

F00000 53

UNIVERSITÉ DE NANCY I  
U.E.R. Physique · Chimie · Biologie

FIS 80006  
K110  
2121  
SAL/CPAF  
CENTRE NATIONAL DE  
RECHERCHES FORESTIÈRES  
NANCY

---

ÉTUDE COMPARÉE DU BILAN HYDRIQUE DE  
4 PEUPLEMENTS DE SAPIN DE VANCOUVER  
(*Abies Grandis* LINDL.) DE DENSITÉS DIFFÉRENTES

**MÉMOIRE**

pour l'obtention du

D.E.A. DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES

présenté et soutenu publiquement

le 5 octobre 1982

par

**Pape Ndiengou SALL**

---

JURY :

**Président : M. F. MANGENOT**

**Assesseurs : MM. G. AUSSÉNAC**

**M. FAVRE**

**J. PARDE**

## SOMMAI : RE

---

1. INTRODUCTION	1
II. PRESENTATION DE L'ETUDE	3
III. ETUDE DU BILAN HYDRIQUE	4
1". Notion de bilan hydrique	4
2". Interception des précipitations	5
a) Généralités sur l'interception	5
b) Dispositif expérimental de mesure	7
c) Résultats	8
d) Discussion et conclusion	9
3". Evolution des nappes perchées	12
a) Dispositif de mesure	12
b) Résultats	13
4°. Mesures de la teneur en eau du sol	18
a) Concept de disponibilité en eau : la réserve utile	18
b) Utilisation de la presse à membrane	19
b.1) Notion de $pF$	19
b.2) Mesures effectuées	20
c) Résultats obtenus avec la sonde à neutrons et calcul de l'ETR	25
c.1) Généralités	25
c.2) Mesures effectuées	27
c.3) Résultats obtenus	29
d) Résultats par la méthode gravimétrique	32
IV. CONCLUSION GENERALE	37
- BIBLIOGRAPHIE	
- ANNEXES	

## REMERCIEMENTS

---

Puissent ces quelques lignes traduire toute ma déférence à Messieurs :

MANGENOT, Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy,

PARDE, Directeur de la Station de Sylviculture et Production du C.N.R.F.

AUSSENAC, mon Directeur de stage, Responsable de l'unité de Bioclimatologie au C.N.R.F.

FAVRE, Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy.

Que Messieurs

CLERC, DESJEUNES, GRANIER, GROSS, GUEHL, WILLM

de l'unité de Bioclimatologie et l'ensemble du secrétariat de la Station de Sylviculture trouvent ici l'expression de ma sympathie pour leur fructueuse collaboration.

## L'eau

<i>Les 3 états de la matière</i>	<i>Voici l'eau dans son long circuit Qui subit sa métamorphose. Vapeur légère, neige ou pluie Glace aussi, c'est la même chose.</i>
<i>Précipi- tations</i>	<i>Venue d'un nuage elle tombe Au sol et suivant son instinct, Choisit la voie qui lui incombe Pour aller jusqu'à son destin.</i>
<i>Ruissel- lement</i>	<i>En suivant la voie de lumière Ruisselant au long du versant, Elle bondit vers la rivière, Le lac, la mer ou l'océan.</i>
<i>Erosion Milieu de vie</i>	<i>Elle entraîne en courant, tragique, Terre et rochers dans sa moisson, Les dépose et devient, magique, Un univers pour le poisson,</i>
<i>Activités Loisirs</i>	<i>Cependant que sur son dos lisse, Pour le travail et le loisir, Le bateau majestueux glisse Et nage l'ondine à plaisir.</i>
<i>Infil- tration</i>	<i>L'autre voie est bien plus austère. Dans la nuit du sol asséché L'eau s'infiltré et le désaltère Avant de retrouver, cachée</i>

Ressource  
Pollution

Dans Zes profondeurs de *la* terre  
La nappe où l 'on viendra puiser  
Afin que *l'homme* en puisse faire  
Maint emploi, même en abuser

Vie  
Photo -  
synthèse

Et *la* plante au sol s'alimente  
En cette eau qui *la* fait *fleurir*,  
L '*embellit*, *la* rend opulente  
Lui permettant de nous nourrir

Evapotrans-  
piration

A travers *la* mer ou *la* plante,  
A l 'issue de chaque parcours  
L'eau cède à *la loi* vigilante  
Et devient vapeur au long cours

Le cycle.

*Malgré la* longueur du voyage  
Son sort, inexorablement,  
La ramène à son blanc nuage,  
Eternel recommencement.

