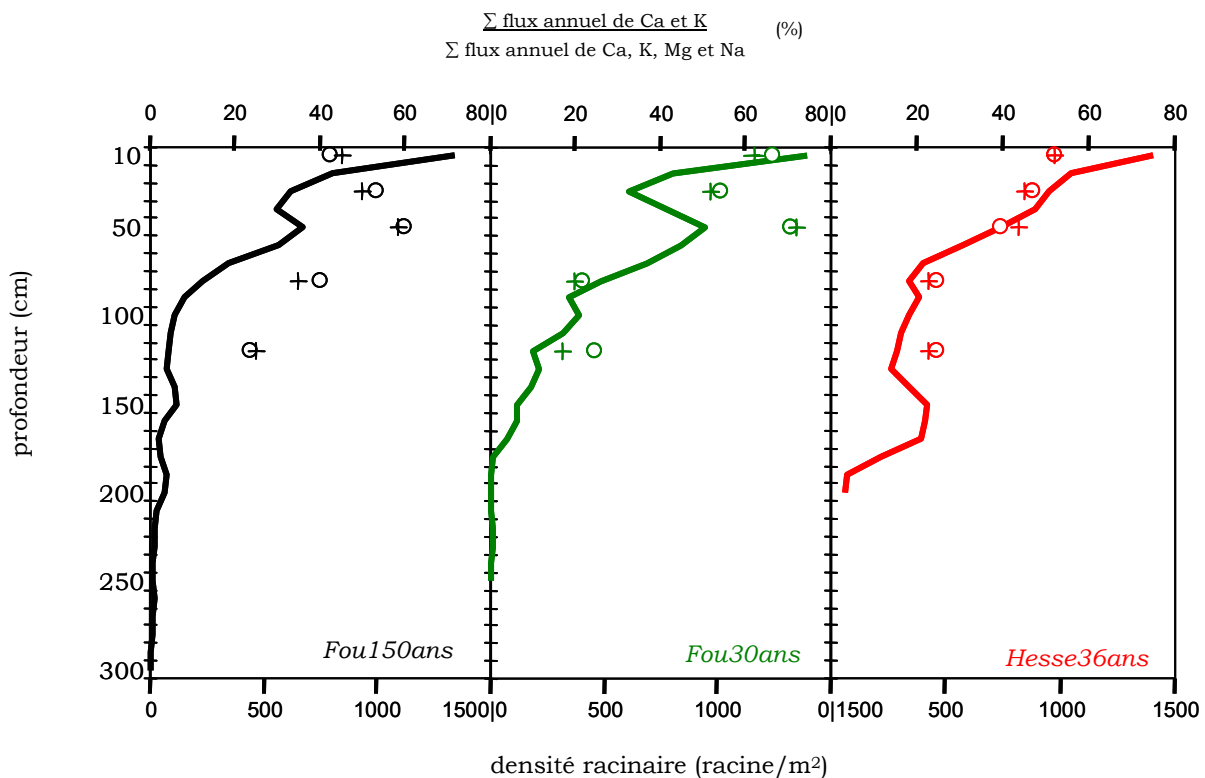


Figure 62 : Comparaison du profil de densité racinaire (trait) avec la somme des flux annuels de calcium + potassium, rapportée à la somme des flux annuels de calcium + potassium + magnésium + sodium. Les flux établis en 2002 (cercle) et 2003 (croix) aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120 cm, sont distingués pour chacun des sites, *Fou150ans*, *Fou30ans* et *Hesse36ans*.

Globalement, le sodium est un élément présent en très forte proportion dans toutes les solutions.

Pour *Fou150ans* et *Fou30ans*, les flux additionnels de sodium et potassium sont supérieurs aux flux additionnels de calcium et magnésium.

Aux profondeurs de 80 et 120 cm, le flux de sodium des trois sites est proportionnellement le plus important.

Pour les deux sites de Fougères, on observe que les proportions de potassium, 47 à 52 %, sont étonnamment élevées à 55 cm de profondeur ; les proportions de calcium et magnésium sont alors assez voisines de celles rencontrées à la profondeur de 10 cm.

III - Relation avec l'enracinement

1- Analyse des éléments calcium, magnésium, potassium et sodium

Dans un premier temps, pour chaque profondeur de sol, 10 cm, 30 cm, 55 cm, 80 cm et 120 cm, le cumul de deux flux est effectué. Les flux concernés sont le calcium et le potassium. Rapporté à la somme des flux de calcium, magnésium, potassium et sodium observés à la même profondeur, on exprime le cumul par un pourcentage.

Afin de comparer la prospection des racines fines (<3mm) et les flux, nous représentons les flux relatifs déterminés en 2002 et 2003 et les densités racinaires, par des profils, pour chaque site. Une évolution parallèle apparaît entre la densité racinaire et le flux cumulé de calcium et potassium de 2002 et 2003 (**figure 62**).

Dans le même esprit, le flux relatif de calcium est établi après avoir été rapporté à la somme des flux de calcium, magnésium, potassium et sodium. Un profil permet de représenter l'évolution du flux, en même temps que les densités de racine, avec la profondeur.

On représente de la même manière l'évolution relative du flux de magnésium, de potassium et de sodium.

Les représentations graphiques, qui concernent le même site, figurent sur une même ligne et chacun des graphiques comporte le profil de flux établi pour 2002 et 2003 (**figure 63**).

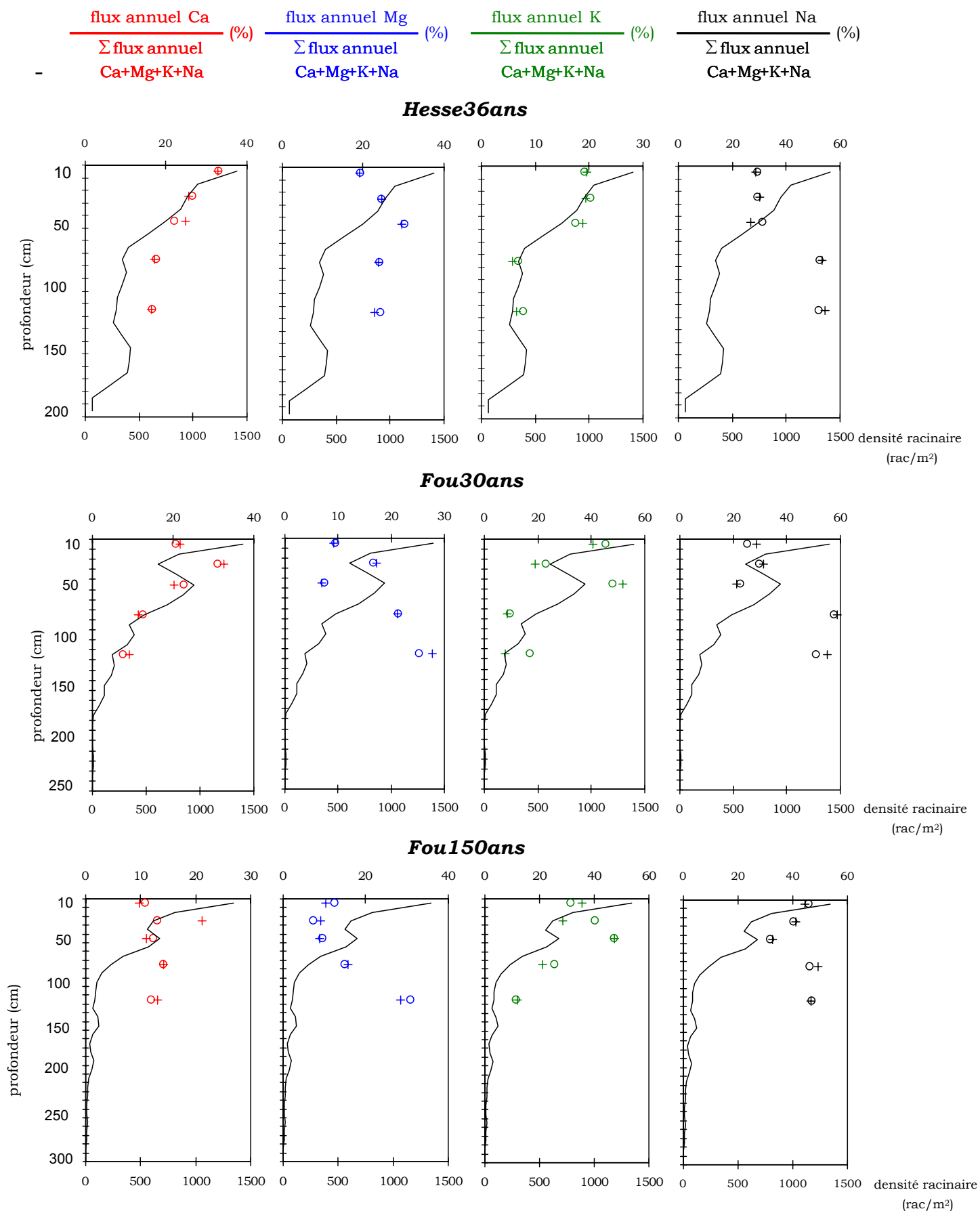


Figure 63 : Comparaison du profil de densité de racines fines (trait noir) avec le rapport entre le flux annuel d'un élément sur la somme des flux annuels (calcium + potassium + magnésium + sodium). Les rapports sont successivement établis avec au numérateur le flux annuel de calcium (rouge), de magnésium (bleu), de potassium (vert) et de sodium (noir), pour 2002 (cercle) et 2003 (croix), aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120cm, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans* (du haut vers le bas).

Il apparaît alors :

- Que la distribution des flux de calcium avec la profondeur n'évoluent pas comme le profil des racines pour le site *Fou150ans*,
- cependant, nous observons qu'en général, les distributions des flux de calcium et de potassium suivent l'évolution des densités de racines.

On peut supposer que le développement du système racinaire est lié à la composition chimique des eaux drainées.

- Que pour les sites *Fou30ans* et *Fou150ans*, le magnésium apparaît relativement plus élevé dans les tranches de sol situées à 80 et 120 cm de profondeur, qu'en surface. De plus, à ces profondeurs, les pourcentages de magnésium sont supérieurs aux pourcentages de calcium ; or, le complexe d'échange est caractérisé par une garniture riche en magnésium, à partir de 122.5 cm de profondeur (cf. p.22).

On peut supposer que la recharge du complexe absorbant se réalise par des échanges entre les solutions et la phase solide et reflète la disponibilité des éléments.

- Que pour tous les sites, le sodium est plus élevé dans les tranches de sol situées à 80 et 120 cm de profondeur, qu'en surface. À 120 cm de profondeur, le flux drainé est composé de 47 à 55 % de sodium, selon le site.

On peut supposer que cet élément traverse le système atmosphère-sol.

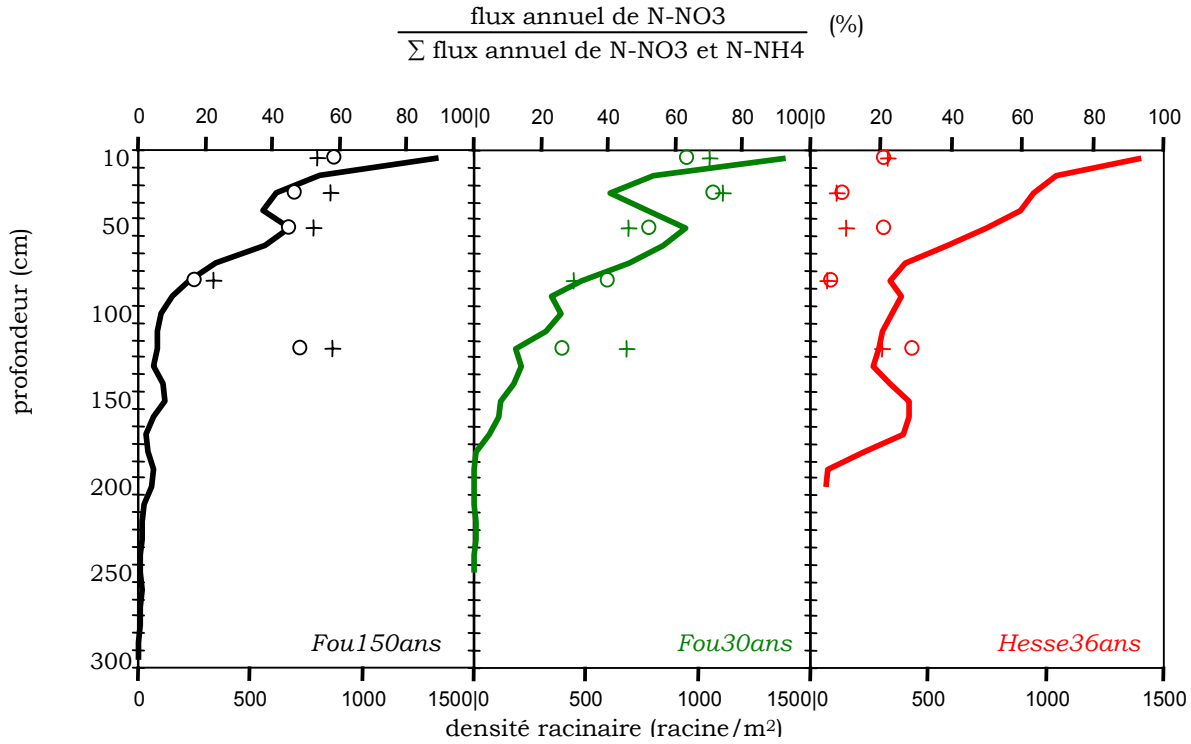


Figure 64 : Comparaison du profil de densité racinaire (trait) avec le rapport établi entre le flux annuel de N-NO₃ sur la somme des flux annuels de N-NO₃ et N-NH₄. Les flux établis en 2002 (cercle) et 2003 (croix) aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120cm, sont distingués pour chacun des sites, *Fou150ans*, *Fou30ans* et *Hesse36ans*.

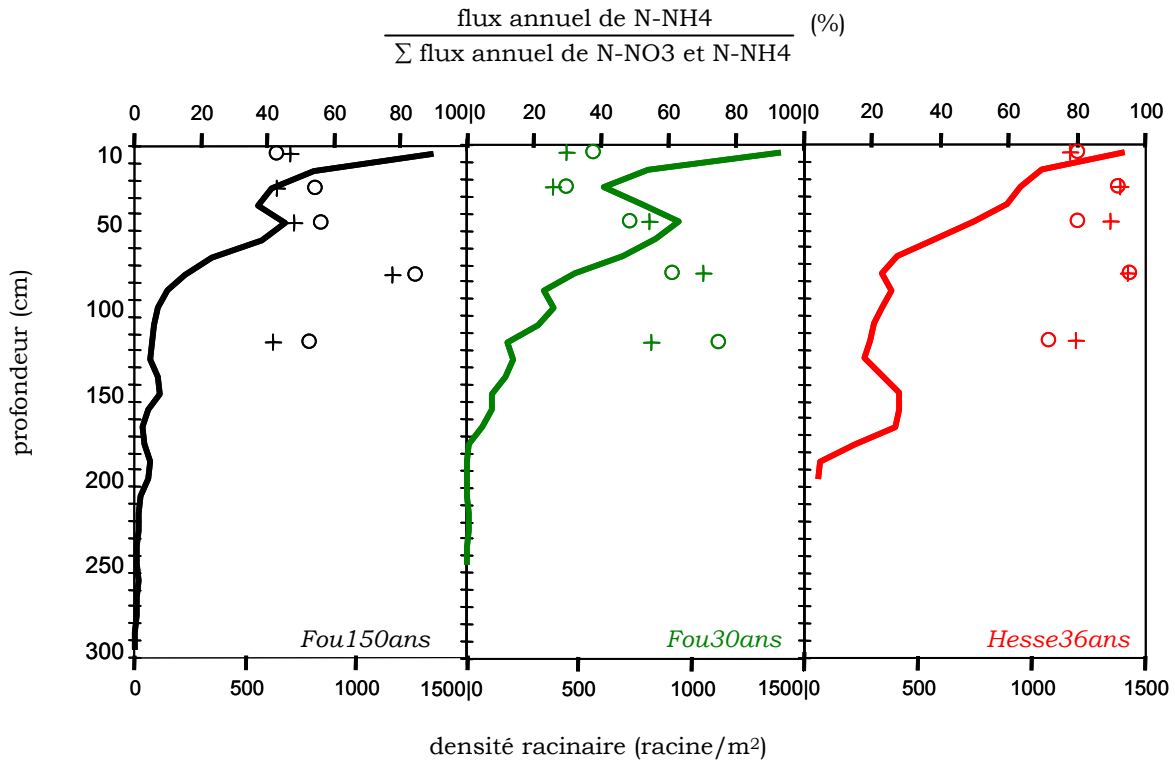


Figure 65 : Comparaison du profil de densité racinaire (trait) avec le rapport établi entre le flux annuel de N-NH₄ sur la somme des flux annuels de N-NO₃ et N-NH₄. Les flux établis en 2002 (cercle) et 2003 (croix) aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120cm, sont distingués pour chacun des sites, *Fou150ans*, *Fou30ans* et *Hesse36ans*

2 - Analyse des N-NH₄ et N-NO₃

Enfin, on a représenté le flux de N-NO₃ par rapport à la somme des flux de N-NO₃ et N-NH₄ (**figure 64**) et le flux de N-NH₄ par rapport à la même somme (**figure 65**).

- Pour Hesse, le profil racinaire est franchement différent de l'évolution dans le sol des composés azotés NO₃ ou NH₄. Quelle que soit la profondeur on observe que l'azote inorganique provient principalement du composé NH₄ (85% en moyenne) (**figure 65**), qui en réalité correspond à un flux faible de 2.7 kg/ha/an (**annexe A8**).

Pour *Hesse36ans*, on peut supposer que l'azote se minéralise essentiellement au niveau de la litière.

D'ailleurs, l'approche indépendante basée, d'une part, sur la biomasse foliaire du site de *Hesse36ans* (397.9 g/m² en 2002 et 380.9 g/m² en 2003, Granier A., *comm. pers.*) et d'autre part, sur une appréciation d'azote à 1% par gramme de litière (Zeller B, *comm. pers.*) permet d'estimer que les entrées d'azote sont de 39.8 kg/ha/an en 2002 et de 38.1 kg/ha/an en 2003.

C'est-à-dire que, *grosso modo*, elles sont de l'ordre de grandeur des flux observés pour *Hesse36ans*, au niveau de la litière, qui sont en additionnant les composés NH₄ et NO₃ : 55.5 kg/ha/an en 2002 et 37.6 kg/ha/an en 2003 (**annexe A8**).

- Pour *Fou30ans* et *Fou150ans*, une analogie apparaît entre le profil racinaire et les profils de flux relatifs : les flux d'azote du composé NO₃ diminuent en parallèle avec la diminution racinaire jusqu'à 80 cm de profondeur (**figure 64**).

En moyenne, le flux relatif du composé azoté NO₃, établi sur les deux sites et les deux années en incluant les tranches de sol de 10 à 55 cm de profondeur, est de 57.3% ; il montre que l'azote inorganique provient plus du composé NO₃ que du composé NH₄. En-dessous de 55 cm de profondeur, on observe une diminution des flux d'azote des composés NO₃ et NH₄ (**annexe A8**).

Pour *Fou30ans* et *Fou150ans*, des flux d'azote importants s'observent encore à 30 cm et 55 cm de profondeur :

→ En additionnant les composés azotés, NH₄ et NO₃, et en établissant une moyenne sur les deux années, les flux d'azote sont : *i*) de 44.3 kg/ha/an pour *Fou30ans* et 20.8 kg/ha/an pour *Fou150ans*, à trente centimètres de profondeur et *ii*) de 47.9 kg/ha/an pour *Fou30ans* et 19.2 kg/ha/an pour *Fou150ans*, à cinquante cinq centimètres de profondeur (**annexe A8**).

→ Une énorme différence est cette fois établie entre d'une part, les sites de Fougères et d'autre part, le site de Hesse où le flux d'azote est de : *i*) 3.6 kg/ha/an, à trente centimètres de profondeur et *ii*) 1.3 kg/ha/an, à cinquante cinq centimètres de profondeur (**annexe A8**).



*Troisième
partie*



*Discussion
&
Conclusion*

Discussion

Bien que les drainages ne soient pas mesurables expérimentalement, le calcul du bilan est l'application du principe de conservation de l'eau contenue dans un certain volume de sol. Aussi, un bilan hydrique simple consiste à solutionner l'équation [17] où les autres termes de l'équation sont mesurables:

$$\Delta R = P_s - (T + D) \quad (17)$$

Avec : P_s : précipitations au sol

T : transpiration des arbres

D : drainage vertical

ΔR : variation de la réserve en eau entre deux jours successifs.

Nous pouvons confronter les mesures et les simulations lorsqu'il s'agit des transpirations, se remémorer les comparaisons, déjà établies, de pluie au sol. Et, comparer les évolutions des teneurs en eau modélisées et mesurées pour les différentes tranches de sol.

❖ La transpiration

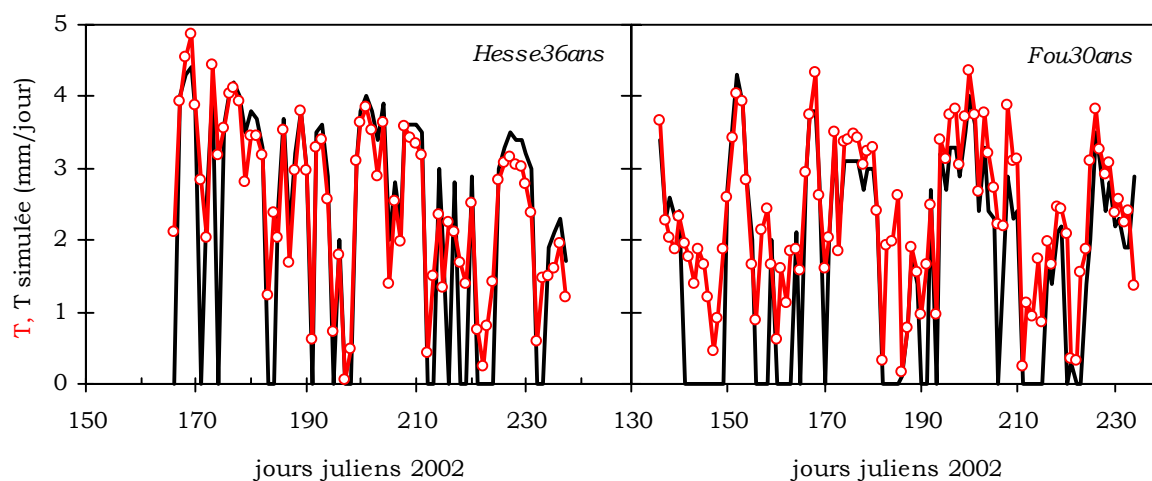


Figure 66 : Transpirations simulées (trait noir) et mesurées (trait avec cercle rouge) à *Hesse36ans* et *Fou30ans*, en 2002.

Un synchronisme apparaît entre les mesures et les simulations de transpiration. On observe toutefois certains décrochages : des flux nuls sont simulés certains jours.

Les simulations réalisées à un pas de temps journalier font perdre la notion de simultanéité des évènements météorologiques, par exemple pluie et rayonnement, et par conséquent de l'interdépendance des variables météorologiques et physiologiques.

En conséquence, dans la modélisation, les procédures de calcul établies au pas de temps journalier (par exemple : si interception $\times 0.2 >$ transpiration, transpiration =0), entraînent ces écarts entre flux modélisés et mesurés.

Seule une modélisation au pas de temps horaire permettrait de prendre en compte la simultanéité entre l'intensité et la durée de l'averse, d'une part, et le rayonnement, d'autre part.

❖ *La pluie au sol*

Pour les pluies au sol, la confrontation modèle et mesures a déjà été présentée (**figures 36 et 37, p. 76-77**). Nous avons établi que le modèle sous-estimait de 9.2 % la pluie au sol pour *Hesse36ans*.