Suzanne MERIA UX

(L'I.N.R.A., *l'Eau* et *la* Production Agricole.  
INRA • Editions S.E.I. CNRA VERSAILLES  
269 pages, 1979).

## I. INTRODUCTION

---

Nous ne dirons certainement pas que le Sapin de Vancouver (*Abies grandis*) n'a aucune valeur en Amérique du Nord, mais compte tenu du peu d'intérêt qu'il y a suscité, il n'est pas étonnant de voir la place peu flatteuse qu'il occupe dans la vie forestière de sa région d'origine : Colombie Britannique (Ile de Vancouver), Californie du Nord, Nord de l'Idaho et Nord-Ouest du Montana.

Aussi surprenant que cela puisse paraître, ce sont les Européens qui entendent faire de cette espèce un usage à la dimension de ce qu'on peut en attendre eu égard à ses disponibilités adaptatives et à ses remarquables performances. Introduit en Europe à la fin du siècle dernier, il a, dès le lendemain de la deuxième guerre, bénéficié d'une attention particulière de la part des forestiers qui, loin de vouloir en faire une panacée, ont tout de même tenu à lui donner toute l'importance qui doit être la sienne.

Ainsi, placé en tête des résineux en Angleterre par CHRISTIE et HUMMEL (DELVAUX, 1969) grâce aux tables de production indiquant qu'à l'âge de 50 ans, il avait une production supérieure de 20 à 50% à celle de l'Epicéa de Sitka (*Picea sitchensis*) et du Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. )

- classé en France parmi les "essences de pointe" (PARDE, 1966) du fait de ses records (accroissement)

- étudié sur le plan des races géographiques par un Allemand (MULLER, 1935-1936) qui en distingue une côtière et quatre continentales,

- objet de recherches poussées au niveau de la sélection des provenances pour avoir des éclaircissements sur le mode de variabilité de l'espèce avec l'établissement de lois de variabilité (LACAZE, TOMASSONE, 1967).

- performant dans les boisements du Nord-Ouest de l'Hérault (PARDE, PRAX, 1964),

- préconisé comme essence de reboisement en Belgique pour y avoir eu un comportement plus que satisfaisant (DELVAUX, 1969), le Sapin de Vancouver ne pouvait pas ne pas être étudié sur le plan de la sylviculture par le Centre National de Recherches Forestières (C.N.R.F.) de Champenoux.

Une expérience d'espacement de plantation fut donc mise en route en 1958 en forêt d'Amance (Meurthe-et-Moselle).

Dans un carré latin de 16 placeaux, 4 espacements ont été retenus :

B: 2,00m x 2,00 m	2.500 plants/ha
c : 2,50 m x 2,50 m	1.600 plants/ha
D: 3,00 m x 3,00 m	1.111 plants/ha
E: 3,50 m x 3,50 m	816 plants/ha

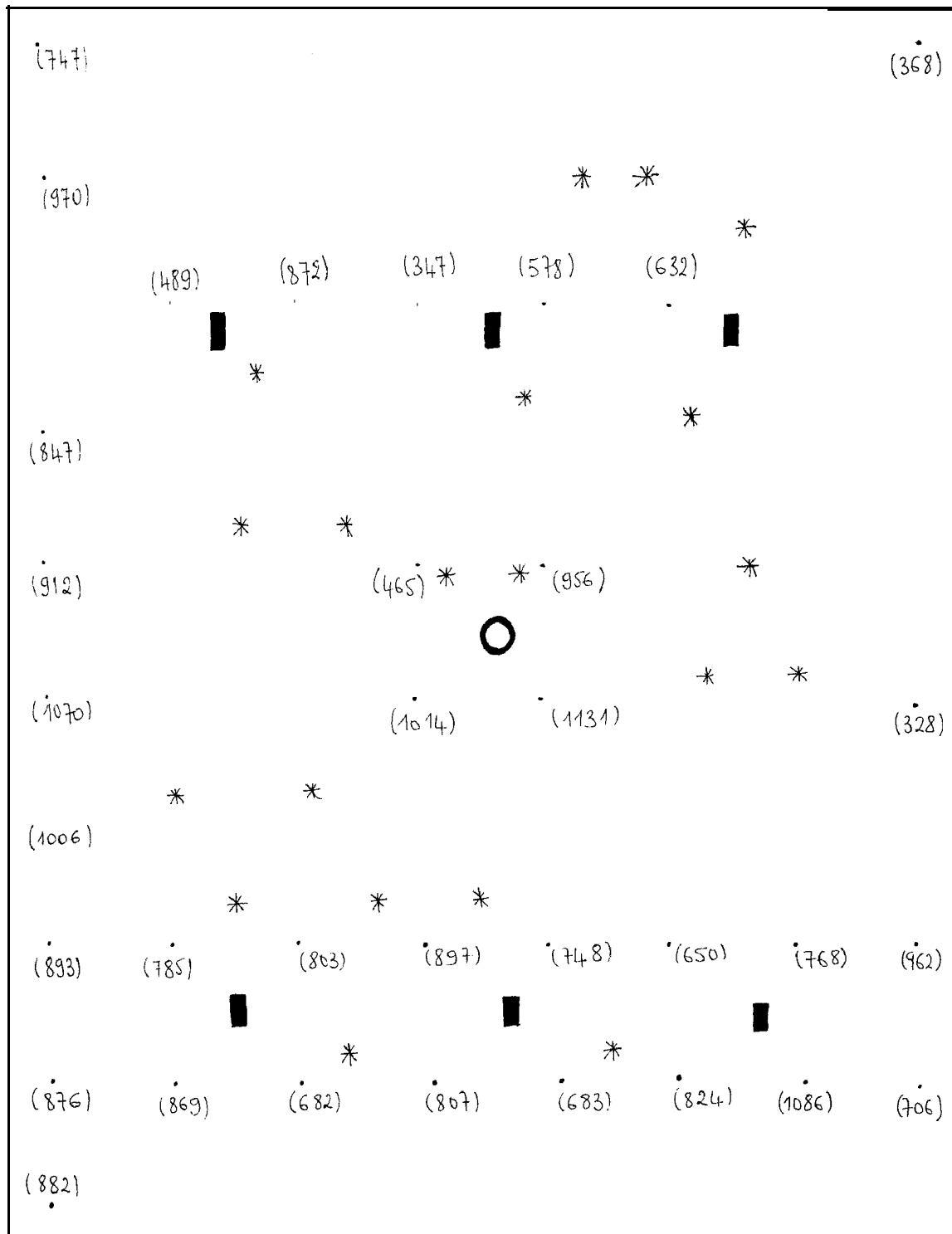
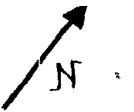
20 ans après, des résultats sont publiés (OSWALD, 1980). Une éclaircie systématique à l'envers jusqu'à concurrence de 70% de la surface terrière initiale a été réalisée au printemps 1980. Cette réduction instantanée du matériel végétal a toujours deux conséquences principales :

- une influence sur l'éclairement des végétaux (photosynthèse)
- une modification sur la consommation d'eau (bilan hydrique).

Nous nous sommes fixés comme cadre d'étude la deuxième composante. Pour étudier l'état hydrique relatif des parcelles, nous en avons choisi 4 (les écartements extrêmes 2m et 3,5m). Face à l'essor industriel, à la croissance démographique, et à la désertisation de certaines régions du globe, l'eau devient de plus en plus une denrée rare et précieuse qu'il faut maîtriser pour en faire une utilisation rationnelle.

Ce "sang de la forêt", comme l'appelle E. HERRIOT, reste aujourd'hui plus que jamais un bien qu'il faut jalousement garder.

Figure n° 1. Dispositif expérimental. P.I d = 730 arbres/ha



• arbre

( ) circonférence à 1<sup>m</sup>30

\* pluviomètre

■ tube piézométrique

○ tube de sonde à neutrons

(N° 81)

Echelle: 1/175



## II. PRESENTATION DE L'ETUDE

---

Notre travail a démarré en novembre 1981 ; l'état des peuplements était le suivant :

- absence totale de nappe perchée
- les parcelles étudiées se présentaient comme suit :

P I	: 3,50 m x 3,50 m	densité = 730 arbres/ha	Témoin
P II	: 2,00 m x 2,00 m	densité = 1.620 "	Eclaircie
P III	: 3,50 m x 3,50 m	densité = 530 "	Eclaircie
P IV	: 2,00 m x 2,00 m	densité = 1.760 "	Témoin

Chaque parcelle mesure 10 ares (figures 1, 2, 3, 4). Nous avons fait :

- des mesures d'humidité du sol avec la sonde à neutrons et de profondeur de nappe d'eau
- des prélèvements de sol (méthode gravimétrique)
- des manipulations avec la presse à membrane de Richards
- des relevés de pluie.