❖ Les humidités dans le sol pour *Hesse36ans*

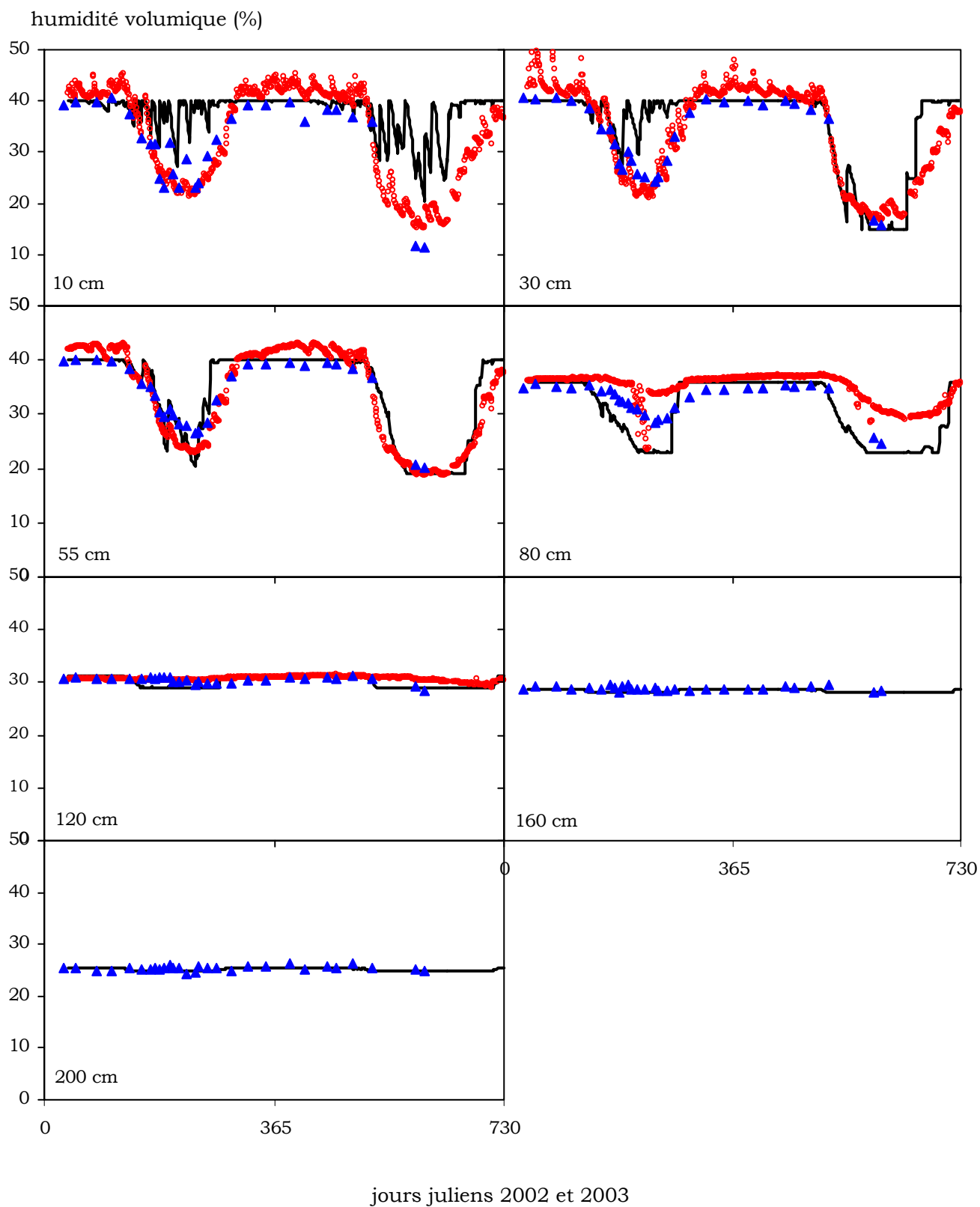


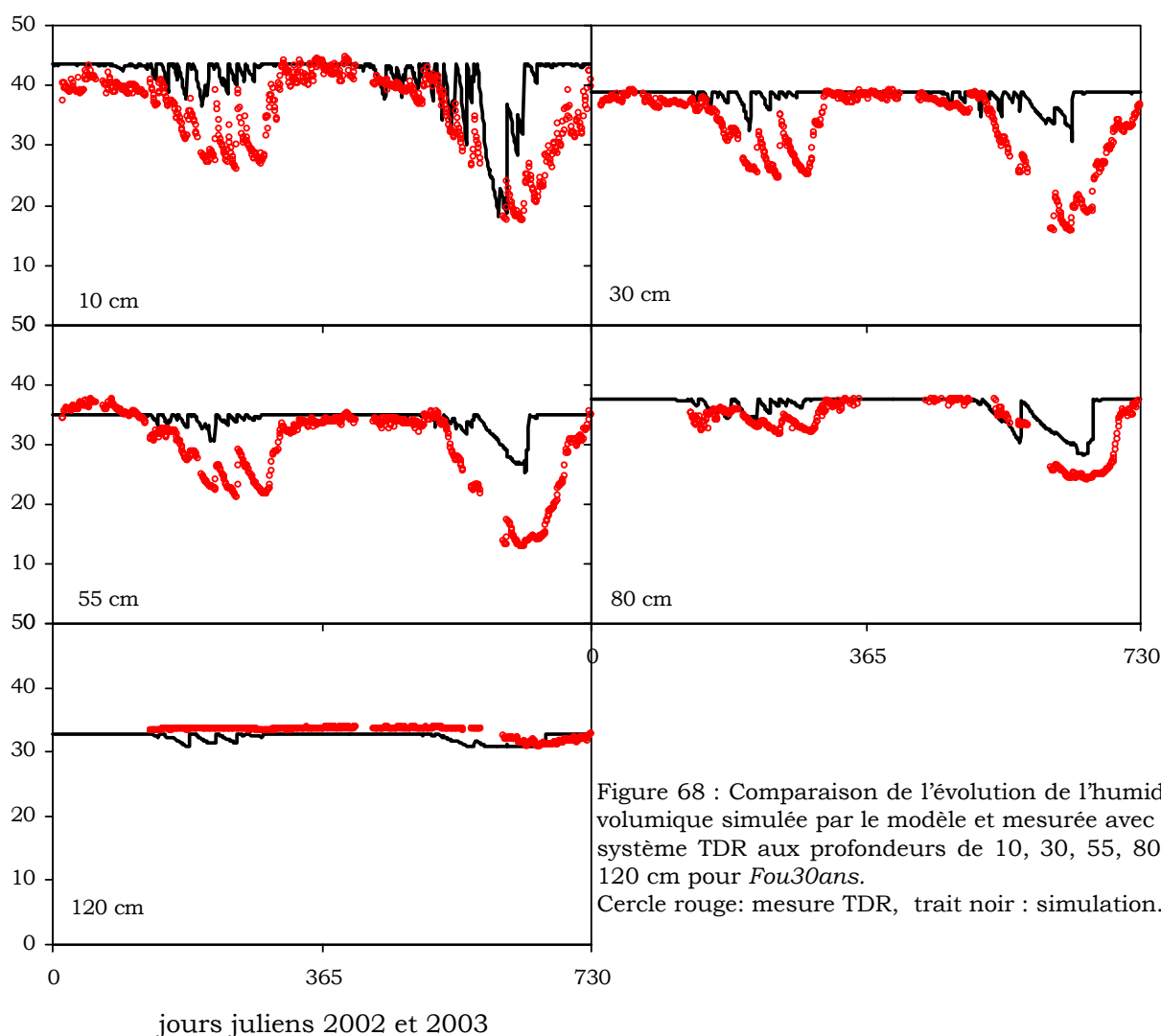
Figure 67 : Comparaison de l'évolution de l'humidité volumique simulée par le modèle, mesurée avec la sonde à neutron aux profondeurs de 10, 30, 55, 80, 120, 160 et 200 cm et mesurée avec un système TDR aux profondeurs de 10, 30, 55, 80, 120 cm pour *Hesse36ans*. Cercle rouge: mesure TDR, triangle bleu : sonde à neutron, trait noir : simulation.

Les comparaisons des teneurs en eau simulées et mesurées sur 2 années paraissent concordantes pour le site *Hesse36ans* (**figure 67**).

La réserve utile établie à partir des mesures *in-situ* à *Hesse36ans* a conduit à des simulations correctes aux différentes profondeurs. Toutefois, pour les quatre tranches supérieures du sol, la réhydratation, après les dessèchements estivaux, est simulée trop brutalement. Et, en périodes hivernales, les mesures journalières réalisées par TDR présentent constamment des oscillations auxquelles le modèle reste insensible. Il est possible que l'apparition d'une nappe temporaire crée un excès d'eau supérieur à la capacité au champ dont le modèle ne rend pas compte. Le comportement du sol proche de la saturation ou complètement saturé reste à améliorer notamment au niveau des calculs de la macroporosité responsable du drainage.

En effet, la macroporosité du modèle est calculée à partir des paramètres ah et bh établis pendant une dessiccation expérimentale. Ces paramètres ne rendent, notamment, pas compte de l'hystérèse ; la fissuration et la compaction du sol en fin d'expérimentation nous ont conduit à abandonner le suivi pendant la réhydratation.

humidité volumique (%)



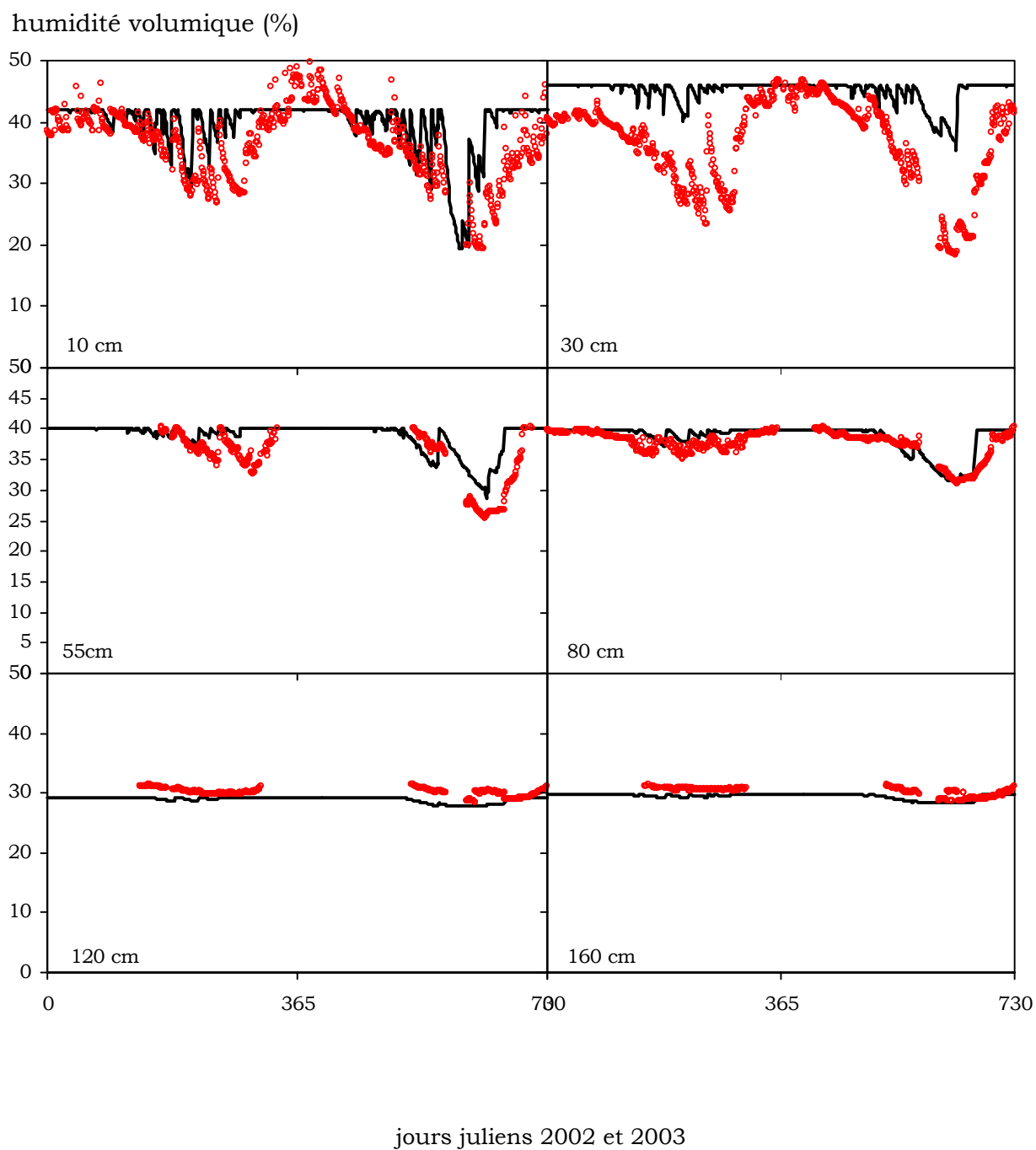


Figure 69 : Comparaison de l'évolution de l'humidité volumique simulée par le modèle et mesurée avec un système TDR aux profondeurs de 10, 30, 55, 80, 120 cm et 160 cm, pour *Fou150ans*. Cercle rouge: mesure TDR, trait noir : simulation.

❖ Les humidités dans le sol pour *Fou30ans* et *Fou150ans*

Les sorties du modèle présentent un biais par rapport aux mesures pour les sites de Fougères. Différentes raisons peuvent concourir à ces biais.

- Pour *Fou150ans*, des diminutions d'humidité du sol sont enregistrées, avant le début de la feuillaison du hêtre et créent un déstockage d'eau.

Nous avons déjà présenté les teneurs en eau, exprimées en fraction relative de la réserve en eau (**figure 29, p. 59**).

La présence de houx pourrait contribuer à vider les tranches du sol en période hivernale. Mais, bien que la taille des individus puisse être importante (voir photo page 11) seule une dizaine d'individus environs sont disséminés sur le site.

Une autre explication possible serait l'impact des captages de la ville de Fougères. Dans l'étude des sites (voir page 9) nous avons notamment établi que 488 mm/an d'eau sont captés par le captage Saint François.

On peut aussi supposer que le déstockage d'eau, avant la saison de végétation, soit lié à une nappe perchée en train de se vider (**figure 29**). Et, que la réserve utile que nous avons estimée par la méthode des paliers soit surestimée.

D'ailleurs, l'expérimentation du suivi du dessèchement des bidons de sol de 7 litres nous laissait entrevoir la possibilité d'une nappe sur les sites. Les humidités volumiques mesurées par le système TDR, sur les bidons supposés saturés (voir p. 68) et représentatifs des profondeurs de 10 cm, 30 cm, 67,5 cm, 140 cm et 240 cm, s'élevaient, au maximum et respectivement, à 40.5 %, 41.9%, 39.0%, 32.5% et 34.9%. Alors que les humidités volumiques enregistrées *in situ* aux profondeurs de 10 cm, 30 cm, 55 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm 200 cm et 250 cm atteignent respectivement 45%, 47.5%, 66.3 %, 68.7%, 60.8 %, 61.7% , 69.8 % et 63.2 % (**figures 70, 71 et 72**). Les humidités volumiques sont fréquemment surestimées par les sondes TDR. Des écoulements préférentiels peuvent être responsables des valeurs élevées mesurées. En effet, des perturbations liées à la mise en place des sondes sont incontournables, malgré toutes les précautions mises en œuvre pour reconstituer le sol, après l'ouverture d'une fosse. Des mesures piézométriques et tensiométriques permettraient de clarifier la situation.

- Pour *Fou30ans*, l'expérimentation du suivi du dessèchement nous a également amené à constater des écarts entre les humidités mesurées sur sol saturés au laboratoire et en forêt mais, plus modérés.

Pour ce site, on peut penser que, la zone de mesure *in situ* n'est éventuellement pas représentative du peuplement, la variabilité spatiale intégrée dans les mesures représente 10 mètres linéaires, au maximum.

Des mesures complémentaires sont incontournables pour, à la fois, progresser dans la compréhension du fonctionnement hydrique des deux sites *Fou30ans* et *Fou150ans* et juger de la pertinence du modèle face aux mesures.

Humidité volumique journalière moyenne (%)

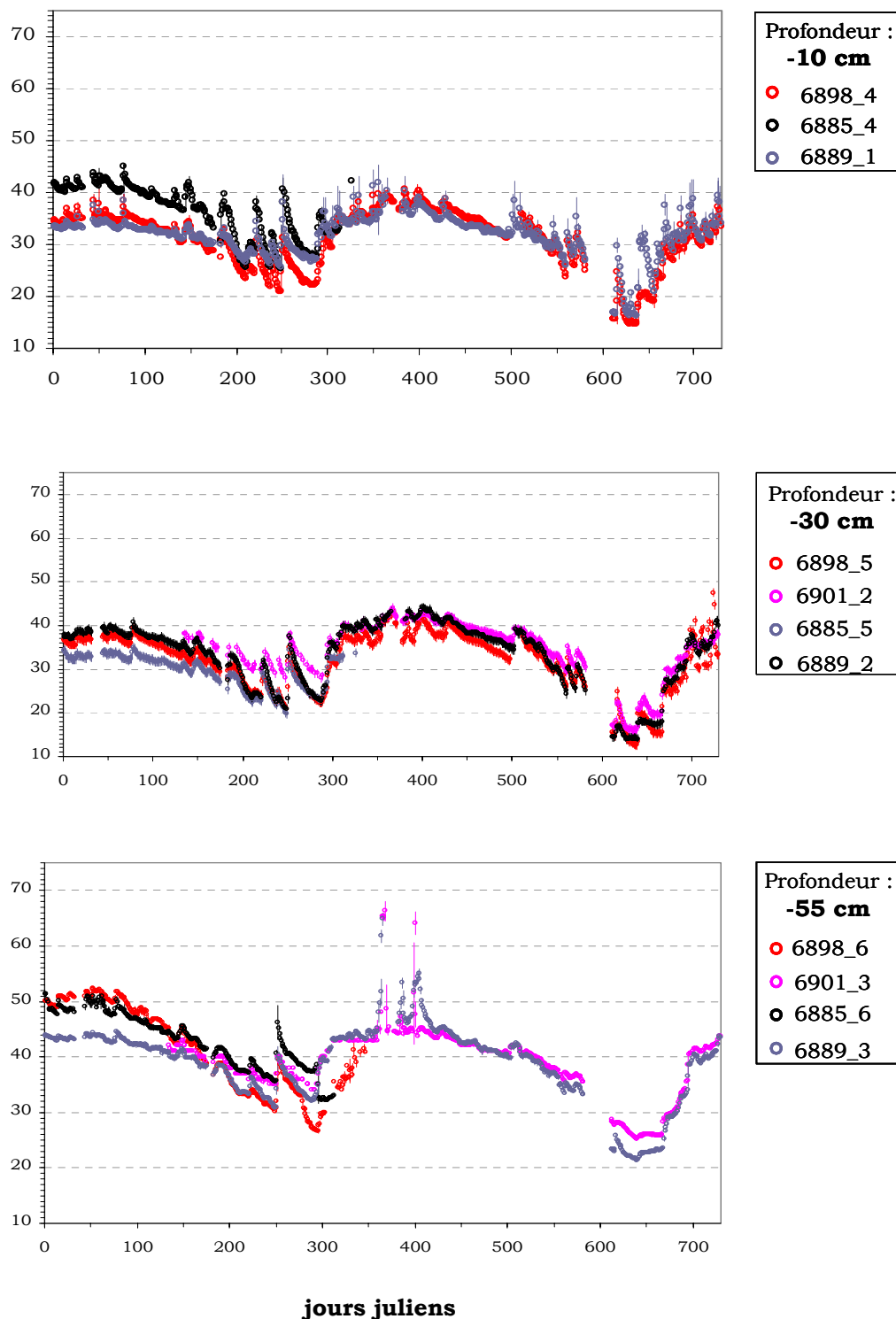


Figure 70 : Humidités volumiques journalières moyennes et écarts-types de chaque sonde TDR située dans le *Fou150ans* à 10, 30 et 55 cm de profondeur pour 2002 et 2003. Les couleurs rouge et rose correspondent à une fosse, les gris et noir à une autre.

Humidité volumique journalière moyenne (%)

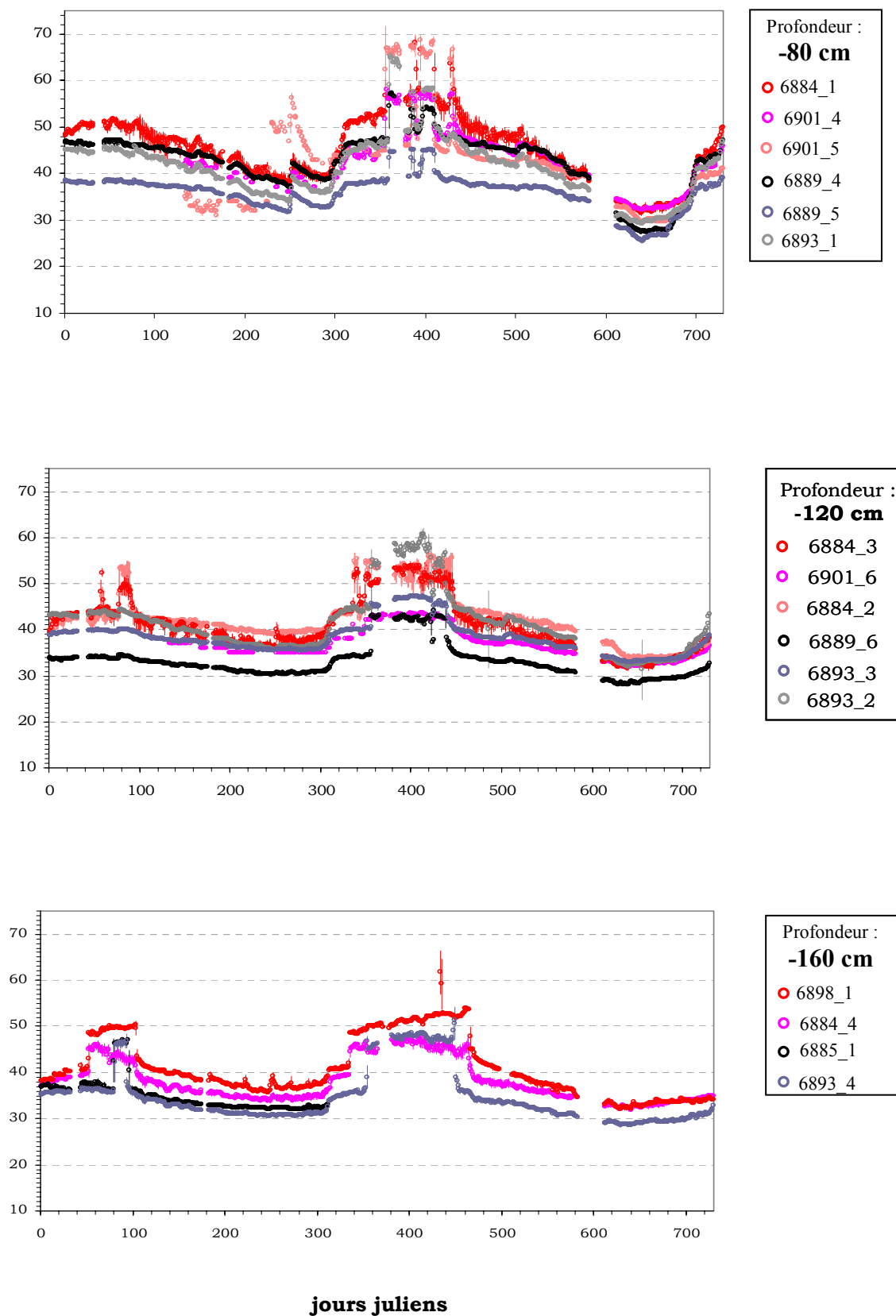


Figure 71 : Humidités volumiques journalières moyennes et écarts-types de chaque sonde TDR située dans le *Fou150ans* à 80, 120 et 160 cm de profondeur pour 2002 et 2003. Les couleurs rouge et rose correspondent à une fosse, les gris et noir à une autre.

Humidité volumique journalière moyenne (%)

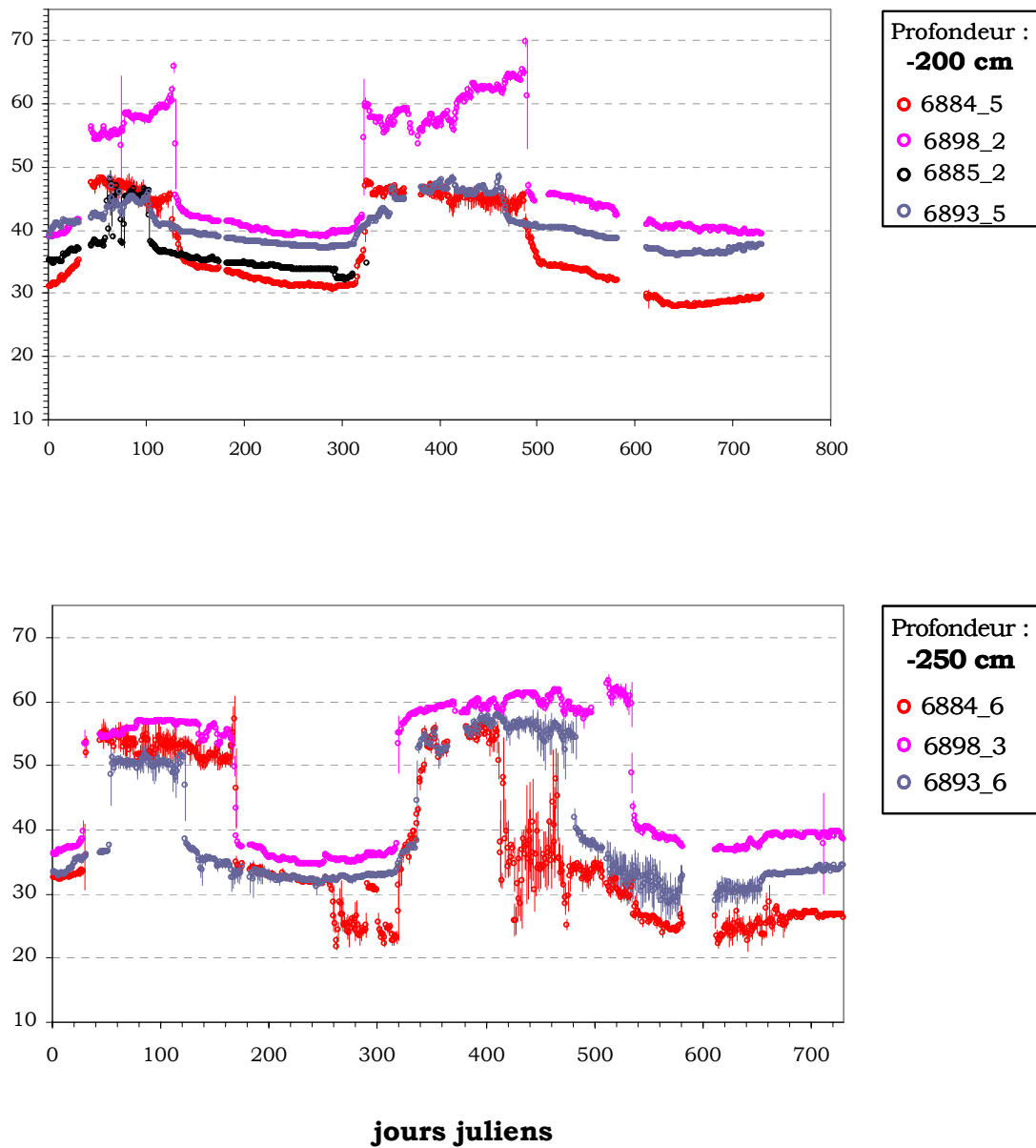


Figure 72 : Humidités volumiques journalières moyennes et écarts-types de chaque sonde TDR située dans le *Fou150ans* à 200 et 250 cm de profondeur pour 2002 et 2003. Les couleurs rouge et rose correspondent à une fosse, les gris et noir à une autre.

Afin de progresser dans les confrontations mesure-modèle, on doit envisager des progressions dans les deux domaines : expérimentation et simulation.

Dans les simulations le paramètre de la capacité au champ est un paramètre difficile à estimer. Une détermination réalisée sur motte au laboratoire n'est pas représentative du terrain puisque selon les tailles des échantillons, différentes échelles de macroporosités du terrain sont reproduites.

La mesure des potentiels hydriques dans le sol serait une approche pertinente qui permettrait de suivre l'évolution de la teneur en eau du sol plus précisément lors des conditions d'excès d'eau, qui sont typiquement des conditions de drainage. Ces mesures permettraient d'avancer dans le fonctionnement hydrique de sols saturés, de mieux modéliser leur drainage et de progresser dans la connaissance de l'évolution des nappes perchées.

Dans le domaine des simulations, différentes catégories d'améliorations sont possibles :

Au niveau des paramètres :

- une prise en compte du fait que des extractions d'eau sont réalisées à des potentiels hydriques $\psi_{sol} < -1.6$ Mpa pour les arbres, ce que nous avons mis en évidence pour le hêtre et qui a déjà été mis en évidence pour le chêne (Bréda 1994) et le frêne (Carlier *et al.*, 1992) au moyen des mesures de potentiel de base.

Au niveau des fonctions:

- l'écoulement le long des troncs est fortement sous estimé pour les jeunes hêtres.

Au niveau du modèle :

- le fonctionnement de couverts à plusieurs strates (houx sous couverts de hêtres sur le site de Fougères, par exemple) ;
- les excès d'eau puisque la gestion de la nappe est actuellement non réalisée ;
- le fonctionnement des sols hétérogènes spatialement (glosses, par exemple).

flux minéral (kg/ha/an)	site	pluie incidente		pluiolessivats		écoulement tronc		litière		drainage -10cm		drainage -120cm	
		2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003
Ca	<i>Hesse36ans</i>	10.2	7.6	5.8	5.4	0.7	0.7	37.9	31.3	8.5	4.5	6.1	3.3
	<i>Fou30ans</i>	8.7	8.5	3.4	3.4	1.0	0.5	24.4	19.2	16.2	10.5	4.4	2.8
	<i>Fou150ans</i>			4.4	4.7	0.2	0.2	10.6	9.2	6.0	4.8	3.5	2.5
K	<i>Hesse36ans</i>	5.2	3.4	17.4	14.7	2.9	2.3	58.9	63.2	5.0	2.7	2.8	1.3
	<i>Fou30ans</i>	9.1	9.3	27.2	19.6	8.0	3.0	38.7	37.1	35.6	19.6	9.7	2.5
	<i>Fou150ans</i>			32.0	26.1	2.7	2.7	25.0	30.7	17.5	17.3	3.3	2.2
Mg	<i>Hesse36ans</i>	2.1	1.1	1.6	1.3	0.2	0.1	7.3	6.7	5.0	2.6	8.9	4.6
	<i>Fou30ans</i>	4.4	5.1	2.6	2.3	0.5	0.4	7.2	6.3	7.4	4.4	14.7	8.6
	<i>Fou150ans</i>			3.5	3.2	0.1	0.1	6.7	5.4	6.9	5.1	9.1	5.4
Na	<i>Hesse36ans</i>	13.5	4.4	5.1	4.0	1.1	0.5	11.2	9.6	7.6	4.0	19.2	11.0
	<i>Fou30ans</i>	30.4	18.0	16.0	11.5	4.7	2.9	18.1	17.2	19.7	13.9	29.7	17.0
	<i>Fou150ans</i>			23.4	19.4	1.5	1.4	26.8	24.9	25.7	21.6	13.8	8.9
N (N-NH4 + N-NO3)	<i>Hesse36ans</i>	13.9	7.5	9.1	7.0	1.6	1.5	55.5	37.6	3.0	1.7	1.2	1.3
	<i>Fou30ans</i>	25.8	58.3	8.5	8.0	4.2	1.5	35.4	31.4	31.9	18.2	0.8	0.5
	<i>Fou150ans</i>			8.5	11.2	0.5	0.8	8.3	10.6	5.3	4.3	2.7	1.3

Tableau 16: Synthèse des principaux flux minéraux établis aux cours de cette étude

flux d'eau (mm)	site	pluie incidente		pluie au sol		écoulement tronc		transpiration		ETR		ETP		drainage profond	
		2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003
	<i>Hesse36ans</i>	1157	661	974	533	140	88	295	281	502	430	694	644	655	230
	<i>Fou30ans</i>	1119	781	980	682	208	121	251	230	405	427	575	469	715	354
	<i>Fou150ans</i>	1119	781	989	679	25	26	215	234	404	408	483	488	713	370

Tableau 17: Synthèse des principaux flux hydriques établis aux cours de cette étude (ETP=Penman-Monteith)

Quels sont les facteurs à prendre en compte pour interpréter la variabilité des flux ?

- Les flux minéraux de pluie incidente et de pluie sous couvert sont différents des situations habituellement citées. Dans notre étude, les pluies apportent plus de calcium, de magnésium, de sodium et d'azote que les pluviolessivats (**tableau 16**). Ces résultats diffèrent des données trouvées dans la littérature en général (**tableaux 18 a et b**) même lorsque les sites d'études étaient en Bretagne (Forgeard *et al.*, 1980). Laclau (2001) qui disposait, à la fois, de gouttières et de collecteur pyramidal, a déterminé des dépôts de calcium de 17.2 kg/ha/an et 3.4 kg/ha/an respectivement pour ces deux méthodes. On peut se demander si nos mesures reflètent un biais méthodologique ou une absorption foliaire.
- Les différences climatiques entre deux années contrastées influent sur les quantités drainées puisque le flux minéral de 2002 et 2003, à 120 cm de profondeur, est par exemple, pour le calcium à Hesse de 6.1 contre 3.3 kg/ha/an (**tableau 16**). Dans ce flux de drainage minéral, la contribution des différents éléments minéraux est cependant la même, puisque des rapports de flux entre eux (comme celui du calcium sur ceux du calcium, magnésium, potassium et sodium) apparaissent constants pour les deux années d'étude. Le drainage hydrique profond étant fortement différent pour ces deux années, par exemple de 655 mm en 2002 et 230 mm en 2003 pour le site de Hesse (**tableau 17**), sa détermination précise est importante pour établir un flux minéral. La justesse du bilan complet de fertilité minérale de l'écosystème en découle directement.
- Nous avons montré que les propriétés du fonctionnement hydrique de la hêtraie sont intrinsèques. Le flux hydrique prélevé dépend donc uniquement du climat (=forçage) et des différences d'indice foliaire (=structure). Les différences climatiques des sites localisés à Fougères et à Hesse conduisent ainsi à des écarts de transpiration, par exemple 281 mm à Hesse et 230 mm pour *Fou30ans* en 2003 (**tableau 17**). À partir des LAI spécifiques des peuplements d'études, nous avons utilisé notre modèle de bilan hydrique au pas de temps journalier et avons vérifié la pertinence des flux de transpiration (**figure 66**, page 118).
- De par la conception du modèle, les prélèvements des flux par la transpiration sont simulés de façon homogène au sein d'une tranche de sol. Notre approche ne rend pas compte des voies de drainage préférentiel où la densité d'enracinement est plus importante. Les zones plus denses en racines vont être des zones de prélèvement intense, la glosse est typiquement un exemple de drainage préférentiel. Il est important de tenir compte de cette incertitude dans la détermination des flux minéraux ; ceci constitue une des limites de l'approche mise en œuvre.

- Une potentialité de croissance pour la hêtraie de Fougères légèrement supérieure à celle de la hêtraie de Hesse a été démontrée (les accroissements en biomasse sont de 10.1 t Ms/ha/an pour *Fou30ans* et de 9.7 t Ms/ha/an pour *Hesse36ans*) (Peiffer *et al.*, 2005).

111 jours de stress hydrique ont été définis pour *Hesse36ans* contre 58 et 72 jours pour *Fou30ans* et *Fou150ans*, en 2003 (**annexe A7**). L'effet d'une baisse des déficits hydriques sur la croissance d'un peuplement est connue : la productivité augmente. Cette différence de contrainte attribue une fertilité stationnelle meilleure à Fougères.

À Hesse, la fertilité minérale élevée est compensée par des déficits hydriques élevés alors qu'à Fougères, la pauvre fertilité minérale est compensée par un stress hydrique plus modéré. La fertilité de la station est liée à la richesse, à la fois, trophique et hydrique.

Espèce (site-âge)	flux d'eau drainé			pluie (mm/an)	flux minéral (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)					sol	Référence	
	méthodes	profondeur (mm/an)	(mm/an)		classe	Ca	Mg	K	Na			N
<i>Fagus sylvatica</i> (Hesse-36ans)	modèle à	10 cm	627.5	909	pluie	8.9	1.6	4.3	8.9	10.7	néoluvisol	cette étude
	compartiments	30 cm	555.5		pluioless.	5.6	1.5	16.1	4.5	8.1		
	et à flux	55 cm	484.5		Ec.	0.7	0.2	2.6	0.8	1.6		
	(biljou)	80 cm	457.5		litière	34.6	7.0	61.0	10.4	46.6		
		120 cm	449.5		Dr-10 cm	6.5	3.8	3.8	5.8	2.3		
					Dr-30 cm	5.2	4.8	3.9	5.9	3.6		
					Dr-55 cm	5.3	6.9	4.1	6.8	1.3		
					Dr-80 cm	5.9	8.1	2.2	18.0	6.6		
			Dr-120 cm	4.7	6.7	2.1	15.1	1.2				
<i>Fagus sylvatica</i> (Fougères-30ans)	modèle à	10 cm	718.5	950	pluie	8.6	1.6	9.2	24.2	42.1	alocrisol luvisol	cette étude
	compartiments	30 cm	665.0		pluioless.	3.4	2.4	23.4	13.7	8.2		
	et à flux	55 cm	603.0		Ec.	0.7	0.5	5.5	3.8	2.8		
	(biljou)	80 cm	557.5		litière	21.8	6.7	37.9	17.6	33.4		
		120 cm	541.5		Dr-10 cm	13.3	5.9	27.6	16.8	25.0		
					Dr-30 cm	28.1	15.0	19.1	26.8	44.3		
					Dr-55 cm	36.4	12.0	84.3	37.3	47.9		
					Dr-80 cm	7.7	13.8	5.8	37.7	5.5		
			Dr-120 cm	3.6	11.6	6.1	23.4	0.7				
<i>Fagus sylvatica</i> (Fougères-150ans)	modèle à	10 cm	708.0	950	pluioless.	4.6	3.4	29.0	21.4	9.8	alocrisol luvisol	cette étude
	compartiments	30 cm	642.5		Ec.	0.2	0.1	2.7	1.4	0.6		
	et à flux	55 cm	598.0		litière	9.9	6.1	27.8	25.8	9.4		
	(biljou)	80 cm	569.0		Dr-10 cm	5.4	6.0	17.4	23.6	4.8		
		120 cm	559.0		Dr-30 cm	12.4	6.0	26.1	30.3	20.7		
					Dr-55 cm	9.2	7.2	36.9	24.9	19.2		
					Dr-80 cm	4.2	4.5	7.1	14.2	9.6		
					Dr-120 cm	3.0	7.3	2.7	11.4	2.0		
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (chronoséquence 20, 40 et 60 ans valeurs moyennes)	modèle à	15 cm	631	1025	pluie	3.1	0.6	2.0	3.0	8.4	alocrisol typique	Marques et al., 1997
	compartiments	30 cm	539		pluioless.+Ec.	9.1	2.1	18.6	5.3	14.3		
	et à flux	60 cm	394		Dr-15 cm	39.7	9.0	22.7	6.4	67.9		
	(biljou)	120 cm	356		Dr-30 cm	32.2	8.6	21.1	5.8	53.4		
					Dr-60 cm	12.4	5.4	11.8	5.5	23.5		
					Dr-120 cm	14.5	5.8	14.8	8.5	27.1		
<i>Fagus sylvatica</i> (<i>Q. petraea</i>) (Steigerwald, Bavière, Allemagne, 130 ans)	modèle basé sur la loi de Darcy	60 cm	312	691	pluie	2.9	0.4	2.8	3.5	10.8	dystric cambisol	Chang et Matzner, 2000
					pluioless.	7.4	1.9	25.1	3.3	14.5		
					Ec.	0.4	0.1	2.9	0.2	1.0		
					Dr-60 cm	11.9	10.3	3.8	7.5	13.2		
<i>Eucalyptus</i> plantation Congos 6-9ans	modèle basé sur la loi de Darcy	superficiel 100 cm 300 cm 600 cm	1394 890 488 335	1518	pluie	17.2	1.5	2.8	7.5	4.9	ferralic arenosols	Laclau, 2001
					app. atmosph.	7.8	3.4	6.6	17.5	11.5		
					litière	8.0	4.7	5.9	29.8	2.7		
					Dr-15 cm	1.1	1.5	1.8	19.8	6.1		
					Dr-100 cm	0.6	1.1	0.3	5.8	3.9		
					Dr-300 cm	0.3	0.7	0.6	3.9	2.9		
			Dr-600 cm	0.7	0.9	1.1	2.0	2.3				
<i>Quercus robur</i> + <i>Fagus sylvatica</i> (St. Arnold- Nordrhein -Westfalen)	modèle basé sur la loi de Darcy	10 cm 100 cm 300 cm 350 cm	620 338 349.5 349.5	828	pluie	4.0	1.2	3.9	10.4		podzol	Van Grinsven et al., 1991
					pluioless.	14.0	4.3	23.5	13.8			
					Dr-10 cm	43.0	9.7	5.9	17.3			
					Dr-100 cm	36.0	3.0	3.9	10.4			
					Dr-300 cm	43.0	3.6	5.9	12.7			
<i>Pinus strobus</i> (St. Arnold- Nordrhein -Westfalen)	modèle basé sur la loi de Darcy	10 cm 100 cm 300 cm 350 cm	311 178 163.5 163.5	828.5	pluie	4.0	1.2	3.9	10.4		podzol	Van Grinsven et al., 1991
					pluioless.	13.0	4.3	13.7	21.9			
					Dr-10 cm	43.0	9.7	5.9	29.9			
					Dr-100 cm	54.0	4.3	5.9	13.8			
					Dr-300 cm	62.0	7.3	7.8	20.7			
<i>Picea abies</i> (Danemark- 76ans)	modèle basé sur la loi de Darcy	35 cm	356	676	pluioless.	15.0	22.4	30.0	169.5		podzol	Beier C, 1998
					Dr-35 cm	3.3	20.8	15.5	243.0			

Tableau 18a : Première partie de synthèse bibliographique : flux hydrique, flux du cycle biogéochimique et méthode mise en œuvre pour quantifier les drainages.

Les données ont été recalculées pour présenter des valeurs annuelles moyennes. Dr : drainage, EC : écoulements le long des troncs, app. atmosph : apports atmosphériques, N=N-NH4+N-NO3.

Espèce (site-âge)	flux d'eau drainé			pluie (mm/an)	flux minéral (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)					sol	Référence	
	méthodes	profondeur (mm/an)	(mm/an)		Ca	Mg	K	Na	N			
Quercus petraea principalement taillis -sous futaie (Ardennes Française -Monthermé-160 ans)	calculs	total	600	1100	pluie	9.4	1.7	3.1	12.2	28.1	sol	Nys, 1987
	avec l'évapotranspiration				pluioless.	4.1	1.1	14.5	0.9	11.6	brun acide	
Picea abies (Ardennes Française -Monthermé-50ans)					litière	24.8	3.4	9.0	0.7	65.5		Nys, 1987
					Dr	11.8	3.6	3.6	14.3	13.6	sol	
Picea abies (Aubure- Vosges -80ans)	utilisation du flux de bassin versant			1120	pluie	3.5	0.8	1.6			brun	Bonneau et al., 1991
					pluioless.	9.7	1.5	18.8			acide	
Cryptomeria japonica (Japon)	utilisation du flux de bassin versant	10 cm	1429	1920	Dr	10.3	3.0	12.7				Wakamatsu et al., 2001
		100 cm	728		pluie	4.0	0.7	1.6	2.5		andosol	
Picea sitchensis plantation (Beddgelert forest- Angleterre- 70 ans)	utilisation du flux de bassin versant	horizon O	1730.5	2716.5	pluioless.+Ec.	21.2	5.0	27.0	4.6			Stevens et al., 1989
		horizon E	1730.5		Dr-10 cm	95.2	9.6	52.8	7.1			
		horizon B	1730.5		Dr-100 cm	73.0	10.1	19.9	7.8			
		horizon C	1730.5									
		bassin	1769.5									
feuillus (hêtre, parfois mélangé à chêne) peu de résineux nord-est de la France	analyse de sol à deux dates séparées de 20-25 ans				Dr-horizon A1 et sous- jaccents	15	1.1				tous les types (rendzine à podzol)	Bonneau et al., 1996

Tableau 18b : Deuxième partie de synthèse bibliographique : flux hydrique, flux du cycle biogéochimique et méthode mise en œuvre pour quantifier les drainages.

Les données ont été recalculées pour présenter des valeurs annuelles moyennes. Dr : drainage, EC : écoulements le long des troncs, app. atmosph : apports atmosphériques, N=N-NH₄+N-NO₃.

La détermination des drainages minéraux peut être mise en œuvre par différentes approches. L'approche la plus réaliste étant de modéliser les flux d'eau dans le sol, la deuxième approche consiste à calculer des flux d'eau sur la base de l'évapotranspiration (pluie-ETP), la troisième utilise les flux de bassin versant et la dernière consiste à déterminer la composition chimique d'échantillons de sol prélevés à différentes dates. Cette dernière approche présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre sur de grandes régions mais ne permet qu'une analyse rétrospective.

Nous avons cherché à comparer nos résultats à ceux de la littérature.

Nous présentons une synthèse bibliographique des travaux où la quantification des flux de drainage a été réalisée (**tableaux 18a et b**).

Dans un premier volet, cette synthèse bibliographique a pour but de lister les différentes études comprenant un drainage obtenu par de la modélisation. Il existe deux types de modèles, le premier s'appuie sur le principe d'un fonctionnement par compartiments et par flux de l'écosystème et le second utilise la loi de Darcy. À notre connaissance, les études de bilan minéral où le drainage minéral est basé sur un drainage hydrique modélisé sont relativement peu courantes ; ce qui implicitement rend compte de la difficulté de l'exercice. En effet, certains des paramètres indispensables sont déterminés par des campagnes de terrain et des mesures de laboratoire. La validation du drainage, qui ne peut être mesuré directement, impose des contrôles (flux de sève, teneur en eau du sol, pluie au sol) qui alourdissent encore la charge expérimentale.

Les flux minéraux drainés et établis par Laclau (2001) à partir d'un modèle basé sur la loi de Darcy sont plus faibles que ceux déterminés par les modèles à compartiments et à flux (Marques *et al.*, 1997 ; nos études). Globalement, les études utilisant un modèle basé sur la loi de Darcy (Chang et Matzner, 2000 ; Van Grinsven *et al.*, 1991) établissent des drainages dans une gamme de valeur comparable à ceux établis par des modèles à compartiments et à flux. Les valeurs faibles déterminées par Laclau (2001) reflétant la faible richesse minérale du sol du Congo.

Dans cette synthèse, nous avons également présenté certains travaux où les drainages de sols forestiers sont calculés à partir de flux basés sur l'évapotranspiration ou à partir de flux de bassin versant ou à partir d'analyse d'échantillons de sol. L'objectif étant de permettre un tour d'horizon de la variabilité des flux de drainage.

Globalement, une confrontation des drainages de minéraux obtenus par ces trois approches avec les drainages établis à l'aide de modèle permet de nous rendre compte que les valeurs sont du même ordre de grandeur.

L'établissement d'un flux biogéochimique nécessite également une détermination des compositions minérales de solutions prélevées *in-situ*. L'équipement considérable, l'entretien et le nombre d'analyses chimiques sont nettement supérieurs lorsque les études biogéochimiques intègrent les flux minéraux drainés.

Cette synthèse permet de comparer des drainages de feuillus et résineux :

↳ Lorsque les flux sont établis par un modèle à compartiments et à flux, les drainages profonds d'alocrisols, à 120 cm de profondeur (cette étude et Marques *et al*, 1997), sont :

- plus élevés en calcium et potassium sous résineux
- et plus élevés en magnésium et sodium sous feuillus

↳ Lorsque les flux sont établis par un modèle basé sur la loi de Darcy, les drainages profonds de podzol, à 300 cm de profondeur (Van Grinsven *et al.*, 1991) sont :

- plus élevés en calcium et potassium sous résineux
- et plus élevés en magnésium et sodium sous résineux

↳ Lorsque les flux sont établis à partir de l'évapotranspiration, les drainages profonds sur sol brun acides ou ocreux (Nys, 1987), sont :

- plus élevés en calcium et potassium sous résineux
- et plus élevés en magnésium et sodium sous feuillus

Le boisement, résineux contre feuillus, et le type de sol paraissent interagir sur la composition chimique des eaux drainées.

Dans cette revue bibliographique, la modélisation a permis d'établir des drainages de minéraux sur des profondeurs croissantes et jusqu'à 6 mètres alors que les autres méthodes sont moins précises. Le manque de connaissance sur l'enracinement est, néanmoins, une limite de ces méthodes.

Dans notre étude, la présence de racines a conduit à simuler le bilan hydrique pour une épaisseur de sol importante, par exemple de 3 mètres pour *Fou150ans*. Est-ce que le drainage minéral doit être établi jusqu'à 3 mètres de profondeur ? Afin de clarifier la situation, un travail de couplage entre les flux hydriques et les prélèvements réalisés par des lysimètres avec tension (TL) jusqu'à 2.5 mètres pourrait être envisagé pour ce site d'étude.

Mais une limitation pour passer à la modélisation reste la profondeur maximale d'enracinement qui est un paramètre du modèle de bilan hydrique difficile à connaître.

Le fin mot d'une histoire de flux minéraux

Un **bilan de fertilité** est proposé, il est établi avec des flux minéraux :

- apportés par les pluies incidentes pour les entrées atmosphériques,
- drainés à 120 cm de profondeur pour les flux sortants du sol,
- immobilisés dans la biomasse et exportés lors des interventions sylvicoles. Ces flux ont été déterminés en rendant compte des différents compartiments morphologiques (branche, tronc) ainsi que des différentes découpes commerciales utilisées usuellement (4 cm, 7 cm) ; les rémanents, les feuilles et les racines sont exclus car non exportés lors des interventions sylvicoles. Le terme "immobilisation courante" correspond au flux minéral à un âge donné (âge du peuplement au moment de la récolte). Les chiffres présentés proviennent des travaux réalisés au sein de l'unité mixte de recherche « Écologie et Écophysiologie Forestière » et de l'unité « Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers ».
- Les flux d'altération des minéraux du sol sont négligés (hypothèse simplificatrice de travail).

	Bilan	= Apports pluies incidentes	- Immobilisation courante	- Drainage
Calcium	0.5	8.9	3.7	4.7
Magnésium	-6.2	1.6	1.0	6.8
Potassium	-5.8	4.3	8.1	2.1
Phosphore	0.4	1.8	0.6	0.7

Tableau 19 : Bilan de fertilité minérale pour *Hesse36ans*. L'unité est le kg/ha/an.

	Bilan	= Apports pluies incidentes	- Immobilisation courante	- Drainage
Calcium	-0.4	8.6	5.4	3.6
Magnésium	-8.7	4.8	1.9	11.6
Potassium	-11.4	9.2	14.5	6.1
Phosphore	1.7	8.2	2.7	3.8

Tableau 20 : Bilan de fertilité minérale pour *Fou30ans*. L'unité est le kg/ha/an.

	Bilan	= Apports pluies incidentes	- Immobilisation courante	- Drainage
Calcium	-15.1	8.6	20.7	3.0
Magnésium	-5.9	4.8	3.4	7.3
Potassium	-5.8	9.2	12.3	2.7
Phosphore	1.3	8.2	4.2	2.7

Tableau 21 : Bilan de fertilité minérale pour *Fou150ans*. L'unité est le kg/ha/an.

Conclusion

Nous avons établi les flux hydriques des différents niveaux dans le peuplement. La pluie au sol et la transpiration sont correctement modélisées. La variation du contenu en eau du sol est correctement modélisée pour *Hesse36ans* alors que pour les sites de Fougères des écarts entre le modèle et les mesures existent. Nous n'avons pas localisé la source de ces écarts qui peuvent être liés au modèle, à son paramétrage ou aux mesures TDR.

Ainsi, pour *Hesse36ans*, il est possible d'assurer la fiabilité des drainages, à l'appui des conclusions positives que nous avons faites sur les simulations de la pluie au sol, de la transpiration et de l'évolution de la teneur en eau.

La structure du peuplement est apparue déterminante pour l'établissement des écoulements le long des troncs. L'alternative retenue pour quantifier ce flux a consisté à utiliser des mesures réalisées par des lectures mensuelles directes. L'utilisation de biljou pour établir ce flux n'est envisageable qu'après une amélioration du modèle.

Nous avons clairement montré que pour *Hesse36ans*, le sol se compose de deux « réservoirs » d'eau disponible pour la plante : un réservoir superficiel alimenté par les pluies d'été, dont l'eau est absorbée rapidement par les racines, qui donc se vide et se remplit périodiquement ; un réservoir profond qui emmagasine l'eau provenant des pluies d'hiver : il joue le rôle de relais en période sèche, fournissant alors de l'eau aux racines profondes à un rythme beaucoup plus lent.

Nous avons établi, pour les trois hêtraies *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*, en 2002 et 2003 : (1) les dépôts hors couvert et les changements au passage du couvert, (2) les stocks d'éléments minéraux et de carbone dans la litière, (3) le drainage en éléments minéraux à 10, 30, 55, 80 et 120 cm ainsi que le drainage du carbone, uniquement, pour les sites de Fougères.

Une étude plus approfondie des drainages réalisée en établissant des rapports entre flux d'éléments a conduit à deux résultats marquants : (1) les tranches de sol se différencient en deux groupes relativement homogènes correspondant aux deux « réservoirs » d'eau disponible pour l'arbre et (2) le flux de calcium et potassium évolue avec la profondeur comme l'enracinement des racines fines (<3 mm).

Ce travail a finalement été la convergence d'une analyse des flux hydriques drainés dans le sol et une analyse du couplage entre les concentrations chimiques et les flux hydriques drainés. L'originalité de notre approche est d'envisager ce couplage en faisant intervenir les éléments essentiels que sont les « réservoirs » en eau et l'enracinement des peuplements forestiers, ce qui a permis de mettre à jour un lien fonctionnel.



Annexes

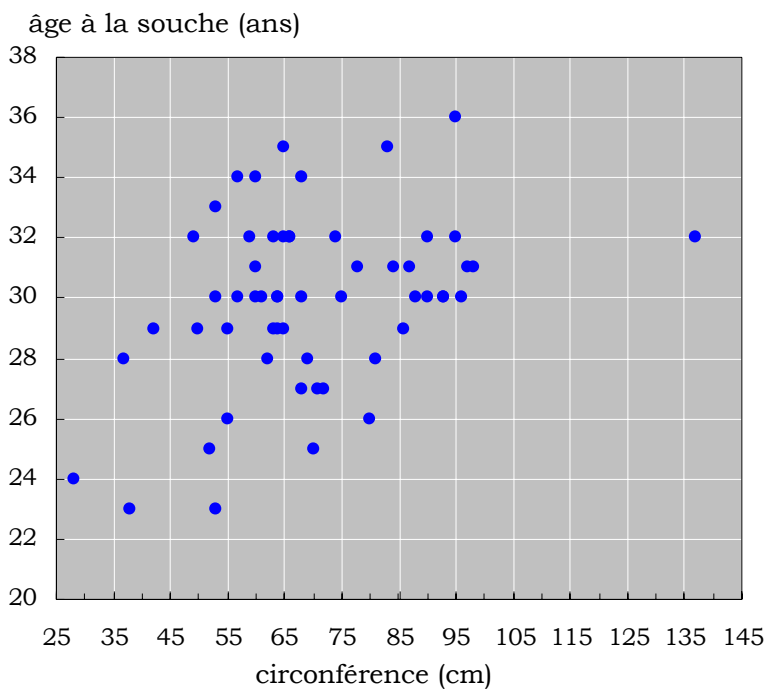
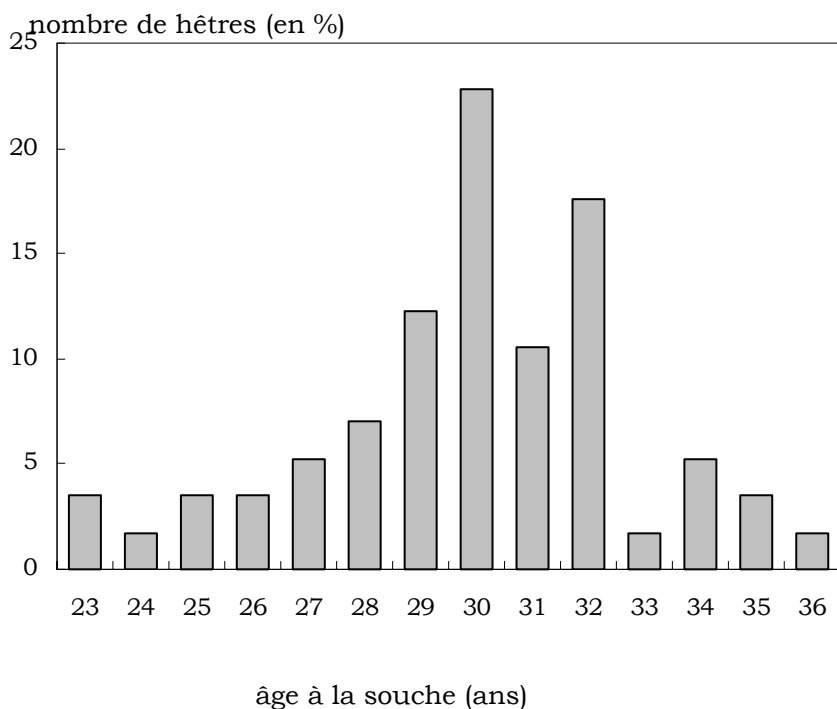


ÂGE DU SITE FOU30ANS

Analyses statistiques des mesures dendrométriques de 57 souches de hêtre du *Fou30ans* et de leur âge déterminé par prélèvement d'une rondelle comprenant la fin de saison 2002. La lecture des cernes a été réalisée à l'aide d'une binoculaire.

	circonférence (cm)	âge (ans)
min	28.00	23.00
max	137.00	36.00
moyenne	69.68	29.91
médiane	66.00	30.00
centile 25	59.00	29.00
centile 75	83.00	32.00

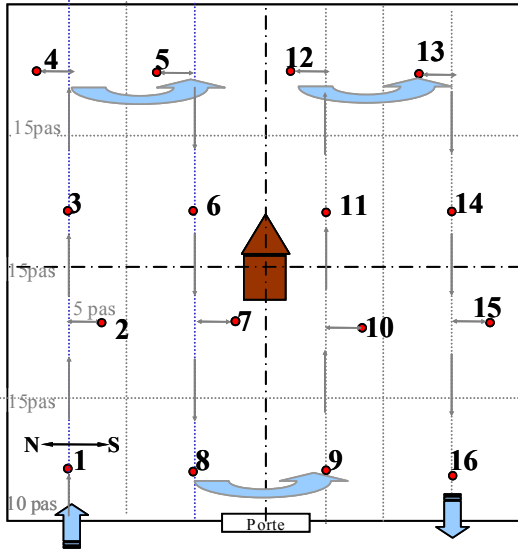
Minimum, maximum, moyenne, médiane, centile 25 et 75 des circonférences et âges de 57 rondelles de hêtre du *Fou30ans* à la fin de la saison 2002.



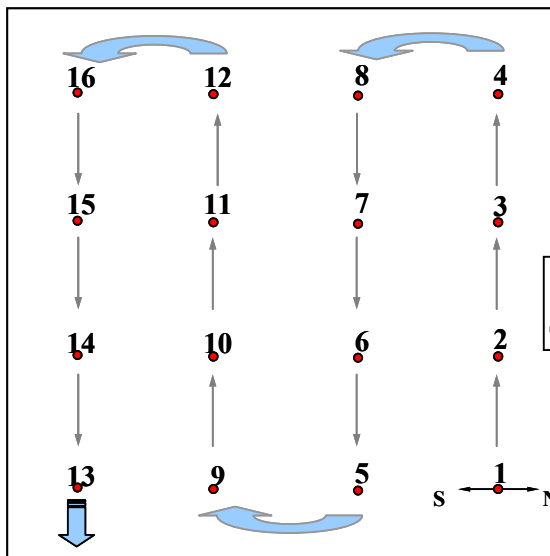
PROTOCOLE DE MESURES LAI

Représentation schématique du protocole appliqué pour les mesures de LAI avec un capteur Licor-2000 sous-couvert et un second capteur pour les mesures à découvert.

Le cheminement utilisé par le premier opérateur est représenté par les flèches sur les différents sites de Fougères.

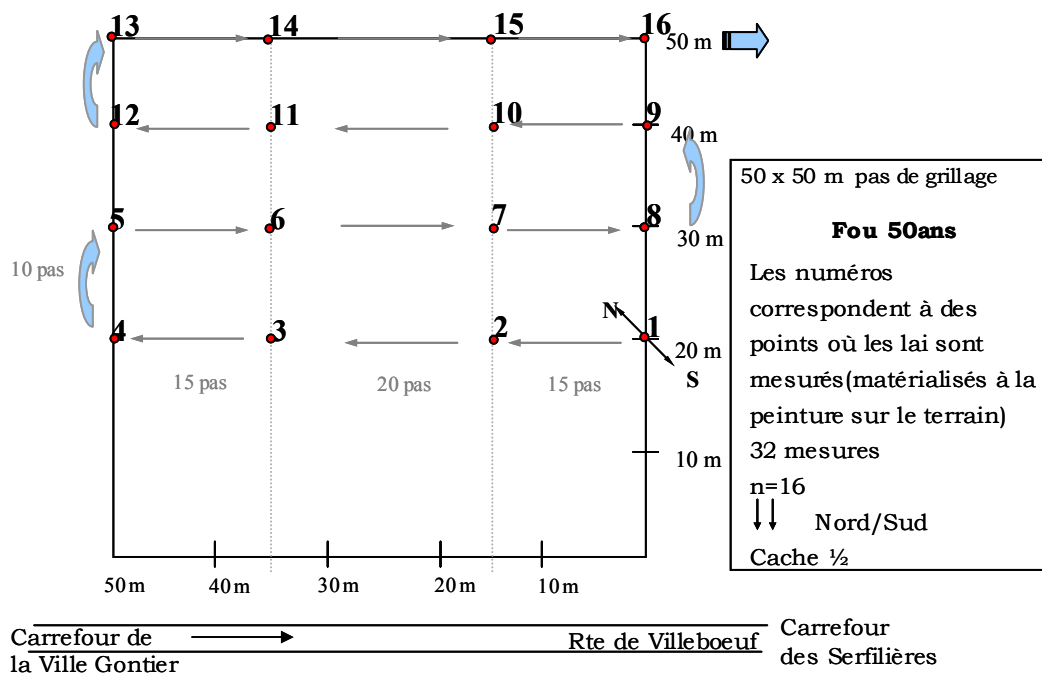


Fou15ans
 Les numéros correspondent à des points où les Lai sont mesurés (non matérialisés sur le terrain)
 32 mesures
 n=16
 ↓↓ Nord/Sud
 Cache ½

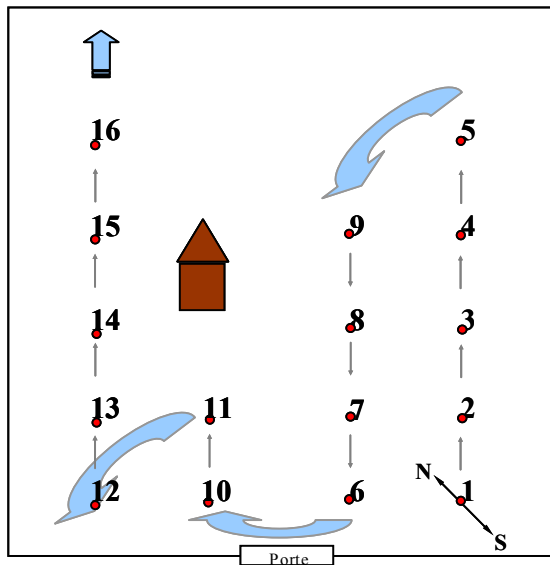


Fou30ans
 Les numéros correspondent aux numéros des bacs de litière
 32 mesures
 n=16
 ↓↓ Nord/Sud
 Cache ½

Le second opérateur réalise les mesures de référence sur l'échafaudage situé sur la placette *Fou30ans*



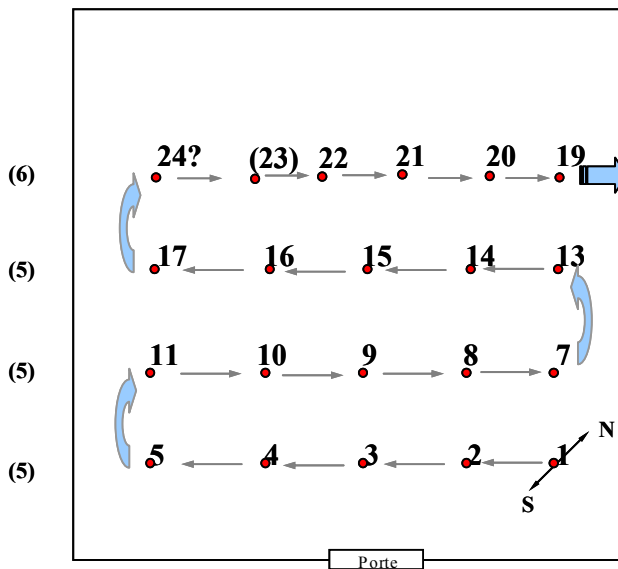
Le second opérateur réalise les mesures de référence dans la zone de loisir des Chiennedet.



Fou88ans

Les numéros correspondent aux numéros des bacs de litière

32 mesures
 n=16
 ↓↓ Nord/Sud
 Cache ½



Fou 150ans

Les numéros correspondent aux numéros des bacs de litière

42 mesures
 n=21
 ↓↓ Nord/Sud
 Cache ½

Le second opérateur réalise les mesures de référence dans la parcelle juxtaposée à l'Est de celle du *Fou88ans*

MORPHOLOGIE DES FEUILLES VERTES

Caractéristiques morphologiques des feuilles de lumière et d'ombre prélevées en 2002 et 2003 à Fougères : moy=moyenne, i.c.=intervalle de confiance, min=minimum, max=maximum et n=nombre de feuilles. (SAS, version 8.02)

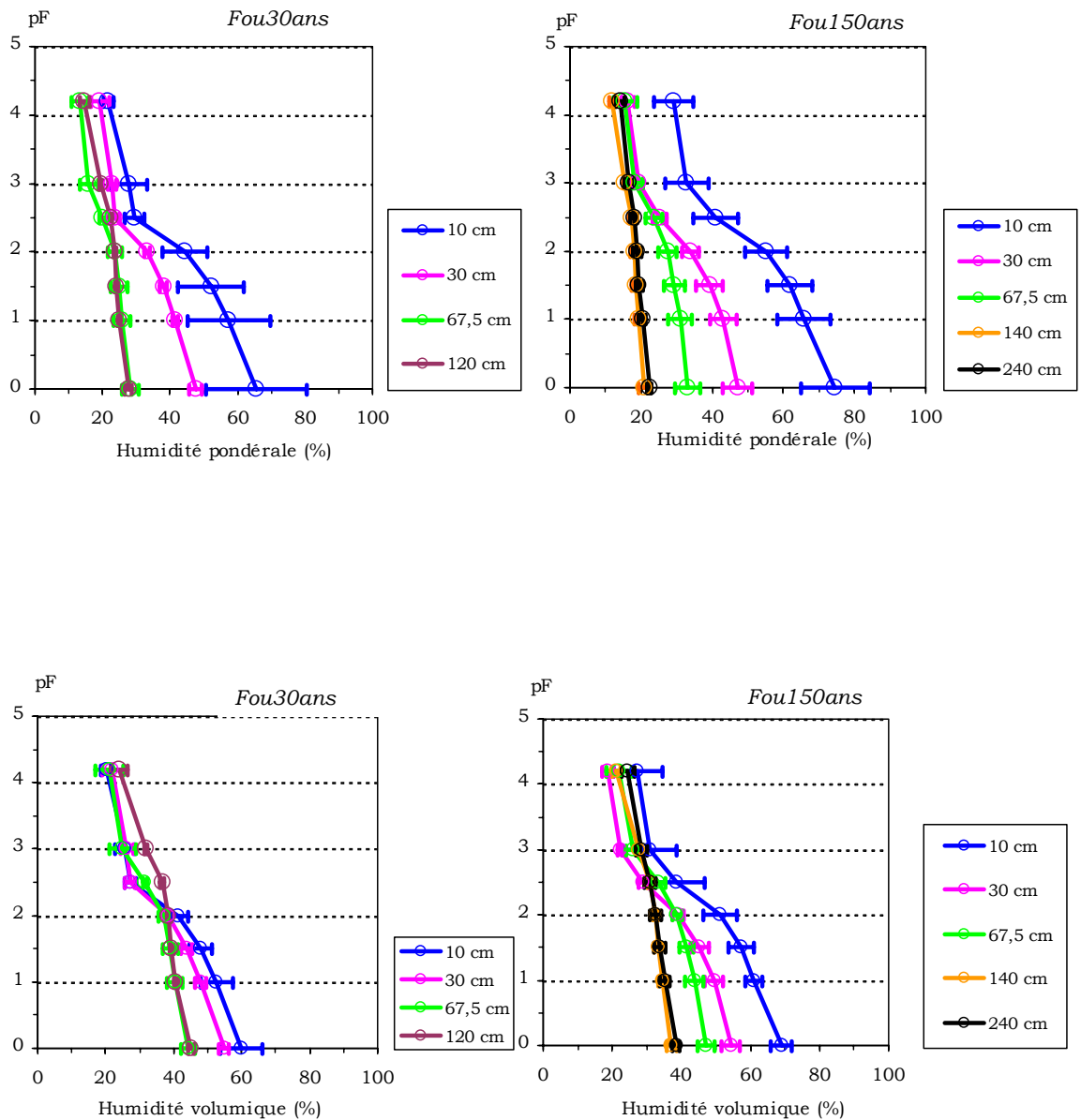
site	année	caractéristiques des feuilles	moy	i.c.	min-max	moy	i.c.	min-max
			feuilles de lumière (n=190)			feuilles d'ombre (n=258)		
Fou15ans	2002	longueur (cm)	6.96	± 0.23	1.1-11.4	7.01	± 0.24	0.1-11.4
		largeur (cm)	2.41	± 0.098	0.5-4.4	2.3	± 0.078	0.1-4
		largeur max (cm)	4.09	± 0.15	1.4-6.6	3.96	± 0.13	0.1-6.4
		masse (g)	0.130	± 0.021	0.075-0.224	0.055	± 0.0077	0.024-0.093
		surface (cm ²)	17.58	± 1.15	0.56-43.67	16.94	± 0.98	0.01-39.80
		masse spécifique (g. m ⁻²)	74.28	± 6.046	44.53-101.85	32.52	± 3.87	19.22-60.16
		surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	139.08	± 13.87	98.18-224.58	331.11	± 35.24	166.21-520.2
			feuilles de lumière (n=90)			feuilles d'ombre (n=90)		
	2003	longueur (cm)	8.56	± 0.41	4.50-19.30	9.55	± 0.44	6.70-17.50
		largeur (cm)	3.02	± 0.13	1.60-4.90	2.88	± 0.12	1.30-4.90
		largeur max (cm)	5.02	± 0.18	2.60-7.40	5.04	± 0.15	3.70-8.00
		masse (g)	0.211	± 0.027	0.176-0.287	0.148	± 0.037	0.104-0.262
		surface (cm ²)	26.01	± 1.72	7.58-53.30	27.07	± 1.41	17.03-53.58
		masse spécifique (g. m ⁻²)	81.13	± 7.02	67.63-96.15	53.92	± 7.64	42.74-74.28
		surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	124.68	± 11.02	104.01-147.86	190.6	± 24.58	134.62-233.95
			feuilles de lumière (n=100)			feuilles d'ombre (n=100)		
Fou30ans	2002	longueur (cm)	8.53	± 0.32	3.4-12.3	7.95	± 0.36	3.6-12.1
		largeur (cm)	2.67	± 0.15	0.8-4.1	2.58	± 0.14	0.8-5.3
		largeur max (cm)	4.69	± 0.22	1.7-6.8	4.38	± 0.21	1.7-6.9
		masse (g)	0.145	± 0.043	0.034-0.202	0.054	± 0.012	0.026-0.08
		surface (cm ²)	23.44	± 1.75	3.17-44.34	21.39	± 1.83	3.36-46.10
		masse spécifique (g. m ⁻²)	60.37	± 13.30	16.49-77.73	24.64	± 3.05	19.18-29.87
		surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	202.8	± 103.68	128.65-606.37	417.12	± 52.41	334.73-521.34
			feuilles de lumière (n=90)			feuilles d'ombre (n=90)		
	2003	longueur (cm)	7.52	± 0.26	4.70-10.20	8.87	± 0.37	4.80-12.10
		largeur (cm)	3.24	± 0.14	1.80-4.90	3.58	± 0.17	1.70-5.70
		largeur max (cm)	5.05	± 0.20	2.90-7.30	5.56	± 0.25	2.60-8.10
		masse (g)	0.201	± 0.032	0.124-0.256	0.128	± 0.014	0.106-0.167
		surface (cm ²)	25.01	± 1.70	8.95-47.10	32.86	± 2.62	7.92-66.44
		masse spécifique (g. m ⁻²)	80.06	± 8.60	53.79-89.69	38.9	± 1.80	35.66-41.93
		surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	127.75	± 17.81	111.5-185.92	257.88	± 11.96	238.5-280.39
			feuilles de lumière (n=610)			feuilles d'ombre (n=532)		
Fou50ans	2002	longueur (cm)	6.88	± 0.15	1.2-13.5	7.88	± 0.18	1.2-18.6
		largeur (cm)	2.35	± 0.053	0.6-4.3	2.69	± 0.064	0.8-5.2
		largeur max (cm)	4.06	± 0.089	1.1-7.4	4.51	± 0.11	1.3-8.2
		masse (g)	0.141	± 0.012	0.036-0.244	0.075	± 0.0083	0.03-0.136
		surface (cm ²)	17.11	± 0.69	0.74-46.68	22.36	± 0.91	1.73-59.77
		masse spécifique (g. m ⁻²)	86	± 5.06	34.26-113.16	33.73	± 2.49	19.68-50.7
		surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	127.56	± 13.38	88.37-291.88	319.73	± 25.13	197.06-508.01
			feuilles de lumière (n=120)			feuilles d'ombre (n=120)		
Fou88ans	2003	longueur (cm)	8.13	± 0.44	4.90-18.00	7.32	± 0.22	5.00-10.40
		largeur (cm)	2.34	± 0.10	0.60-3.50	2.69	± 0.077	1.40-3.90
		largeur max (cm)	4.26	± 0.12	2.80-5.80	4.38	± 0.12	2.80-6.10
		masse (g)	0.097	± 0.017	0.062-0.152	0.069	± 0.0094	0.043-0.094
		surface (cm ²)	18.4	± 0.95	8.96-32.19	19.96	± 1.02	9.06-39.33
		masse spécifique (g. m ⁻²)	52.93	± 8.15	34.34-69.80	35.11	± 4.86	28.56-46.73
		surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	200.43	± 33.37	143.27-291.21	296.65	± 37.73	213.98-350.14

CARACTÉRISTIQUES DES FEUILLES DE LITIÈRE

Caractéristiques morphologiques des feuilles de litière prélevées en 2002 et 2003 à Fougères et Hesse : moy=moyenne, i.c.=intervalle de confiance, min=minimum, max=maximum, n= nombre de feuilles et d.m.= données manquantes.

site	caractéristiques des feuilles	2002 (n=150)			2003 (n=160)		
		moy	i.c.	min-max	moy	i.c.	min-max
Fou15ans	longueur (cm)	7.24	± 0.27	2.60-10.80	7.01	± 0.30	1.80-12.20
	largeur (cm)	2.26	± 0.086	0.70-4.00	2.58	± 0.11	1.10-5.10
	largeur max (cm)	3.96	± 0.14	1.10-6.40	4.32	± 0.16	1.80-7.20
	masse (g)	0.068	± 0.010	0.040-0.11	0.105	± 0.0092	0.081-0.14
	surface (cm ²)	16.82	± 1.06	1.78-35.38	18.83	± 1.36	3.53-43.75
	masse spécifique (g. m ⁻²)	40.20	± 4.48	29.12-59.22	55.63	± 3.05	43.88-68.28
	surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	257.97	± 27.83	168.87-343.37	181.60	± 10.23	146.45-227.92
Fou30ans	longueur (cm)	8.96	± 0.29	4.20-15.20	7.34	± 0.27	3.10-12.60
	largeur (cm)	2.43	± 0.11	0.90-3.90	2.60	± 0.097	1.10-4.30
	largeur max (cm)	4.57	± 0.16	1.90-6.70	4.42	± 0.17	1.80-6.70
	masse (g)	0.108	± 0.019	0.054-0.16	0.095	± 0.0069	0.080-0.13
	surface (cm ²)	22.13	± 1.35	3.60-40.95	19.75	± 1.30	3.33-42.49
	masse spécifique (g. m ⁻²)	48.38	± 6.34	31.22-67.94	48.20	± 2.50	40.13-54.60
	surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	217.79	± 28.44	147.19-320.33	209.12	± 11.55	183.16-249.21
Fou50ans	longueur (cm)	d.m.	d.m.	d.m.	7.53	± 0.27	4.00-13.40
	largeur (cm)	d.m.	d.m.	d.m.	2.75	± 0.11	1.20-4.50
	largeur max (cm)	d.m.	d.m.	d.m.	4.62	± 0.17	2.20-7.50
	masse (g)	d.m.	d.m.	d.m.	0.093	± 0.0097	0.071-0.14
	surface (cm ²)	d.m.	d.m.	d.m.	21.45	± 1.48	5.30-54.14
	masse spécifique (g. m ⁻²)	d.m.	d.m.	d.m.	43.89	± 4.66	32.58-66.94
	surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	d.m.	d.m.	d.m.	234.99	± 22.97	149.38-306.98
Fou88ans	longueur (cm)	6.16	± 0.2	3.80-10.70	6.90	± 0.23	3.30-10.30
	largeur (cm)	2.03	± 0.074	1.10-3.70	2.19	± 0.091	1.10-3.60
	largeur max (cm)	3.59	± 0.12	1.80-6.50	3.93	± 0.15	2.20-6.20
	masse (g)	0.088	± 0.008	0.061-0.11	0.082	± 0.0063	0.060-0.098
	surface (cm ²)	12.78	± 0.84	4.31-39.25	15.69	± 1.080	4.46-33.01
	masse spécifique (g. m ⁻²)	69.58	± 5.71	52.83-89.069	52.10	± 3.30	37.87-59.98
	surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	146.76	± 12.32	112.27-189.28	194.62	± 14.04	166.72-264.04
Fou150ans	longueur (cm)	5.53	± 0.16	3.40-8.80	6.22	± 0.20	2.60-9.50
	largeur (cm)	2.07	± 0.075	0.90-3.80	2.34	± 0.080	1.00-3.80
	largeur max (cm)	3.52	± 0.12	1.80-6.50	3.91	± 0.12	1.90-5.80
	masse (g)	0.074	± 0.005	0.057-0.092	0.086	± 0.0099	0.065-0.13
	surface (cm ²)	11.74	± 0.7	3.69-29.71	14.83	± 0.84	4.74-31.60
	masse spécifique (g. m ⁻²)	63.73	± 3.66	49.75-73.71	57.76	± 5.40	44.38-77.24
	surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	158.58	± 9.69	135.66-201.00	177.48	± 15.53	129.47-225.34
Hesse15ans	longueur (cm)	7.78	± 0.28	4.50-11.60	9.55	± 0.26	4.30-12.90
	largeur (cm)	2.66	± 0.11	1.50-4.00	3.09	± 0.096	1.90-4.80
	largeur max (cm)	4.43	± 0.17	2.60-6.70	5.20	± 0.16	2.90-7.90
	masse (g)	0.114	± 0.02	0.060-0.16	0.105	± 0.012	0.074-0.15
	surface (cm ²)	21.30	± 1.52	7.39-42.59	30.16	± 1.61	11.00-59.99
	masse spécifique (g. m ⁻²)	52.77	± 6.40	38.01-68.42	34.55	± 2.21	28.92-44.35
	surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	195.41	± 24.56	146.15-263.10	292.84	± 17.86	225.46-345.78
Hesse36ans	longueur (cm)	7.07	± 0.24	3.90-11.20	9.28	± 0.30	0.30-13.00
	largeur (cm)	2.51	± 0.09	1.20-4.10	3.30	± 0.10	0.60-4.90
	largeur max (cm)	4.15	± 0.15	1.90-6.40	5.52	± 0.17	1.50-7.70
	masse (g)	0.100	± 0.018	0.060-0.17	0.111	± 0.011	0.078-0.14
	surface (cm ²)	18.45	± 1.22	5.04-41.30	31.51	± 1.73	0.17-56.35
	masse spécifique (g. m ⁻²)	54.68	± 6.97	38.67-74.53	35.29	± 2.84	25.59-43.59
	surface spécifique (cm ² . g ⁻¹)	192.49	± 25.02	134.17-258.60	289.15	± 23.99	229.40-390.74

COURBES DE POTENTIEL MATRICIEL établies à partir d'échantillons de sol prélevés entre 10 et 120 cm de profondeur sur le site *Fou30ans* et entre 10 et 240 cm de profondeur sur le site *Fou150ans*. Prélèvements effectués au moyen de cylindres de 98 cm³.



ANNEXE ANALYSES MINÉRALES ET CARBONÉES : A6

COMPARAISON ZTL ET TL

Volumes d'eau prélevés mensuellement (28 jours) en utilisant des lysimètres sans tension (ZTL) et des lysimètres avec tension (TL) aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120 cm dans le site Fou30ans en 2002 et 2003 : moy=moyenne, i.c. = intervalle de confiance, min=minimum, max=maximum, n=nombre de lysimètres.

date	profondeur	lysimètre zéro tension (ZTL) (en ml)				lysimètre avec tension (TL)(en ml)			
		moy	i.c.	min-max	n	moy	i.c.	min-max	n
14 janv. 2002	10 cm	600	± 278	300-900	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	10	± 28	0-50	5	56	± 114	0-150	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	225	± 615	0-800	4
	120 cm	600	± .	600-600	1	0	± 0	0-0	4
12 févr. 2002	10 cm	137	± 108	50-240	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	1160	± .	1160-1160	1	0	± 0	0-0	4
12-mars 2002	10 cm	164	± 149	0-320	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	880	± .	880-880	1	0	± 0	0-0	4
09-avr 2002	10 cm	264	± 177	120-500	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	100	± 116	0-250	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	40	± 81	0-150	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	700	± .	700-700	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	750	± .	750-750	1	0	± 0	0-0	4
07-mai 2002	10 cm	62	± 77	0-150	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
04-juin 2002	10 cm	234	± 148	100-400	5	856	± 923	200-1575	4
	30 cm	10	± 28	0-50	5	2300	± 636	1700-2500	4
	55 cm	6	± 17	0-30	5	2200	± 566	1800-2500	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	1363	± 1275	800-2500	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	663	± 136	550-750	4
02-juil 2002	10 cm	86	± 130	0-200	5	155	± 317	20-450	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	650	± 92	600-700	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	950	± 643	600-1500	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	463	± 845	50-1200	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
30-juil 2002	10 cm	58	± 88	0-180	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
27-août 2002	10 cm	1060	± 327	660-1340	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
24-sept 2002	10 cm	2792	± 834	1700-3460	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	82	± 114	0-180	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
22-oct 2002	10 cm	126	± 154	0-280	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
19-nov 2002	10 cm	752	± 405	300-1200	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	110	± 133	0-225	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	25	± 69	0-125	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	520	± .	520-520	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	3860	± .	3860-3860	1	0	± 0	0-0	4
17-déc 2002	10 cm	53	± 47	0-100	5	138	± 164	0-250	4
	30 cm	620	± 1687	0-3050	5	513	± 238	300-650	4
	55 cm	8	± 22	0-40	5	656	± 524	350-1000	4
	80 cm	280	± .	280-280	1	475	± 353	300-800	4
	120 cm	1380	± .	1380-1380	1	34	± 31	10-50	4

ANNEXE ANALYSES MINÉRALES ET CARBONÉES : A6 suite

COMPARAISON ZTL ET TL

date	profondeur	lysimètre zéro tension (ZTL) (en ml)				lysimètre avec tension (TL)(en ml)			
		moy	i.c.	min-max	n	moy	i.c.	min-max	n
14-janv 2003	10 cm	59	± 91	0-180	5	13	± 40	0-50	4
	30 cm	548	± 1453	0-2640	5	594	± 1111	0-1350	4
	55 cm	12	± 33	0-60	5	1250	± 2297	0-2500	4
	80 cm	940	± .	940-940	1	863	± 1105	0-1600	4
	120 cm	2150	± .	2150-2150	1	450	± 914	0-1200	4
11-févr 2003	10 cm	86	± 154	0-300	5	38	± 119	0-150	4
	30 cm	472	± 1297	0-2340	5	1250	± 2297	0-2500	4
	55 cm	8	± 22	0-40	5	1763	± 1365	900-2500	4
	80 cm	200	± .	200-200	1	63	± 119	0-150	4
	120 cm	1280	± .	1280-1280	1	325	± 628	0-800	4
11-mars 2003	10 cm	12	± 14	0-20	5	25	± 80	0-100	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	1475	± 1888	350-2500	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	2188	± 644	1650-2500	4
	80 cm	30	± .	30-30	1	1250	± 2297	0-2500	4
	120 cm	460	± .	460-460	1	263	± 492	0-600	4
08-avr 2003	10 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	288	± 553	0-700	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	1250	± 2297	0-2500	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	1075	± 2027	0-2500	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
06-mai 2003	10 cm	39	± 57	0-100	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	325	± 611	0-750	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	1250	± 2297	0-2500	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	1013	± 1960	0-2500	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
03-juin 2003	10 cm	790	± 544	370-1500	5	50	± 92	0-100	4
	30 cm	26	± 72	0-130	5	400	± 735	0-800	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	1000	± 1837	0-2000	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	925	± 1295	0-1900	4
	120 cm	50	± .	50-50	1	0	± 0	0-0	4
01-juil 2003	10 cm	740	± 499	100-1100	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	20	± 56	0-100	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
29-juil 2003	10 cm	1104	± 662	520-1700	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	78	± 184	0-340	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
26-août 2003	10 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
23-sept 2003	10 cm	1616	± 1124	560-2560	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	68	± 162	0-300	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	48	± 133	0-240	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
21-oct 2003	10 cm	1118	± 988	150-2300	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
18-nov 2003	10 cm	1636	± 987	500-2720	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	20	± 56	0-100	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	0	± 0	0-0	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
16-déc 2003	10 cm	1136	± 431	700-1540	5	0	± 0	0-0	4
	30 cm	71	± 151	0-280	5	0	± 0	0-0	4
	55 cm	15	± 42	0-75	5	0	± 0	0-0	4
	80 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4
	120 cm	0	± .	0-0	1	0	± 0	0-0	4

ANNEXE BILAN HYDRIQUE : A7

SORTIE ANNUELLE DE BILJOU

Résultats des « sorties annuelles » de biljou : cumuls annuels 1) des hauteurs d'eau : pluie incidente, pluie au sol, interception,ETP, ETR, transpiration, évapotranspiration du sous-étage, drainage de sept tranches de sol et déficit hydrique, 2) du rayonnement , 3) du nombre de jour de stress hydrique ainsi que le jour du démarrage du stress, en 2002 et 2003, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*.

Site	pluie incidente (mm)	pluie sol (mm)	Interception (mm)	ETP (mm)	Rayonnement (J. cm ²)	ETR (mm)	Transpiration (mm)	évapotranspiration du sous-étage (mm)	drainage à - 10 cm (mm)	drainage à - 30 cm (mm)	drainage à - 55 cm (mm)	drainage à - 80 cm (mm)	drainage à - 120 cm (mm)	drainage à - 160 cm (mm)	drainage à >160 cm (mm)	nombre de jours de stress	déficit hydrique (mm)	Jour du début du stress
Année 2002																		
<i>Hesse36ans</i>	1157	974	183	694	409	502	295	23	877	786	695	668	660	657	655	0	0	
<i>Fou30ans</i>	1119	980	140	575	409	405	251	15	909	861	802	746	724	717	715	0	0	
<i>Fou150ans</i>	1119	989	131	483	409	404	215	58	875	824	778	745	732	724	713	0	0	
Année 2003																		
<i>Hesse36ans</i>	661	533	127	644	479	430	281	22	378	325	274	247	239	234	230	111	61.3	178
<i>Fou30ans</i>	781	682	99	469	449	427	230	99	527	469	404	369	359	355	354	58	19.4	223
<i>Fou150ans</i>	781	679	101	488	449	408	234	73	541	461	418	393	386	380	370	72	27.2	220

ANNEXE FLUX MINÉRAUX ET CARBONÉS : A8

FLUX D'ÉLÉMENTS AU NIVEAU DU PEUPELEMENT : résultats des produits entre les flux hydriques et les concentrations chimiques correspondantes

Flux annuels d'éléments minéraux et de carbone établis pour la pluie incidente, les pluviollessivats, l'écoulement le long des troncs et la litière, en 2002 et en 2003, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans* (en kg/ha/an).

Rappel : t. a. =teneur aberrante

* = on a utilisé, pour les périodes n°25 et n°26, des valeurs estimées (au lieu des mesures)

élément	site	pluie incidente		pluviollessivats		écoulement tronc		litière	
		2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003
Ca	<i>Hesse36ans</i>	10.19	7.63	5.83	5.36	0.71	0.69	37.86	31.32
	<i>Fou30ans</i>	8.69	8.47	3.43	3.39	0.95	0.49	24.35	19.21
	<i>Fou150ans</i>			4.36	4.74	0.22	0.23	10.61	9.21
Cl	<i>Hesse36ans</i>	19.45	8.98	8.88	6.41	1.83	1.09	19.30	13.30
	<i>Fou30ans</i>	76.90	62.51	39.78	29.96	10.59	6.44	48.85	42.54
	<i>Fou150ans</i>			56.26	47.52	3.24	2.87	70.45	64.29
K	<i>Hesse36ans</i>	5.22	3.43	17.41	14.69	2.91	2.34	58.91	63.17
	<i>Fou30ans</i>	9.05	9.30	27.19	19.62	8.03	3.03	38.71	37.06
	<i>Fou150ans</i>			31.97	26.05	2.71	2.68	25.00	30.68
Mg	<i>Hesse36ans</i>	2.08	1.09	1.62	1.33	0.17	0.13	7.35	6.65
	<i>Fou30ans</i>	4.43	5.11	2.61	2.27	0.54	0.38	7.19	6.26
	<i>Fou150ans</i>			3.52	3.21	0.12	0.13	6.71	5.41
Na	<i>Hesse36ans</i>	13.45	4.40	5.11	3.96	1.07	0.55	11.16	9.58
	<i>Fou30ans</i>	30.38	18.02	15.97	11.48	4.70	2.92	18.05	17.22
	<i>Fou150ans</i>			23.37	19.37	1.47	1.37	26.83	24.85
N-NH4	<i>Hesse36ans</i>	7.75	3.12	4.51	3.77	0.79	0.75	45.91	24.57
	<i>Fou30ans</i>	19.24	48.31	4.33	4.10	2.60	0.87	6.14	5.41
	<i>Fou150ans</i>		(*25.08)	4.54	5.83	0.29	0.43	4.39	5.06
N-NO3	<i>Hesse36ans</i>	6.11	4.36	4.63	3.22	0.80	0.79	9.58	13.05
	<i>Fou30ans</i>	6.58	10.01	4.12	3.94	1.55	0.63	29.21	25.96
	<i>Fou150ans</i>			3.97	5.33	0.21	0.32	3.87	5.55
P	<i>Hesse36ans</i>	2.04	1.46	1.68	1.36	0.17	0.18	7.65	5.53
	<i>Fou30ans</i>	5.26	11.09	1.81	1.37	0.78	0.28	12.32	13.15
	<i>Fou150ans</i>			2.44	2.22	0.08	0.09	8.28	7.93
S	<i>Hesse36ans</i>	40.44	18.72	7.40	4.71	2.52	1.09	t. a.	t. a.
	<i>Fou30ans</i>	26.81	17.16	6.72	5.62	3.18	1.32	12.36	9.57
	<i>Fou150ans</i>			8.57	8.62	1.01	0.85	13.39	11.81
carbone	<i>Hesse36ans</i>	178.57	75.54	57.84	40.28	14.17	7.79	t. a.	t. a.
	<i>Fou30ans</i>	102.10	89.55	64.16	46.77	21.74	9.38	354.16	272.44
	<i>Fou150ans</i>			68.32	54.88	10.54	9.24	448.20	365.85

ANNEXE FLUX MINÉRAUX ET CARBONÉS : A8 (suite)

FLUX D'ÉLÉMENTS ÉTABLIS POUR LE SOL : résultats des produits entre les flux hydriques et les concentrations chimiques correspondantes

Flux annuels, en éléments minéraux et en carbone, drainés à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur, en 2002 et en 2003, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans* (en kg/ha/an).

Rappel : prélèvements réalisés par TL à Hesse et ZTL à Fougères
t. a. =teneur aberrante

élément	site	sol -10cm		sol -30cm		sol -55cm		sol -80cm		sol -120cm	
		2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003
Ca	<i>Hesse36ans</i>	8.55	4.53	6.89	3.49	6.75	3.76	8.08	3.79	6.07	3.30
	<i>Fou30ans</i>	16.19	10.48	35.77	20.34	41.87	30.95	9.96	5.53	4.35	2.84
	<i>Fou150ans</i>	5.99	4.77	10.69	14.11	11.34	7.00	5.09	3.34	3.53	2.49
Cl	<i>Hesse36ans</i>	23.43	11.79	11.39	6.61	12.10	5.82	27.05	13.08	19.10	10.86
	<i>Fou30ans</i>	49.39	34.01	86.60	55.02	69.14	43.33	122.17	79.12	62.90	33.71
	<i>Fou150ans</i>	65.33	53.49	74.62	60.18	50.00	40.48	38.79	25.18	25.43	17.86
K	<i>Hesse36ans</i>	4.97	2.71	5.24	2.64	5.31	2.86	3.10	1.26	2.84	1.33
	<i>Fou30ans</i>	35.63	19.64	26.42	11.86	89.52	78.98	7.43	4.16	9.72	2.45
	<i>Fou150ans</i>	17.53	17.34	33.25	19.01	43.93	29.84	9.19	4.97	3.27	2.22
Mg	<i>Hesse36ans</i>	4.97	2.63	6.32	3.36	9.25	4.49	11.05	5.23	8.89	4.60
	<i>Fou30ans</i>	7.36	4.42	19.16	10.81	13.58	10.47	17.23	10.32	14.65	8.55
	<i>Fou150ans</i>	6.92	5.08	6.01	6.00	8.77	5.58	5.31	3.73	9.12	5.39
Na	<i>Hesse36ans</i>	7.63	3.98	7.62	4.11	9.50	4.11	24.26	11.68	19.19	11.01
	<i>Fou30ans</i>	19.69	13.86	34.17	19.44	42.06	32.47	46.69	28.80	29.71	17.04
	<i>Fou150ans</i>	25.65	21.59	33.32	27.30	29.40	20.48	16.67	11.68	13.84	8.89
N-NH4	<i>Hesse36ans</i>	2.39	1.32	2.77	3.85	0.85	1.32	6.80	5.77	0.82	1.04
	<i>Fou30ans</i>	11.76	5.37	18.14	6.75	28.98	19.24	4.87	2.09	0.61	0.29
	<i>Fou150ans</i>	2.24	2.00	12.91	7.45	13.32	6.87	10.84	4.90	1.40	0.54
N-NO3	<i>Hesse36ans</i>	0.62	0.37	0.25	0.31	0.22	0.15	0.36	0.30	0.33	0.26
	<i>Fou30ans</i>	20.13	12.80	44.36	19.32	31.23	16.29	3.19	0.88	0.21	0.24
	<i>Fou150ans</i>	3.06	2.29	11.09	10.04	10.69	7.45	2.11	1.44	1.29	0.75
P	<i>Hesse36ans</i>	1.33	0.70	1.21	0.74	1.04	0.69	1.16	0.61	0.91	0.51
	<i>Fou30ans</i>	27.21	13.72	52.36	15.49	93.51	54.59	35.90	23.04	5.13	2.38
	<i>Fou150ans</i>	7.24	4.86	31.94	27.88	64.33	18.42	12.90	6.40	3.06	2.41
S	<i>Hesse36ans</i>	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.
	<i>Fou30ans</i>	14.19	6.90	23.57	15.14	26.99	14.72	28.14	16.09	15.74	10.96
	<i>Fou150ans</i>	10.89	9.28	17.43	16.36	16.34	12.65	28.79	17.55	21.92	13.87
carbone	<i>Hesse36ans</i>	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.	t.a.
	<i>Fou30ans</i>	293.80	173.58	208.81	83.82	892.18	540.15	133.55	91.22	37.12	18.51
	<i>Fou150ans</i>	321.20	236.53	315.52	205.50	547.49	238.19	84.85	48.36	27.85	23.52

A méglia T., Archer P., Cohen M. Valancogne C., Daudet F. A., Dayau S., Cruiziat P. (1999) Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil*, n°207, 155-167.

Attiwill P.M., Adams M.A. (1993) Nutrient cycling in forests. *New Phytol.*, 124, 561-582

Aussenac G. (1968) Interception des précipitations par le couvert forestier. *Ann. Sci. For.*, 29, 369-389

Aussenac G. (1972) Étude de l'évapotranspiration réelle de quatre peuplements forestiers de l'est de la France. *Ann. Sci. For.*, 25, 135-156

Aussenac G. (1975) Couvert forestiers et facteurs de climat : leurs interactions, conséquences physiologiques chez quelques résineux. Thèse de doctorat, Nancy, 234p.

Aussenac G. (1978) La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers. *Rev. For. Fr.*, vol. XXX, n°2, 103-114

Aussenac G. (1985) Le potentiel hydrique de l'arbre. Une donnée essentielle pour la compréhension de l'écophysiologie des essences forestières. *Science du Sol*, vol.4, 217-226

Aussenac G. (2000) Interactions between forest stands and microclimate : ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Ann. Sci. For.*, 57, 287-301.

Aussenac G., Ducrey M. (1977) Étude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb) de l'est de la France. I. Analyse des profils microclimatiques et des caractéristiques anatomiques et morphologiques de l'appareil foliaire. *Ann. Sci. For.*, 34, 4, 265-284

Aussenac G., Granier A. (1978) Quelques résultats de cinétique journalière du potentiel de sève chez les arbres forestiers. *Ann. Sci. For.*, 35, 1, 19-32.

Aussenac G., Boulangeat C. (1980) Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus sylvatica* L.) et de résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.). *Ann. Sci. For.*, 37, 91-107

Aussenac G., Levy G. (1983) Influence du dessèchement du sol sur le comportement hydrique et la croissance du chêne pédonculé (*Quercus pedunculata* Ehrh.) et du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) cultivés en cases de végétation. *Ann. Sci. For.*, 40, 3, 251-264.

Aussenac G., Levy G. (1992) Les exigences en eau du frêne (*Fraxinus excelsior* L.). *Rev. For. Fr.*, n° spécial, XLIV, 32-38.

Baba M., Okazaki M. (1998) Acidification in nitrogen-saturated forested catchment. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44, 4, 513-525.

Bachelard D., Robain H. (1985) Contribution à l'étude des sols de la forêt de Fougères. Analyse structurale. Caractérisation physique et chimique de certains volumes pédologiques. Mémoire de DEA, Rennes, SDS 367, 129p., 1carte

Badeau V. (1995) Étude dendroécologique du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole. Thèse de l'université Henri Poincaré Nancy I, 224p. + annexes.

- Badeau V. (1998)** Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers- Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. Les cahiers du DSF, 5-1998, Min. Agri. Pêche, DERF, Paris, 211p. (ISSN 1270-9417).
- Baize D. (2000)** Guide des analyses en pédologie. Édition INRA, Paris, 2^{ème} édition, 257p.
- Baize D., Jabiol B. (1995)** Guide pour la description des sols. Édition INRA, Paris, 2^{ème} édition, 375p.
- Bakker M., 1998)** Effet des amendements calciques sur les racines fines de chêne (*Quercus petraea* et *robur*) : conséquences des changements dans la rhizosphère. Thèse de l'université Henri Poincaré Nancy I, 144p. + publications.
- Balsberg Pålsson A. M. (1992)** Influence of nitrogen fertilization on minerals, carbohydrates, amino acids and phenolic compounds in beech (*Fagus sylvatica* L.) leaves. *Tree Physiol.*, 10, 93-10
- Bartelink H.H., (1997)** Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L.) *Ann. Sci. For.* 54, 39-50.
- Bauerle W.L., Hinckley T.M., Cermak J., Kucera J., Bible K. (1999)** The canopy water relations of old-growth Douglas-fir trees. *Trees*, 13, 211-217.
- Beier C. (1998)** Water and élément fluxes calculated in a sandy forest soil taking spatial variability into account. *Forest Ecology and Management* 101, 269-280
- Biron Ph. (1994)** Le cycle de l'eau en forêt de moyenne montagne : flux de sève et bilans hydriques stationnels (bassin versant du Strengbach à Aubure - Hautes Vosges). Thèse université de Strasbourg I, 244p.
- Bolte A., Rahmann T., Kuhr M., Pogoda P., Murach D., Gadow K.V. (2004)** Relationships between tree dimension and coarse root biomass in mixed stands of european beech (*Fagus sylvatica* L.) and norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) *Plant and Soil*, 264, 1-11
- Bonneau M. (1995)** Fertilisation des forêts dans les pays tempérés. Édition ENGREF Nancy, 367p.
- Bonneau M., Dambrine É., Dupouey J.-L., Lefèvre Y., Thimonier A. (1991a)** Appauvrissement rapide des sols forestiers dans le nord-est de la France. Les cahiers du DSF, 1-1997, (La santé des forêts [1996]), 63-66 Min. Agri. Pêche, DERF, Paris, 211p.
- Bonneau M., Dambrine É., Nys C., Ranger J. (1991b)** Apports acides et cycle des cations dans des pessières du nord-est. Intérêt de bilans saisonniers. *Science du sol*, 29, 2, 125-145
- Bonneau M., Souchier B. (1994)** - Sous la direction de Duchaufour P. et Souchier B.- Pédologie. Tome 2 : constituants et propriétés du sol. Édition Masson, 481p.
- Borken W., Matzner E. (2004)** Nitrate leaching in forest soils: an analysis of long-term monitoring sites in Germany. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 167, 277-283.
- Bouriaud O. (2003)** Analyse fonctionnelle de la productivité du hêtre : Influences des conditions de milieu, de la structure du peuplement et du couvert, effets de l'éclaircie. Thèse de doctorat École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts-Nancy 253 p + annexes

- Bouriaud O., Soudani K., Bréda N. (2003)** Leaf area index from litter collection : impact of specific leaf area variability within a beech stand. *Can. J. Remote Sensing* 29, 3, 371-380
- Braun M., Dieffenbach A., Matzner E. (2001)** Soil solution chemistry in the rhizosphere of beech (*Fagus silvatica* L.) roots as influenced by ammonium supply. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 164, 271-277.
- Bréda N. (1994)** Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessile (*Quercus petraea*) et pédonculé (*Quercus robur*) en conditions naturelles; effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie. Thèse de l'université Henri Poincaré Nancy I, 59p. + publications.
- Bréda N. (1999)** L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Rev. For. Fr.*, LI, 2, 135-150
- Bréda N., Cochard H., Dreyer E., Granier A. (1993)** Water transfert in a mature oak stand (*Quercus Petraea*) : seasonal evolution and effects of a severe drought. *Can. J. For. Res.*, 23, 1136-1143.
- Bréda N., Granier A., Barataud F., Moyne C. (1995)** Soil water dynamics in an oak stand. Part I. Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant and Soil*, vol 172, 17-27
- Bréda N., Granier A. (1996)** Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Ann. Sci. For.* 53, 521-536.
- Bréda N., Peiffer M. (1999)** Étude du bilan hydrique des chênaies de la forêt domaniale de la Harth (Haut-Rhin) et impact des épisodes de sécheresse sur la croissance radiale des chênes. Rapport scientifique - convention ONF/Inra juillet 1999.
- Bréda N., Lefèvre Y., Badeau V. (2002a)** Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation. *La Houille Blanche*, n°3, spécial « Forêts et Eau », 24-32.
- Bréda N., Soudani K., Bergonzini J.-C. (2002b)** Mesure de l'indice foliaire en forêt. ECOFOR, ISBN 2-914770-02-2, 157p.
- Bréda N., Granier A., Aussenac G. (2004)** La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysologique et influence sur les arbres forestiers. *Rev. For. Fr.*, LVI, 2, 109-131
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darthout R., Jamagne M. (1996)** Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente. *Étude et Gestion des Sols*, 3, 1, 27-40.
- Brumme R., Leimcke U., Matzner E. (1992)** Interception and uptake of NH₄ and NO₃ from wet deposition by above-ground parts of young beech (*Fagus silvatica* L.) trees. *Plant and Soil*, 142, 273-279
- Bultot F., Dupriez G. L., Boudeux A. (1972)** Interception de la pluie par la végétation forestière. Estimation de l'interception journalière à l'aide d'un modèle mathématique. *J. Hydrol.*, 17, 192-223.
- Caillier M. (1977)** Étude chronoséquentielle des sols sur terrasses alluviales de la Moselle Cgénèse et évolution des sols lessivés glossiques. Thèse de l'université de Nancy I, 87p. + annexes.

- Caillier M., Guillet B., Gury M. (1986)** Étude d'une chronoséquence de sols sur terrasses alluviales dans l'est de la France – vallée de la Moselle. *Geoderma*, 37, 233-253.
- Calder I.R. (1996)** Rainfall interception and drop size-development and calibration of two-layer stochastic interception model. *Tree Physiology*, 16, 727-732.
- Cantù S.I., Okumura T. (1996)** Rainfall partitioning in a mixed white oak forest with dwarf bamboo undergrowth. *Journal of Environmental Hydrology* - <http://www.hydroweb.com>.
- CarboEurope IP (integrated project). (2004)** <http://www.carboeurope.org>.
- Carlier G., Peltier J.P., Gielly L. (1992)** Comportement hydrique du frêne (*Fraxinus excelsior* L) dans une formation montagnarde mésoxérophile. *Ann. Sci. For.*, 49, 207-223.
- Carlyle-Moses D.E., Price A.G. (1999)** An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of hydrology*. 214, 103-110.
- Caubel V. (2001)** Influence de la haie de ceinture de fond de vallée sur les transferts d'eau et de nitrate. Thèse de l'école nationale supérieure agronomique de Rennes, 156p.
- Chang S.-C., Matzner E. (2000)** The effect of beech stemflow on spatial patterns of soil solution chemistry and seepage fluxes in a mixed beech/oak stand. *Hydrological processes*, 14, 135-144.
- Chen J.Y., Tang C.Y., Sakura Y., Kondoh A., Shen Y.J., Song X.F. (2004)** Measurement and analysis of the redistribution of soil moisture and solutes in a maize field in the lower reaches of the Yellow River. *Hydrological processes*, 18, 2263-2273.
- Choisnel E. (1992)** Le calcul du bilan hydrique du sol : options de modélisation et niveaux de complexité. *Science du sol*, 30, 1, 15-31
- Clemensson-Lindell A. (1994)** Triphenyltetrazolium chloride as an indicator of fine-root vitality and environmental stress in coniferous forest stands : applications and limitations *Plant and Soil*, vol 159, 297-300.
- Colin-Belgrand M., Dambrine É., Bienaimé S., Nys C., Turpault M.-P. (2003)** Influence of tree roots on nitrogen mineralization. *Scand. J. For. Res.*, 18, 260-268.
- Côté B., Hendershot W. H., Fyles J. W., Roy A. G., Bradley R., Biron P. M., Courchesne F. (1998)** The phenology of fine root growth in a maple-dominated ecosystem: relationships with some soil properties. *Plant and Soil* 201, 59-69.
- Côté B., Bélanger N., Courchesne F., Fyles J. W., Hendershot W. H. (2003)** A cyclical but asynchronous pattern of fine root and woody biomass production in a hardwood forest of southern Quebec and its relationships with annual variation of temperature and nutrient availability. *Plant and Soil*, 250, 49-57.
- Cronan C. S. (1991)** Differential adsorption of Al, Ca, and Mg by roots of red spruce (*Picea rubens* Sarg.). *Tree Physiology*, 8, 227-237.
- Cruziat P., Cochard H., Améglio T. (2002)** Hydraulic architecture of trees : main concepts and results. *Ann. For. Sci.*, 59, 723-752.
- Dambrine É., Bonneau M., Ranger, J., Mohamed A.D., Nys C. & Gras F. (1995)**: Cycling and budgets of acidity and nutrients in Norway spruce stands in northeastern France and

Forest decline and atmospheric deposition effects in the french mountains. Berlin, Heidelberg, New-York : Springer : 233-258.

Dambrine, É., Le Goaster, S., Ranger, J. (1991) Croissance et nutrition minérale d'un peuplement d'épicéa sur sol pauvre. II. Prélèvement racinaire et translocation d'éléments minéraux au cours de la croissance. *Acta oecol., Oecol. Plant.*, 12, 6 : 791-808.

Dieffenbach A., Göttlein A., Matzner E. (1997) *In-situ* soil chemistry in an acid forest soil as influenced by growing roots of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) *Plant and Soil*, 192, 57-61

Dignac M.-F., Kögel-knabner I., Kerstin M., Matzner E., Knicker H. (2002) Chemistry of soil organic matter as related to C:N in Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) floors and mineral soils *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 165, 281-289.

Donovan L.A., Linton M.J., Richards J.H. (2001) Predawn plant water potential does not necessarily equilibrate with soil water potential under well-watered conditions. *Öecologia*, 129, 328-335

Donovan L.A., Richards J.H., Linton M.J. (2003) Magnitude and mechanisms of disequilibrium between predawn plant and soil water potentials. *Ecology*, 84, 2, 463-470

Duchaufour P. (1970) Précis de pédologie. Édition Masson et Cie, 481p.

Duchaufour P. (1983) Sous la direction de Duchaufour Ph. et Souchier B.- Pédologie. Tome 1 : pédogénèse et classification. Édition Masson, 481p.

Ducrey M. (1981) Étude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L. et *Quercus sessiliflora* Salisb.) de l'est de la France. III. Potentialités photosynthétiques à différentes hauteurs dans le peuplement. *Ann. Sci. For.* Vol. 38, 1, 71-86

Dufrêne É., Bréda N. (1995) Estimation of deciduous forest leaf area index using direct and indirect methods *Oecologia*, 104 156-162

Dupouey J.-L., Becker M., Bert D., Cadel G., Lefèvre Y., Picard J.-F., Thimonier A. (1998) Évolution récente des sols, de la végétation et de la productivité des forêts de montagne françaises. *Écologie*, 29, 1/2, 341-349.

Duquesnay A. (1998) Changements de la composition foliaire et de la productivité des hêtraies dans le quart nord-est de la France entre 1970 et 1995. Thèse de l'université Henri Poincaré Nancy I, 222p. + annexes

Ermák J. (1998) Leaf distribution in large trees and stands of the floodplain forest in southern Moravia. *Tree Physiology*, 18, 727-737

Ellsworth D.S., Reich P.B. (1993) Canopy structure and vertical pattern of photosynthesis and related leaf traits in a deciduous forest. *Oecologia*, 96, 169-178

Epron D., Ngao J., Granier A. (2004) Interannual variation of soil respiration in a beech forest ecosystem over a six-year study. *Ann. Sci. For.*, 61, 6, 489-608

Fassnacht K.S., Gower S.T., Norman J.M., McMurtrie R.E. (1994) A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agricultural and For. Meteorol.*, 71, 183-207.

- Feder F. (1998)** Suivi en continu de la dynamique de la solution du sol dans les sols hydromorphes. Les équilibres rédox et les conditions de stabilité des rouilles vertes dans le milieu naturel. DEA national de science du sol - école nationale supérieure agronomique de Rennes, 20p.
- Feder F. (2001)** Dynamique des processus d'oxydo-réduction dans les sols hydromorphes. Monitoring *in situ* de la solution du sol et des phases solides ferrifères. Thèse de l'université de droit, d'économie et des sciences d'Aix-Marseille, 207p.
- Fichter J., Dambrine E., Turpault M.-P., Ranger J. (1998)** Base cation supply in spruce and beech ecosystems of the Strengbach catchment (vosges mountains, N-E France). *Water, Air, and Soil Pollution*, 104, 125-148.
- Flückiger W., Braun S. (1998)** Nitrogen deposition in swiss forests and its possible relevance for nutrient status, parasite attacks and soil acidification. *Environ. Pollut.*, 102, 69-76.
- Forgeard F., Gloaguen J. C., Touffet J. (1980)** Interception des précipitations et apport au sol d'éléments minéraux par les eaux de pluie et les pluviollessivats dans une hêtraie atlantique et dans quelques peuplements résineux de Bretagne. *Ann. Sci. For.*, 37, 1, 53-71.
- Froux F. (2002)** Caractéristiques hydrauliques, régulation stomatique et efficacité d'utilisation de l'eau de quatre espèces de conifères méditerranéens (*Cupressus sempervirens*, *Cedrus atlantica*, *Pinus halepensis* et *Pinus nigra*). Thèse de l'université Henri Poincaré Nancy I, 70p. + publications.
- Garnier E., Laurent G. (1994)** Leaf anatomy, specific mass and water content in congeneric Annual and perennial grass species. *New phytol.*, 128, 725-736.
- Gond V., De Pury D.G.G., Vroustraete F., Ceulemans R. (1999)** Seasonal variations in leaf area index, leaf chlorophyll, and water content ; scaling-up to estimate f_{APAR} and carbon balance in a multiplayer, multispecies temperate forest. *Tree Physiology*, 19, 673-679.
- Goulet F., Bellefleur P. (1986)** Leaf morphology plasticity in response to light environment in deciduous tree species and its implication on forest succession. *Can. J. For. Res.*, 16, 1192-1195.
- Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J.M. (1999)** Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{APAR} , and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.*, 70, 29-51.
- Granier A. (1985)** Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.* 42, 193-200.
- Granier A. (1996)** Évapotranspiration des forêts. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 82, 8, 119-132.
- Granier A., Badeau V. Bréda N. (1995)** Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Rev. For. Fr.* n° sp. 1995, 59-67
- Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S. (1999)** A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological modelling*, 116, 269-283
- Granier A., Biron P., Lemoine D. (2000a)** Water balance transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and For. Meteorol.*, 100, 291-308

Granier A., Ceschia E., Damesin C., Dufrêne E., Epron D., Gross P., Lebaube S., Le Dantec V., Le Goff N., Lemoine D., Lucot E., Ottorini J.-M., Pontailler J.-Y., Saugier B. (2000b) The carbon balance of young Beech forest. *Functional Ecology*, 14, 312-325

Granier A., Aubinet M., Berbigier P., Epron D., Falge E., Gudmundsson J., Jensen N.O. Köstner B., Matteucci G., Pilegaard K., Schmidt M. (2003) Deciduous forests : carbon and water fluxes, balances and ecophysiological determinants. *Ecological Studies*, vol. 163 R. Valentini (Ed.) Fluxes of carbon, water and energy of european forests. ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003.

Granier A., Aubinet M., Berbigier P., Bernhöfer C., Buchmann N., Boy M., Bréda N., Köstner B., Longdoz B., Loustau D., Nys C., Pilegaard K., Pumpanen J., Rambal S., Rannik U., Rebman C., Reichstein M., Vesala T., Wang Q., Tenhunen J. (2004) The drought of 2004 in Western Europe: consequences on forest ecosystems functioning. Article en préparation.

Grimaldi C. (1981) Acquisition de la composition chimique de la solution du sol en fonction des horizons pédologiques. Percolation au laboratoire d'un sol brun acide forestier sur granite (Fougères, massif armoricain). Thèse de l'école nationale supérieure agronomique de Rennes en association avec l'université de Rennes 1, 171p.

Hagen-Thorn A., Callesen I., Armolaitis K., Nihlgård B. (2004) The impact of six european tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land. *Forest Ecology and Management*, 195, 373-384.

Hamdi H., année ? Essai de typologie de fonctionnement hydrique de différents sols par traçage isotopique naturel. N°d'ordre 506. Thèse de l'université de Rennes 1, 160p.+ annexes.

Hashino M., Yao H., Yoshida H. (2002) Studies and evaluations on interception processes during rainfall based on a tank model. *Journal of Hydrology*, 255, 1-11.

Hellkvist J., Richards G. P., Jarvis P. G. (1974) Vertical gradients of water potential and tissue water relations in Sitka spruce trees measured with the pressure chamber. *J. Appl. Ecol.*, 11, 637-667.

Helmisaari H.S. (2000) Fonctionnement of forest ecosystem as an indicator of environmental change. Édition Mälkönen E. Kluwer Academic publishers, Netherlands In "Forest condition in a changing environment – The finnish case", 223-228.

Hodge A. (2004) The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 162, 9-24.

Holst T., Hauser S., Kirchgäßner, Matzarakis A., Mayer H., Scindler D. (2004) Measuring and modelling plot area index in beech stands. *Int. J. Biomteorol.*, 48, 192-201

Hossann C. (1999) Vérification de la qualité du système et des solutions gravitaires dans la phase initiale. Chronoséquence du site atelier de Fougères. DEA de l'université Henri Poincaré Nancy I, 20p.

Huet S. (2004) La hêtraie de plaine, puits ou source de carbone? Cas du site atelier de la forêt de Fougères. Thèse de l'université de Rennes 1, 370p.

Huet S., Forgeard F., Nys C. (2004) Above- and belowground distribution of dry matter and carbon biomass of Atlantic beech (*Fagus sylvatica* L.) in a time sequence. *Ann. For. Sci.*, 61, pp. 683-694.

IPCC (intergovernmental panel on climate change). (2001) Rapport scientifique annuel. <http://www.ipcc.ch>.

Jobbágy E.G., Jackson R.B. (2001) The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53, 51-77.

Jose S., Gillespie R. (1997) Leaf area-productivity relationships among mixed species hardwood forest communities of the central Hardwood region. *Forest Science*, 43, 56-64.

Jussy J.-H., Ranger J., Bienaimé S., Dambrine É. (2004) Effects of a clear-cut on the *in situ* nitrogen mineralisation and the nitrogen cycle in a 67-year-old douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) plantation. *Ann. For. Sci.*, 61, 397-408.

Karroum M. (2002) Devenir des bipolymères (lignine et polysaccharides) et constitution d'humus (mull/moder) dans une chronoséquence de hêtre (*Fagus sylvatica*), en forêt de Fougères (France). Thèse de l'université d'Orléans, 121p.+ annexes.

Koch A. S., Matzner E. (1993) Heterogeneity of soil and soil solution chemistry under Norway spruce (*Picea abies* Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) as influenced by distance from the stem basis. *Plant and Soil*, 151, 227-237.

Kubiske M.E., Abrams M.D. (1992) Photosynthesis, water relations, and leaf morphology of xeric versus mesic *Quercus rubra* ecotypes in central Pennsylvania in relation to moisture stress. *Can. J. For. Res.*, 22, 1402-1407.

Kuhns M.R., Garrett H.E., Teskey R.O., Hinckley T.M. (1985) Root growth of black walnut trees related to soil temperature, soil water potential, and leaf water potential. *Forest Sci.*, 31, 3, 617-629.

Laclau J.-P. (2001) Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation d'Eucalyptus. Effet du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais ; conséquences pour la gestion des plantations. Thèse de doctorat de l'institut national agronomique, Paris-Grignon : 145 p. + publications.

Laclau J.-P., Ranger J., Nzila J.D., Bouillet J.P., Deleporte P. (2003) Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo. 2. Chemical composition of soil solutions. *For. Ecol. Manage.*, 180, 1-3 : 527-544.

Landmann (G.), coord.- (2004) Observatoire de recherche en environnement « fonctionnement des écosystèmes forestiers » (F-ORE-T).- Rapport 2003 - Ecofor <http://www.gip-ecofor.org>.

Lang S. (1999) Ökophysiologische und anatomische Untersuchungen zum Saftfluss in verschiedenen Splintholzbereichen von *Fagus sylvatica* L. Dissertation Universität Karlsruhe, 162p. + annexes.

Langusch J.-J., Borcken W., Armbruster M., Dise N. B., Matzner E. (2003) Canopy leaching of cations in central european forest ecosystems – a regional assessment *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 166, 168-174.

- Law B.E., Cescatti A., Baldocchi D.D. (2001)** Leaf area distribution and radiative transfer in open-canopy forests : implications for mass and energy exchange. *Tree Physiology*, 21, 777-788
- Le Goff N., Ottorini J. M. (1999)** Effet des éclaircies sur la croissance du hêtre. Interaction avec les facteurs climatiques *Rev. For. Fr.*, n° spécial. Journées scientifiques et techniques. Fonctionnement des arbres et écosystèmes forestiers. Avancées récentes et conséquences sylvicoles, n°2, 355-364.
- Le Goff N., Ottorini J. M. (2001)** Root biomass and biomass increment in a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in north-east France. *Ann. Sci. For.*, 58, 1-13.
- Le Tacon F., Le Tacon Y., Mauron V. Rousseau Y., Bakker M., Bouchard D. (1999)** Fertilisation et mycorhizes. 12p. in Thévenet G. & Joubert A. (éd.) (1999) : Raisonner la fertilisation pour les générations futures. Actes des 4^{ème} Rencontres de la fertilité raisonnée et de l'analyse de terre. Raisonner la fertilisation pour les générations futures. (4 ; 30 novembre – 2 décembre 1999 ; Blois, France). Blois : Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée [Comifer], Groupe d'études Méthodologiques pour l'Analyse des sols [GEMAS] : 211-223.
- Lebaube S. (2001)** Bilan de carbone et croissance du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) en conditions naturelles. Thèse de l'université Henri Poincaré Nancy I, 224p. + annexes.
- Lebaube S., Le Goff N., Ottorini J.-M., Granier A. (2000)** Carbon balance and tree growth in a *Fagus sylvatica* stand. *Ann. For. Sci.*, 57, 49-61.
- Lebourgeois F., Granier A., Bréda N. (2001)** Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers. *Ann. For. Sci.*, 58, 733-754.
- Lebourgeois F., Jabiol B. (2002)** Enracinements comparés du chêne sessile, du chêne pédonculé et du hêtre. Réflexions sur l'autécologie des essences. *Rev. For. Fr.*, LIV, 1, 17-41.
- Lebret M. (2002)** Les humus forestiers en hêtraie de plaine : analyse des facteurs de l'évolution dans une chronoséquence. Thèse de l'université de Rennes 1, 350p.
- Lebret M., Nys C., Forgeard F. (2001)** Litter production in an Atlantic beech (*Fagus sylvatica* L.) time sequence. *Ann. Sci. For.*, 58, 755-768
- Lemoine D. (2000)** Fonctionnement hydrique du hêtre : architecture hydraulique et sensibilité à la cavitation. Thèse de l'université Henri Poincaré Nancy I, 77p. + publications.
- Lemoine D., Cochard H., Granier A. (2002)** Within crown variation in hydraulic architecture in beech (*Fagus Sylvatica* L.) : evidence for stomatal control of xylem embolism. *Ann. For. Sci.*, 59, 19-27.
- Leonardi S., Flückiger W. (1987)** Short-term canopy interactions of beech trees : mineral ion leaching and absorption during rainfall. *Tree physiology*, 3, 137-145.
- Leuschner C., Backes K., Hertel D., Schipka F., Schmitt U., Terborg O., Runge M., (2001)** Drought responses at leaf, stem and fine roots levels of competitive *Fagus silvatica* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. Trees in dry and wet years. *Forest Ecology and Management*, 149, 33-46

Leuschner C., Hertel D., Schmid I., Koch O., Muhs A., Hölscher D. (2004) Stand fine root biomass and fine root morphology in old-growth beech forests as a function of precipitation and soil fertility. *Plant and Soil*, 258, 43-56

Levy G. (1968) Importance des propriétés du sol pour l'enracinement de *Picea excelsa* et de *Pinus sylvestris*. *Ann. Sci. Forest.*, 25, 3, 157-188

Linberg S. E., Bredemeier M., Schaefer D. A., Qi L. (1990) Atmospheric concentrations and deposition of nitrogen and major ions in conifer forests in the United States and Federal Republic of Germany. *Atmospheric Environment*, 24A, 8, 2207-2220.

Linberg S. E., Lovett G. M. (1985) Field measurements of particle dry deposition rates to foliage and inert surfaces in a forest canopy. *Environ. Sci. Technol.*, 19, 3, 238-244.

Linberg S. E., Lovett G. M., Richter D. D., Johnson D. W. (1986) Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. *Science*, 231, 93-192.

Liu W., Fox J. E.D., Xu Z. (2002) Nutrient fluxes in bulk precipitation, throughfall and stemflow in montane subtropical moist forest on Ailao Mountains in Yunnan, south-west China. *Journal of Tropical Ecology* 18, 527-548.

Loustau D., Berbigier P., Granier A. (1992a) Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II. An application of Gash's analytical model of interception. *Journal of Hydrology*, 138, 469-485.

Loustau D., Berbigier P., Granier A., El Hadj Moussa F. (1992b) Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy. *Journal of Hydrology*, 138, 449-467.

Lovett G. M., Linberg S. E., (1984) Dry deposition and canopy exchange in a mixed oak forest as determined by analysis of throughfall. *Journal of Applied Ecology.*, 21, 1013-1027

Lovett G. M., Linberg S. E., (1993) Atmospheric deposition and canopy interactions of nitrogen in forests. *Can. J. For. Res.*, 23, 1603-1616

Lovett G. M., Nolan S. S., Driscoll C.T., Fahey T.J. (1996) Factors regulating throughfall flux in a New Hampshire forested landscape. *Can. J. For. Res.*, 26, 2134-2144.

Marques R. (1996) : Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation de douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) dans les monts du Beaujolais (France). Thèse E.N.G.R.E.F - Institut national de la recherche agronomique de Nancy : 240 p. + annexes.

Marques R., Ranger J., Gelhaye D., Pollier B., Ponette Q., Gædert O. (1996) Comparison of chemical composition of soil solutions collected by zero-tension plate lysimeters with those from ceramic-cup lysimeters in a forest soil. *Eur. J. Soil Sci.*, 47, 3 : 407-417.

Marques R., Ranger J. (1997a) Nutrient dynamics in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) stands of the Beaujolais Mounts (France). 1- Qualitative approach. *Forest Ecology and Management*, 91, 255-277.

Marques R., Ranger J., Villette S., Granier A. (1997b) Nutrient dynamics in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) stands of the Beaujolais Mounts (France). 2- Quantitative approach. *Forest Ecology and Management*, 91, 167-197.

- Matzner E., Chang S.-C. (2000)** The effect of beech stemflow on spatial patterns of soil chemistry and seepage fluxes in a mixed beech/oak stand. *Hydrological Processes*, 14, 135-144.
- Mérot Ph., Gascuel-odoux C., Hamdi H., Curmi P. (1989)** Caractérisation à moyenne échelle du bilan hydrique. Rôle des sols à excès d'eau dans le bilan hydrique d'un bassin. Rapport final – programme Piren eau Rennes 10p + figures.
- Miller E.K., Blum J.D., Friedland A.J. (1993)** Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering rates using Sr isotopes. *Nature*, 362, 438-441
- Minotta G., Pinzauti S. (1996)** Effects of light and soil fertility on growth, leaf chlorophyll content and nutrient use efficiency of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings. *For. Ecol. Manage.* 86, 61-71
- Møller I.S. (2000)** Calculation of biomass and nutrient removal for different harvesting intensities. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 30, 1/2, 29-45.
- Niinemets Ü. (1995)** Distribution of foliar carbon and nitrogen across the canopy of *Fagus sylvatica* : adaptation to a vertical light gradient. *Acta Oecologica*, 16, 5, 525-541.
- Niinemets Ü. (1997)** Role of foliar nitrogen in light harvesting and shade tolerance of four temperate deciduous woody species. *Funct. Ecol.* , 11, 518-531.
- Niinemets Ü., Kull K. (1994)** Leaf weight per area and leaf size of 85 Estonian woody species in relation to shade tolerance and light availability. *For. Ecol. Manage.* 70, 1-10
- Nizinski J., Saugier B. (1989)** Dynamique de l'eau dans une chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) en forêt de Fontainebleau. *Ann. Sci. For.*, 46, 173-186
- Nys C. (1987)** Fonctionnement du sol d'un écosystème forestier. Conséquences des enrésinements. Thèse de l'université Henri Poincaré Nancy I, 207p. + annexes.
- Nys C. (2004)** Observatoire de Recherches en Environnement (ORE) Site atelier de Fougères (35) - Fonctionnement de la hêtraie de plaine. Inra - Rapport de synthèse. Janvier 2004 ONF-GIP-ECOFOR, 101p.
- Osterås A. H., Greger M. (2003)** Accumulation of, and interactions between, calcium and heavy metals in wood and bark of *Picea abies*. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 166, 246-253.
- Ottorini J.M., Le Goff N. (1999)** Aspects quantitatifs et qualitatifs de la biomasse. - Rapport scientifique final (3^{ème} année).- *Convention de recherche ONF-INRA « Étude de la croissance du hêtre sur le plateau lorrain*, 18 p.
- Peiffer M., Granier A., Nys C. (2003)** Comparaison de la transpiration de deux hêtraies de plaine aux échelles de l'arbre et de la parcelle. Les V^{èmes} journées de l'écologie fonctionnelle, centre national de formation forestière (CNFF-ONF), Nancy 2003, poster.
- Peiffer M., Le Goff N., Nys C., Ottorini J. M., Granier A (2005)** Bilan d'eau, de carbone et croissance comparées de deux hêtraies de plaine. *Rev. For. Fr.* (soumis)
- Peñuelas J., Matamala R. (1990)** Changes in N and S leaf content, stomatal density and specific leaf area of 14 plant species during the last three centuries of CO₂ increase. *J. Exp. Bot.*, 41, 1119-1124.

Peñuelas J., Filella I. (2003) Deuterium labelling of roots provides evidence of deep water access and hydraulic lift by *Pinus nigra* in a Mediterranean forest of NE Spain. *Environmental and Experimental Botany*, 49, 201-208.

Pockman W.T., Martinez-Vilalta J., Jackson R.B. (2001) The contribution of deep root functioning to whole-plant water relations and xylem transport in *Juniperus ashei*. <http://www.biology.duke.edu/jackson/pockmanposter.html>

Quentin C., Bigorre F., Granier A., Bréda N., Tessier D. (2001) Étude des sols de la forêt de Hesse (Lorraine). Contribution à l'étude du bilan hydrique. *Étude et gestion des sols*, 8,4, 279-292

Ranger J., Bonneau M. (1984) Effets prévisibles de l'intensification de la production et des récoltes sur la fertilité des sols de forêts. Le cycle biologique en Forêt. *Rev. For. Fr.*, 36, 93-111

Ranger J., Félix C., Bouchon J., Nys C, Ravart M. (1990) Dynamique d'incorporation du carbone et des éléments nutritifs dans un taillis simple de châtaignier (*Castanea sativa* Miller). *Ann. Sci. For.*, 47, 413-433.

Ranger J., Discours D., Mohamed Ahamed D., Moares C., Dambrine É., Merlet D., Rouiller J. (1993) Comparaison des eaux liées et des eaux libres des sols de 3 peuplements d'épicéa (*Picea abies* Karst) des Vosges. Application à l'étude du fonctionnement actuel des sols et conséquences pour l'état sanitaire des peuplements. *Ann. Sci. For.* 50, 425-444.

Ranger J., Turpault M.P. (1999) Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 122, 139-154.

Reich P.B., Walters M.B., Ellsworth D.S. (1991) Leaf age and season influence the relationships between leaf nitrogen, leaf mass per area and photosynthesis in maple and oak trees. *Plant Cell Environ.*, 14, 251-259.

Richter D.D., Markewitz D., Wells C.G., Allen H.L., April R., Heine P.R., Urrego B. (1994) Soil chemical change during three decades in an old-field loblolly pine (*Pinus taeda* L.) ecosystem. *Ecology*, 75, 5, 1463-1473.

Ruf M., Brunner I. (2003) Vitality of tree fine roots: reevaluation of the tetrazolium test. *Tree Physiology*, 23, 257-263.

Rutter A.J., Morton A.J., Robins P.C. 1975) A predictive model of rainfall interception in forests II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. Appl. Ecol.*, 367-380.

Santa Regina I., Tarazona T., Calvo R. (1997) Aboveground biomass in a beech forest and a Scots pine plantation in the Sierra de la Demanda area of northern Spain.- *Annales des Sciences Forestières*, 54, 261-269.

Schmid I., Kazda M. (2001) Vertical distribution and radial growth of coarse roots in pure and mixed stands of *Fagus sylvatica* and *Picea abies*. *Can. J. Res.*, 31, 539-548.

Schwesig D., Kalbitz K., Matzner E. (2000) Mineralization of dissolved organic carbon in mineral soil solution of two forest soils. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 166, 585-593.

Sellin A. (1999) Does pre-dawn water potential reflect conditions of equilibrium in plant and soil water status? *Acta Oecologica*, 20, 51-59.

Snedecor G. W., Cochran W. G. (1957) Statistical Methods, 6^{ème} édition, Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, Library of congress. Catalog card number : 67-21577. Traduction de l'ouvrage réalisée par Boelle H. et Camhaji E. ACTA, Paris, 1971.

Staaf H. (1982) Plant nutrient changes in beech leaves during senescence an influenced bt site characteristics. *CEcol. Plant.*, 3, 161-170

Steingrobe B., Claassen N. (2000) Potassium dynamics in the rhizosphere and K efficiency of crops. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 163, 101-106.

Stevens P. A., Hornung M., Hughes S. (1989) Solute concentrations, fluxes and major nutrient cycles in a mature sitka-spruce plantation in Beddgelert forest, North Wales. *Forest Ecology and Management*, vol. 27, 1, 1-20.

Tessier du Cros E. (1981) Le hêtre. INRA, Paris, 615p.

Thiébaud B., Comps B., Plancheron. (1990) Anatomie des feuilles dans les pousses polycycliques du hêtre européen (*Fagus sylvatica*). *Can. J. Bot.* 68, 2595 – 2606.

Tognetti R., Longobucco A., Miglietta F., Raschi A. (1998) Transpiration and stomatal behaviour of *Quercus ilex* plants during the summer in a Mediterranean carbon dioxide spring. *Plant, Cell and Environment*, 21, 613-622.

Toutain F. (1966) Étude du sol et des eaux de la forêt de Fougères (I. et V.). Thèse de l'université de Paris, 192p. +annexes.

Tyler G., Balsberg Pålson A. M., Bergkvist B., Falkengren-Grerup U., Folkesson L., Nihlgård B., Rühling A., Stjernquist I. (1992) Chemical and biological effects of artificially increased nitrogen deposition to the ground in a swedish beech forest. *Scand. J. For. Res.*, 7, 515-532.

Tyree M.T. (1999) Water relations and hydraulic architecture. *In*: Pugnaire F.I., Valladares F. (Eds.), Handbook of Functional Plant Ecology, Marcel Dekker Inc., New York, USA, 221-268.

Uemura A., Ishida A., Nakano T., Terashima I., Tanabe H., Matsumoto Y. (2000) Acclimatation of leaf characteristics of *Fagus* species to previous-year and current-year solar irradiances. *Tree physiology*, 20, 945-951.

Ulrich E., Lanier M., Combes D. (1998) RENECOFOR-Dépôts atmosphériques, concentrations dans les brouillards et dans les solutions du sol (sous-réseau CATAENAT)-Rapport scientifique sur les années 1993 à 1996. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2-84207-134-4, 135p.

Van Dijk A.I.J.M., Bruijnzeel L.A. (2001a) Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description. *Journal of Hydrology*, 247, 230-238.

Van Dijk A.I.J.M., Bruijnzeel L.A. (2001b) Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system. *Journal of Hydrology*, 247, 239-262.

Van Grinsven H.J.M, Wesselink B.G, Schroeder M., Van Breemen N. (1991) Soil acidification and solute budgets for forested lysimeters in Nordrhein-Westfalen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 154,181-188.

Van Hees A. F.M. (1997) Growth and morphology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings in relation to shading and drought. *Ann. Sci. For.*, 54, 9-18.

Van Vliet-Lanoë, Pellerin J., Helluin M. (1995) Morphogénèse et pédogénèse: les héritages du dernier cycle glaciaire en Forêt de Fougères (Ille-et-Vilaine, France). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 39, 489-510.

Vanseveren J.P., Herbauts J. (1997) Index foliaire, paramètres foliaires et caractéristiques édaphiques stationnelles dans quelques peuplements forestiers de Lorraine belge. *Ann. Sci. For.*, 34, 215-229.

Villette S. (1994) Établissement du bilan hydrique sur une chronoséquence de peuplements de douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco) du Beaujolais. Essai de modélisation; rapport ENESA Dijon, 50p.

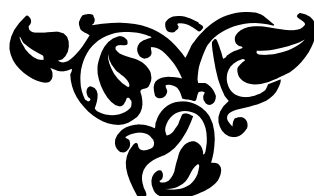
Vrugt J.A., Dekker S., Bouten W. (2003) Identification of rainfall interception model parameters from measurements of throughfall and forest canopy storage. *Water Resour. Res.*, 39, 9, 1251, doi:10.1029/2003WR002013, 2003.

Wakamatsu T., Sato K., Takahashi A. Shibata H. (2001) Proton budget for a Japanese cedar forest ecosystem. *Water, Air, and soil Pollution*, 130, 721-726.

Wang Z., Göttlein A., Bartonek G. (2001) Effects of growing roots of norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and european beech (*Fagus sylvatica* L.) on rhizosphere soil solution chemistry. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 164, 35-41.

Wang Z., Göttlein A., Rodenkirchen H. (2003) Soil exploration, nutrient partitioning, and nutrient efficiency of beech and spruce seedlings in a rhizotrone experiment *J. Plant. Nutr. Soil Sci.*, 166, 390-391.

Zeng N., Shuttleworth J. W., Gash J.H.C. (2000) Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis *Journal of hydrology*. 228, 228-241.



PARTIE I CHAPITRE I

LES SITES D'ÉTUDES : SITUATION GÉNÉRALE ET PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES SOLS

- Figure 1** Classification des sols, de différents prélèvements en profondeur, de Hesse, *Fou30ans* et *Fou150ans*, selon le diagramme des textures de Jamagne (1967 modifié depuis). (Données Quentin et al., 2001 et C. Nys). **p. 14**
- Figure 2** Représentation des proportions texturales ordonnées verticalement selon des profondeurs d'échantillonnage de sol croissantes dans quatre fosses pour *Fou150ans*, deux fosses pour *Fou30ans* et deux fosses pour *Hesse36ans*. (D'après des données de Quentin et al., 2001 et C. Nys). **p. 16**
- Figure 3** Profil du pHeau en fonction de la profondeur pour Hesse, *Fou30ans* et *Fou150ans*. On a tracé la droite de pH=4.5. (D'après des données de Quentin et al., 2001 et C. Nys). **p. 18**
- Figure 4** Profils de la teneur en carbone organique Corg, en azote N et du rapport C/N en fonction de la profondeur pour Hesse, *Fou30ans* et *Fou150ans*. On a tracé la profondeur repère à 122.5 cm de la surface. (D'après des données de Quentin et al., 2001 et C. Nys). **p. 19**
- Figure 5** Évolution du rapport C/N des sols très superficiels (premier prélèvement du profil) en fonction du type d'humus observé à Hesse et sur les sites *Fou30ans* et *Fou150ans*. (D'après des données de Quentin et al., 2001 et C. Nys). **p. 20**
- Figure 6** Comparaison de la relation établie entre pH_{eau} et ① somme des cations basiques, ② à ⑤ cations basiques Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, ⑥ ions acides (=CEC-S), cations ⑦ H⁺ et ⑧ Al³⁺, exprimés en pourcentage de la CEC, à Hesse, pour *Fou30ans* et *Fou150ans*. Pour les sols de Hesse, H⁺ et Al³⁺ ne sont pas indiqués. Les symboles en blanc représentent les sols au-dessus de 122.5 cm et les symboles en noir les sols en-dessous des 122.5 cm, à Fougères. **p. 21**
- Diagramme 1** Taux de saturation moyen déterminés pour Hesse, *Fou30ans* et *Fou150ans* à des profondeurs de sol comparables et répartis dans un diagramme combinant classes de saturation et profondeurs de sol. **p. 23**

PARTIE I CHAPITRE II LE COUVERT FORESTIER

- Figure 7** Évolution de l'interception du rayonnement global au cours des saisons de végétation, pour *Hesse36ans* et *Fou30ans*, en 2002 (en haut) et 2003 (en bas). **p. 32**
- Figure 8** Courbes des moyennes mobiles du rayonnement global intercepté sur *Hesse36ans* et *Fou30ans* en fonction des jours, au début des saisons de végétation 2002 et 2003. Les interceptions du rayonnement du jour 140 à 160 sont moyennées (In moy) et représentées horizontalement sur le graphique, l'intersection avec la moyenne mobile fixe la date de la fin de la mise en place foliaire. La début du débourrement est rappelée (jour 113) . **p. 33**
- Figure 9** Indice de surface foliaire mesuré en 2002 et 2003 sur les placettes d'étude avec le capteur LAI-2000. Les placettes éclaircies entre 2002 et 2003 sont indiquées par un astérisque. **p. 35**
- Figure 10** Relations établies entre l'indice foliaire du peuplement (LAI) et la longueur, la largeur, la largeur moyenne, la surface, la masse et la surface spécifique des feuilles de litière. **p. 35**
- Figure 11** Relations établies entre l'indice foliaire du peuplement (LAI) et la longueur, la largeur, la largeur moyenne, la surface, la masse et la surface spécifique des feuilles de lumière. **p. 38**
- Figure 12** Relations établies entre l'indice foliaire du peuplement (LAI) et la longueur, la largeur, la largeur moyenne, la surface, la masse et la surface spécifique des feuilles d'ombre. **p. 38**
- Figure 13** Masse spécifique des feuilles de litière en fonction de l'âge des peuplement s **p. 40**
- Figure 14** Proportions d'eau arrivant au sol directement et ruissellant sur les troncs en fonction de la pluie incidente pour *Hesse36ans* et *Fou30ans*. **p. 41**
- Figure 15** Densité de flux de sève en fonction de la circonférence pour deux couvert fermés, *Hesse36ans* en 1997 et *Fou30ans* en 2002, et un couvert succédant à une éclaircie réalisée en 1999, *Hesse36ans* en 2002. **p. 42**
- Figure 16** Mesures de flux de sève réalisées sur des tiges de différents diamètres (Hesse n=10, Fougères n=7) les 23 et 24 juin 2002. **p. 43**
- Figure 17** Transpiration des peuplements obtenue à partir des mesures du flux de sève du 26 juin au 3 juillet 2002 à Hesse et Fougères. **p. 44**
- Figure 18** Transpiration modélisée au pas de temps journalier comparée à la transpiration du peuplement obtenue à partir des mesures du flux de sève du 16 mai au 22 août 2002 à Fougères. **p. 44**

PARTIE I CHAPITRE III LA RÉSERVE UTILE DES SOLS

- Figure 19** Densité racinaire moyenne en fonction de la profondeur et selon 5 classes de diamètre en mm (<3, 3-5, 5-10, 10-20 et >20) pour *Hesse36ans*. p. 51
- Figure 20** Densité racinaire moyenne en fonction de la profondeur et selon 5 classes de diamètre en mm (<3, 3-5, 5-10, 10-20 et >20) pour *Fou30ans* (à droite) et pour *Fou150ans* (à gauche). p. 51
- Figure 21** Cartographie centimétrique du nombre de racines fines (<3mm) selon les classes 0, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-41 pour *Hesse36ans* (en haut à gauche) pour *Fou30ans* (en haut à droite) pour *Fou150ans* (en bas à droite). p. 53
- Figure 22** Cartographie centimétrique des glosses p. 53
- Figure 23** Variation de la densité racinaire établie en 2003 en fonction de la densité apparente, de 8 emplacements, mesurée par gammamètre en 1996 (tubes n°60 à n°67, 1996), pour *Hesse36ans*. Et, variation de la densité racinaire établie en 2003 en fonction de la densité apparente mesurée au cylindre en 2003, pour *Fou30ans* et pour *Fou150ans*. On a indiqué la régression linéaire et le coefficient de détermination établis sur l'ensemble des données. p. 55
- Figure 24** Profils de densité racinaire (2003) et de densité apparente du tube n° 64 (gammamètre, 1996) en fonction de la profondeur, sur le site *Hesse36ans*. p. 55
- Figure 25** Humidité volumique journalière moyenne, mesurée par des sondes TDR, au pas de temps horaire, au cours des années 2002 et 2003, à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur, dans le sol de *Hesse36ans*. Les épisodes pluvieux sont représentés par des barres verticales. p. 56
- Figure 26** Comparaison de l'évolution journalière de la fraction disponible de réserve en eau de 5 tranches de sol de *Hesse36ans* : 0-10, 10-30, 30-55, 55-80 et 80-120 cm. Les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été déterminées à partir des mesures TDR de l'année 2003. Les épisodes pluvieux sont représentés par des barres verticales. La date de la fin de mise en place foliaire est représentée par un trait vertical, jour 148. p. 57
- Figure 27** Comparaison du profil racinaire et de l'évolution de l'humidité volumique au cours de l'année 2003 à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur, pour *Hesse36ans*. p. 57
- Figure 28** Comparaison de l'évolution journalière de la fraction disponible de réserve en eau de 5 tranches de sol de *Fou30ans* 0-10, 10-30, 30-55, 55-80 et 80-120 cm. Les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été déterminées à partir des mesures TDR de l'année 2003. Les épisodes pluvieux sont représentés par des barres verticales. La date de la fin de mise en place foliaire est représentée par un trait vertical, entre les jours 146 et 147. p. 59
- Figure 29** Comparaison de l'évolution journalière de la fraction disponible de réserve en eau de 8 tranches de sol de *Fou150ans* : 0-10, 10-30, 30-55, 55-80, 80-120, 120-160, 160-200, 200-250 cm. Les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement ont été déterminées à partir des mesures TDR de l'année 2003. Les épisodes pluvieux sont représentés par des barres verticales. La date de la fin de mise en place foliaire est représentée par un trait vertical, entre les jours 146 et 147. p. 59
- Figure 30** Variation moyenne de la réserve journalière en eau, établie pour 4 épisodes de 2003 et en distinguant 3 tranches de sol (0-55, 55-80, 80-120 cm) pour *Hesse36ans*. Dans chacun des épisodes, les dates exclues sont des données manquantes. p. 60
- Figure 31** Évolution saisonnière du potentiel de base moyen par arbre, établi par des mesures sur des rameaux foliaires échantillonnés à différentes hauteurs dans la couronne des hêtres de *Hesse36ans*. p. 61
- Figure 32** Évolution du potentiel de base moyen de *Hesse15ans* et *Hesse36ans* en fonction du temps. On a indiqué les précipitations journalières. p. 62
- Figure 33** Évolution des potentiels de base 1) mesurés en 2003 pour les hêtres de *Hesse36ans* et *Hesse15ans*, 2) établis par l'ajustement mathématique Ψ_b , 3) mesurés en 1996 pour les hêtres de *Hesse36ans* en fonction de la réserve utile relative du sol. p. 63

PARTIE II CHAPITRE I LE BILAN HYDRIQUE

- Figure 34** Densité apparente en fonction de l'humidité pondérale à différentes profondeurs p. 71 pour les sols du *Fou30ans* détermination expérimentale des paramètres *ah* et *bh*, pour *Fou30ans*.
- Figure 35** Densité apparente en fonction de l'humidité pondérale à différentes profondeurs p. 71 pour les sols du *Fou150ans* détermination expérimentale des paramètres *ah* et *bh*, pour *Fou150ans*.
- Figure 36** Moyenne des écarts de l'eau au sol simulée et mesurée en fonction des classes p. 76 0-4, 4-10, 10-19, >19mm de pluie mesurée au sol, représentées par leur valeur moyenne, pour *Fou30ans* et pour *Hesse36ans*, séparément pour les estimations pluviomètres et gouttières. Le nombre de données, n, ordonné de la gauche vers la droite correspond à l'effectif des classes de pluie au sol de *Hesse36ans*-pluviomètre, *Hesse36ans*-gouttière et *Fou30ans*.
- Figure 37** Écart moyen entre simulations et mesures de pluie au sol en fonction de la pluie p. 77 incidente. On a établi les moyennes par classes de pluie mesurée en distinguant les intensités 0-4mm, 4-10mm, 10-20mm et >19mm. Les mesures sont réalisées par collier et gouttière sur *Hesse36ans* ; n indique le nombre de données par classe.
- Figure 38** Écart relatif moyen entre simulations et mesures d'écoulement le long des p. 78 troncs en fonction de la classe de pluie écoulée le long des troncs de *Hesse36ans* et de *Fou30ans*. Les classes distinguent les intensités 0-1 mm, 1-6 mm et >6 mm ; n, le nombre de données par classe, est précisé pour *Hesse36ans* et puis pour *Fou30ans*.
- Figure 39** Relations linéaires $P_{tronc} = a \times P_i$ établies pour estimer les valeurs des données p. 79 manquantes d'écoulements le long des troncs pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*.
- Figure 40** Variations de la pluie incidente (P_i), de la pluie au sol simulée (P_{sol}) après p. 80 cumul mensuel et de la hauteur d'eau relevée chaque mois par les écoulements le long des troncs (E_c) en 2002 et 2003 pour *Hesse36ans*.
- Figure 41** Variations de la pluie incidente (P_i), de la pluie au sol simulée (P_{sol}) après p. 80 cumul mensuel et de la hauteur d'eau relevée chaque mois par les écoulements le long des troncs (E_c) en 2002 et 2003 pour *Fou30ans*.
- Figure 42** Variations de la pluie incidente (P_i), de la pluie au sol simulée (P_{sol}) après p. 80 cumul mensuel et de la hauteur d'eau relevée chaque mois par les écoulements le long des troncs (E_c) en 2002 et 2003 pour *Fou150ans*.
- Figure 43** Évolution des hauteurs d'eau drainées par période mensuelle en 2002 et 2003 p. 81 pour *Hesse36ans*, pour *Fou30ans* et pour *Fou150ans* à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur.
- Figure 44** Cumul de la hauteur d'eau simulée quotidiennement pour le drainage à 10, 30, p. 83 55, 80, 120, 160 et au-delà de 160 cm de profondeur, pour la pluie au sol et pour la transpiration additionnée de l'évapotranspiration en fonction du temps, pour *Hesse36ans* en 2002 (à gauche) et 2003 (à droite).
- Figure 45** Différence relative entre ETP et ETR cumulées quotidiennement en fonction du p. 84 temps, en 2002 (trait gras) et 2003 (trait fin), pour *Hesse36ans*. On a indiqué les dates de débourrement et de chute des feuilles, par un trait pointillé vertical jour 113 et 296 en 2002, jour 113 et 314 en 2003.

PARTIE II CHAPITRE II RÉSULTATS DES ANALYSES MINÉRALES ET CARBONÉES

- Figure 46** Volume moyen collecté par les lysimètres sans tension (ZTL) et les lysimètres p. 93 avec tension (TL) en fonction de la profondeur et des différentes campagnes de terrain réalisées en 2002 et 2003 pour *Fou30ans*.
- Figure 47** Comparaison des concentrations des eaux collectées par ZTL en fonction des p. 93 eaux collectées par TL pour le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium. Les profondeurs de 10 cm, 30 cm, 55 cm, 80 cm et 120 cm ont été distinguées et la droite 1:1 a été représentée.

- Figure 48** Évolution de la concentration mensuelle de calcium au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements des sites sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL. **p. 96**
- Figure 49** Évolution de la concentration mensuelle de magnésium qu cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL. **p. 96**
- Figure 50** Évolution de la concentration mensuelle de potassium au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL. **p. 97**
- Figure 51** Évolution de la concentration mensuelle de sodium au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL. **p. 97**
- Figure 52** Évolution de la concentration mensuelle de phosphore au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL. **p. 98**
- Figure 53** Évolution de la concentration mensuelle de chlore au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL. **p. 98**
- Figure 54** Évolution de la concentration mensuelle de N-NO₃ au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL. **p. 99**
- Figure 55** Évolution de la concentration mensuelle de N-NH₄ au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées à -40kPa avec les TL et par gravité avec les ZTL. **p. 99**
- Figure 56** Évolution de la teneur mensuelle de carbone au cours des années 2002 et 2003 pour des solutions prélevées dans le peuplement (à gauche) et dans le sol (à droite). Les prélèvements sont présentés, du haut vers le bas, pour *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. Les données estimées sont les valeurs moyennes 2002-2003. Les solutions de sol sont prélevées par gravité avec les ZTL. **p. 100**

PARTIE II CHAPITRE III

COUPLAGE DES FLUX HYDRIQUES AVEC LES TENEURS EN MINÉRAUX ET CARBONE

- Figure 57** Comparaison des flux annuels (en kg/ha/an) de Ca, Mg, K et Na en 2002 et 2003. Les entrées dans le sol par les pluies incidentes, pluviollessivats, écoulements le long des troncs et litière sont représentées en positif et les sorties par drainage à 10, 30, 55, 80 et 120 cm de profondeur sont représentées en négatif. **p. 105**
- Figure 58** Proportion relative du flux de calcium, du flux de magnésium, du flux de potassium et du flux de sodium établie, en rapportant chacun de ces flux annuels sur la somme des quatre. Ces calculs ont été réalisés pour la pluie incidente, les pluviollessivats, les écoulement le long des troncs et la solution de litière, en montrant pour les trois sites d'étude les années 2002 et 2003. **p. 107**
- Figure 59** Proportion relative du flux de N-NH₄ et du flux de N- NO₃, établie en rapportant le flux annuel de chacun des composés azotés sur la somme des deux. Ces calculs ont été réalisés pour la pluie incidente, les pluviollessivats, les écoulement le long des troncs et la solution de litière, en montrant pour les trois sites d'étude les années 2002 et 2003. **p. 108**
- Figure 60** Évolution du dépôt cumulant les composés azotés N-NH₄ et N-NO₃, au-dessus du couvert du Fou30ans, établi par des collectes mensuelles de 1998 à 2003. Le dépôt annuel établit à partir d'une valeur estimée pour les périodes n° 25 et n°26 est indiqué. **p. 109**
- Figure 61** Proportions relatives du flux annuel de calcium, du flux annuel de magnésium, du flux annuel de potassium et du flux annuel de sodium rapporté à la somme des quatre flux annuels, en fonction de l'année, de la profondeur et du site. **p. 110**
- Figure 62** Comparaison du profil de densité racinaire (trait) avec la somme des flux annuels de calcium + potassium, rapportée à la somme des flux annuels de calcium + potassium + magnésium + sodium. Les flux établis en 2002 (cercle) et 2003 (croix) aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120 cm, sont distingués pour chacun des sites, *Fou150ans*, *Fou30ans* et *Hesse36ans*. **p. 112**
- Figure 63** Comparaison du profil de racine fine (trait) avec le flux annuel d'un élément, rapporté à la somme des flux annuels de calcium + potassium + magnésium + sodium. Les flux établis en 2002 (cercle) et 2003 (croix) aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120cm, sont présentés, pour chacun des sites, du haut vers le bas, selon l'ordre *Hesse36ans*, *Fou30ans* et *Fou150ans*. **p. 114**
- Figure 64** Comparaison du profil de densité racinaire (trait) avec le rapport établi entre le flux annuel de N-NO₃ sur la somme des flux annuels de N-NO₃ et N-NH₄. Les flux établis en 2002 (cercle) et 2003 (croix) aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120cm, sont distingués pour chacun des sites, *Fou150ans*, *Fou30ans* et *Hesse36ans*. **p. 116**
- Figure 65** Comparaison du profil de densité racinaire (trait) avec le rapport établi entre le flux annuel de N-NH₄ sur la somme des flux annuels de N-NO₃ et N-NH₄. Les flux établis en 2002 (cercle) et 2003 (croix) aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120cm, sont distingués pour chacun des sites, *Fou150ans*, *Fou30ans* et *Hesse36ans*. **p. 116**

DISCUSSION GÉNÉRALE

- Figure 66** Transpirations simulées (trait) et mesurées (cerle rouge) à *Hesse36ans* et *Fou30ans*, en 2002. **p. 118**
- Figure 67** Comparaison de l'évolution de l'humidité volumique simulée par le modèle, mesurée avec la sonde à neutron aux profondeurs de 10, 30, 55, 80,120, 160 et 200 cm et mesurée avec un système TDR aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120 cm pour *Hesse36ans*. Cercle rouge: mesure TDR, triangle bleu : sonde à neutron, trait noir : simulation. **p. 120**
- Figure 68** Comparaison de l'évolution de l'humidité volumique simulée par le modèle et mesurée avec un système TDR aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120 cm pour *Fou30ans*. Cercle rouge: mesure TDR, trait noir : simulation. **p. 121**
- Figure 69** Comparaison de l'évolution de l'humidité volumique simulée par le modèle et mesurée avec un système TDR aux profondeurs de 10, 30, 55, 80 et 120 cm et 160 cm, pour *Fou150ans*. Cercle rouge: mesure TDR, trait noir : simulation. **p.122**
- Figure 70** Humidités volumiques journalières moyennes et écarts-types de chaque sonde TDR située dans le *Fou150ans* à 10, 30 et 55 cm de profondeur pour 2002 et 2003. Les couleurs rouge et rose correspondent à une fosse, les gris et noir à une autre. **p. 124**
- Figure 71** Humidités volumiques journalières moyennes et écarts-types de chaque sonde TDR située dans le *Fou150ans* à 80, 120 et 160 cm de profondeur pour 2002 et 2003. Les couleurs rouge et rose correspondent à une fosse, les gris et noir à une autre. **p. 125**
- Figure 72** Humidités volumiques journalières moyennes et écarts-types de chaque sonde TDR située dans le *Fou150ans* à 200 et 250 cm de profondeur pour 2002 et 2003. Les couleurs rouge et rose correspondent à une fosse, les gris et noir à une autre. **p. 126**



PARTIE I CHAPITRE I**LES SITES D'ÉTUDES : SITUATION GÉNÉRALE ET PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES SOLS**

Tableau 1	Présentation synthétique des paramètres étudiés et des techniques utilisées sur les trois sites d'études du couplage minéral et hydrique.	p. 12
Tableau 2	Humus selon le site.	p. 13
Tableau 3	Teneurs en carbone, azote et rapport C/N pour Hesse, <i>Fou30ans</i> et <i>Fou150ans</i> à deux profondeurs.	p. 20

PARTIE I CHAPITRE II LE COUVERT FORESTIER

Tableau 4	Échantillonnage de feuilles vertes à Fougères en 2002 et 2003.	p. 28
Tableau 5	Mesures de LAI à Fougères et à Hesse réalisées en 2002 et 2003 en utilisant simultanément deux capteurs (LAI-2000, Li-Cor, Nebraska): i.c.=intervalle de confiance, n= nombre de points de mesure.	p. 36
Tableau 6	Quelques valeurs de l'interception des précipitations, exprimée en pour cent des précipitations incidentes.	p. 42

PARTIE I CHAPITRE III LA RÉSERVE UTILE DES SOLS

Tableau 7	Proportions relatives de racine en fonction des différentes classes de diamètre observées, lors de l'ouverture des fosses de <i>Hesse36ans</i> , <i>Fou30ans</i> et <i>Fou150ans</i> .	p. 52
------------------	--	--------------

PARTIE II CHAPITRE I LE BILAN HYDRIQUE

Tableau 8	Paramètres et données des simulations de BILJOU53 pour <i>Hesse36ans</i> , <i>Fou30ans</i> et <i>Fou150ans</i> . Les variables climatiques sont le rayonnement global, le déficit de saturation de l'air, la pluie, la température moyenne et le vent. RU = réserve utile, hpflet = humidité pondérale au pF4.2, D_app = densité apparente, D_re = densité réelle du matériau, ah, bh = coefficients de la régression.	p. 75
Tableau 9	Densité apparente moyenne et coefficient de variation (%) en fonction de la profondeur et du site échantillonné en juin 2003.	p. 70

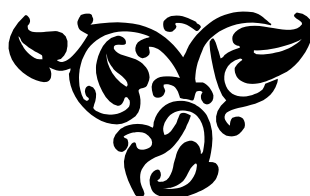
PARTIE II CHAPITRE II RÉSULTATS DES ANALYSES MINÉRALES ET CARBONÉES

Tableau 10	1) Description des installations de terrain : type de collecteur, nombre de collecteurs, nombre de prélèvements et 2) nombre d'analyses au laboratoire pour <i>Hesse36ans</i> , <i>Fou30ans</i> , <i>Fou150ans</i> . EC= écoulement le long des troncs.	p. 87
Tableau 11	1) Description de l'installation de terrain de <i>Hesse36ans</i> : nombre de TL et nombre de fosses contenant les TL en fonction de la profondeur et 2) nombre d'échantillons analysés	p. 89
Tableau 12	1) Description de l'installation de terrain de <i>Fou30ans</i> : nombre de ZTL, nombre de fosses contenant les ZTL en fonction de la profondeur et 2) nombre d'échantillons analysés. * = changement de protocole à partir de mars 2003.	p. 90
Tableau 13	1) Description de l'installation de terrain de <i>Fou150ans</i> : nombre de ZTL, nombre de fosses contenant les ZTL, nombre de faces de fosse contenant les ZTL en fonction de la profondeur et 2) nombre d'échantillons analysés. * = changement de protocole à partir de mars 2003.	p. 90
Tableau 14	Nombre de collectes où au moins un échantillon de solution a été prélevé et pourcentage de données manquantes sur la période 2002-2003, selon le type de collecteurs, à <i>Hesse36ans</i> , <i>Fou30ans</i> , <i>Fou150ans</i> . TL = lysimètres avec tensions et ZTL = lysimètres sans tension.	p. 94

- Tableau 15** Moyenne des concentrations en Ca, Mg, K, Na, P, Cl, N-NO₃, N-NH₄, et carbone pour *Hesse36ans*, *Fou30ans*, et *Fou150ans*, établie pour la période 2002-2003 dans les pluies incidentes, les pluviollessivats, le ruissellement le long des troncs et les solutions de litière. L'intervalle de confiance, i.c., correspondant a été calculé et les teneurs aberrantes sont indiquées par les initiales t.a.
* Pour *Fou30ans*, nous avons indiqué les valeurs calculées pour N-NH₄ sans les périodes 25 et 26, entre parenthèses. **p. 101**

DISCUSSION GÉNÉRALE

- Tableau 16** Synthèse des principaux flux minéraux établis aux cours de cette étude. **p. 128**
- Tableau 17** Synthèse des principaux flux hydriques établis aux cours de cette étude. **p. 128**
- Tableau 18a** Première partie de synthèse bibliographique : Flux hydrique, flux du cycle biogéochimique et méthode mise en œuvre pour quantifier les drainages. **p. 130**
- Tableau 18b** Deuxième partie de synthèse bibliographique : Flux hydrique, flux du cycle biogéochimique et méthode mise en œuvre pour quantifier les drainages. **p. 131**
- Tableau 19** Bilan de fertilité minérale pour *Hesse36ans*. L'unité est le kg/ha/an **p. 134**
- Tableau 20** Bilan de fertilité minérale pour *Fou30ans*. L'unité est le kg/ha/an **p. 134**
- Tableau 21** Bilan de fertilité minérale pour *Fou150ans*. L'unité est le kg/ha/an **p. 134**



Janvier	jj	Février	jj	Mars	jj	Avril	jj	Mai	jj	Juin	jj
1	1	1	32	1	60	1	91	1	121	1	152
2	2	2	33	2	61	2	92	2	122	2	153
3	3	3	34	3	62	3	93	3	123	3	154
4	4	4	35	4	63	4	94	4	124	4	155
5	5	5	36	5	64	5	95	5	125	5	156
6	6	6	37	6	65	6	96	6	126	6	157
7	7	7	38	7	66	7	97	7	127	7	158
8	8	8	39	8	67	8	98	8	128	8	159
9	9	9	40	9	68	9	99	9	129	9	160
10	10	10	41	10	69	10	100	10	130	10	161
11	11	11	42	11	70	11	101	11	131	11	162
12	12	12	43	12	71	12	102	12	132	12	163
13	13	13	44	13	72	13	103	13	133	13	164
14	14	14	45	14	73	14	104	14	134	14	165
15	15	15	46	15	74	15	105	15	135	15	166
16	16	16	47	16	75	16	106	16	136	16	167
17	17	17	48	17	76	17	107	17	137	17	168
18	18	18	49	18	77	18	108	18	138	18	169
19	19	19	50	19	78	19	109	19	139	19	170
20	20	20	51	20	79	20	110	20	140	20	171
21	21	21	52	21	80	21	111	21	141	21	172
22	22	22	53	22	81	22	112	22	142	22	173
23	23	23	54	23	82	23	113	23	143	23	174
24	24	24	55	24	83	24	114	24	144	24	175
25	25	25	56	25	84	25	115	25	145	25	176
26	26	26	57	26	85	26	116	26	146	26	177
27	27	27	58	27	86	27	117	27	147	27	178
28	28	28	59	28	87	28	118	28	148	28	179
29	29			29	88	29	119	29	149	29	180
30	30			30	89	30	120	30	150	30	181
31	31			31	90			31	151		
Juillet	jj	Août	jj	Septembre	jj	Octobre	jj	Novembre	jj	Décembre	jj
1	182	1	213	1	244	1	274	1	305	1	335
2	183	2	214	2	245	2	275	2	306	2	336
3	184	3	215	3	246	3	276	3	307	3	337
4	185	4	216	4	247	4	277	4	308	4	338
5	186	5	217	5	248	5	278	5	309	5	339
6	187	6	218	6	249	6	279	6	310	6	340
7	188	7	219	7	250	7	280	7	311	7	341
8	189	8	220	8	251	8	281	8	312	8	342
9	190	9	221	9	252	9	282	9	313	9	343
10	191	10	222	10	253	10	283	10	314	10	344
11	192	11	223	11	254	11	284	11	315	11	345
12	193	12	224	12	255	12	285	12	316	12	346
13	194	13	225	13	256	13	286	13	317	13	347
14	195	14	226	14	257	14	287	14	318	14	348
15	196	15	227	15	258	15	288	15	319	15	349
16	197	16	228	16	259	16	289	16	320	16	350
17	198	17	229	17	260	17	290	17	321	17	351
18	199	18	230	18	261	18	291	18	322	18	352
19	200	19	231	19	262	19	292	19	323	19	353
20	201	20	232	20	263	20	293	20	324	20	354
21	202	21	233	21	264	21	294	21	325	21	355
22	203	22	234	22	265	22	295	22	326	22	356
23	204	23	235	23	266	23	296	23	327	23	357
24	205	24	236	24	267	24	297	24	328	24	358
25	206	25	237	25	268	25	298	25	329	25	359
26	207	26	238	26	269	26	299	26	330	26	360
27	208	27	239	27	270	27	300	27	331	27	361
28	209	28	240	28	271	28	301	28	332	28	362
29	210	29	241	29	272	29	302	29	333	29	363
30	211	30	242	30	273	30	303	30	334	30	364
31	212	31	243			31	304			31	365

**Correspondance entre
dates et jours juliens
en 2002 et 2003**