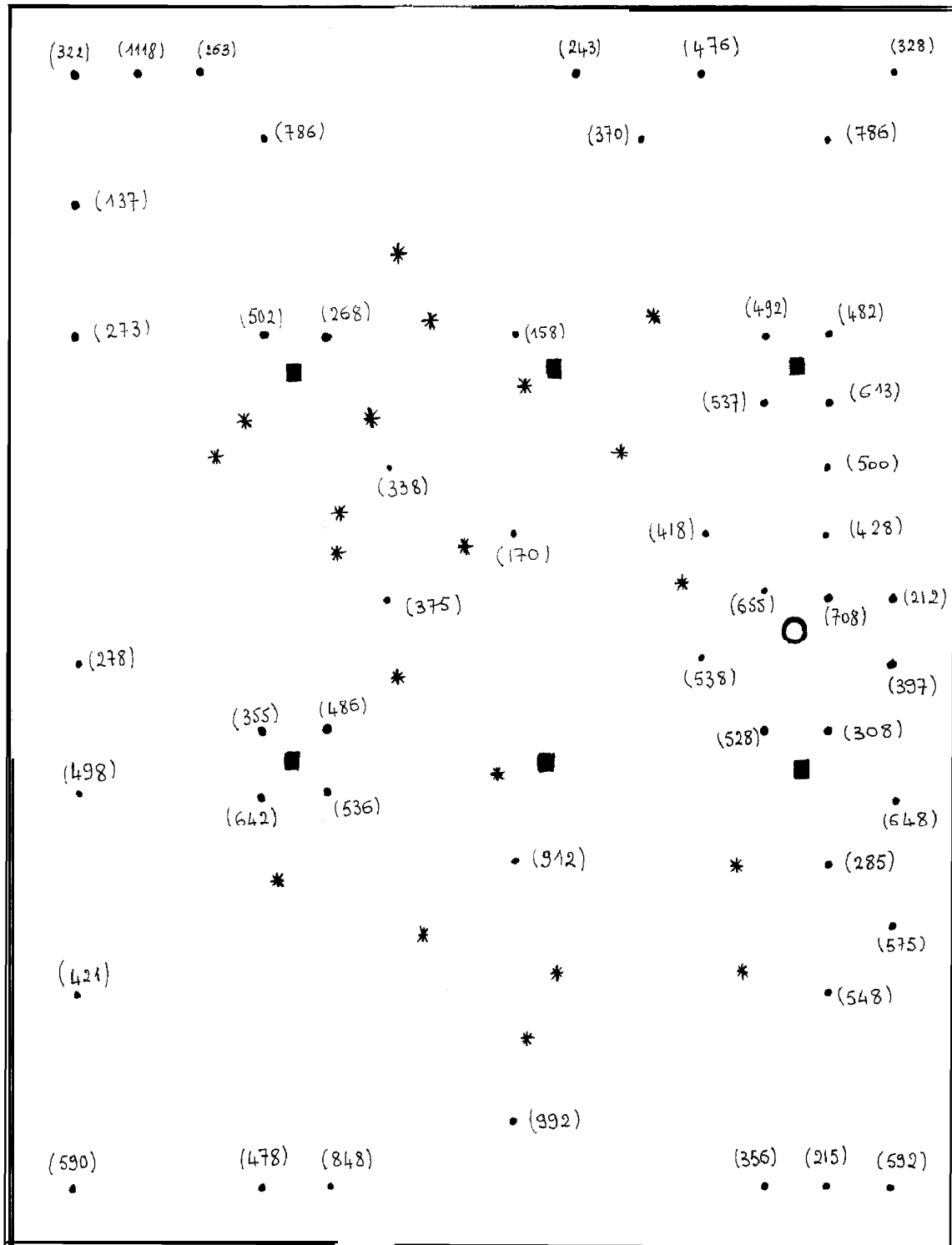
Dans la première partie, nous avons suivi le circuit de la pluie qui tombe sur le peuplement et nous l'avons fractionné en 3 composantes : c'est l'étude du cycle hydrologique.

Dans la deuxième partie de ce mémoire, tous les termes du bilan hydrique dont la sommation donne la pluie incidente sont définis et étudiés.

Nous avons ensuite étudié comment la modification du microclimat (intervention sylvicole) permettait de contrôler la distribution et la consommation de l'eau.

En conclusion, il nous a semblé logique, après avoir tant parlé de bilan, d'en faire un de plus, non pas hydrique cette fois-ci, mais d'un aspect différent parce que faisant état de l'enseignement que nous tirons de ces résultats obtenus après neuf mois d'études de terrain.

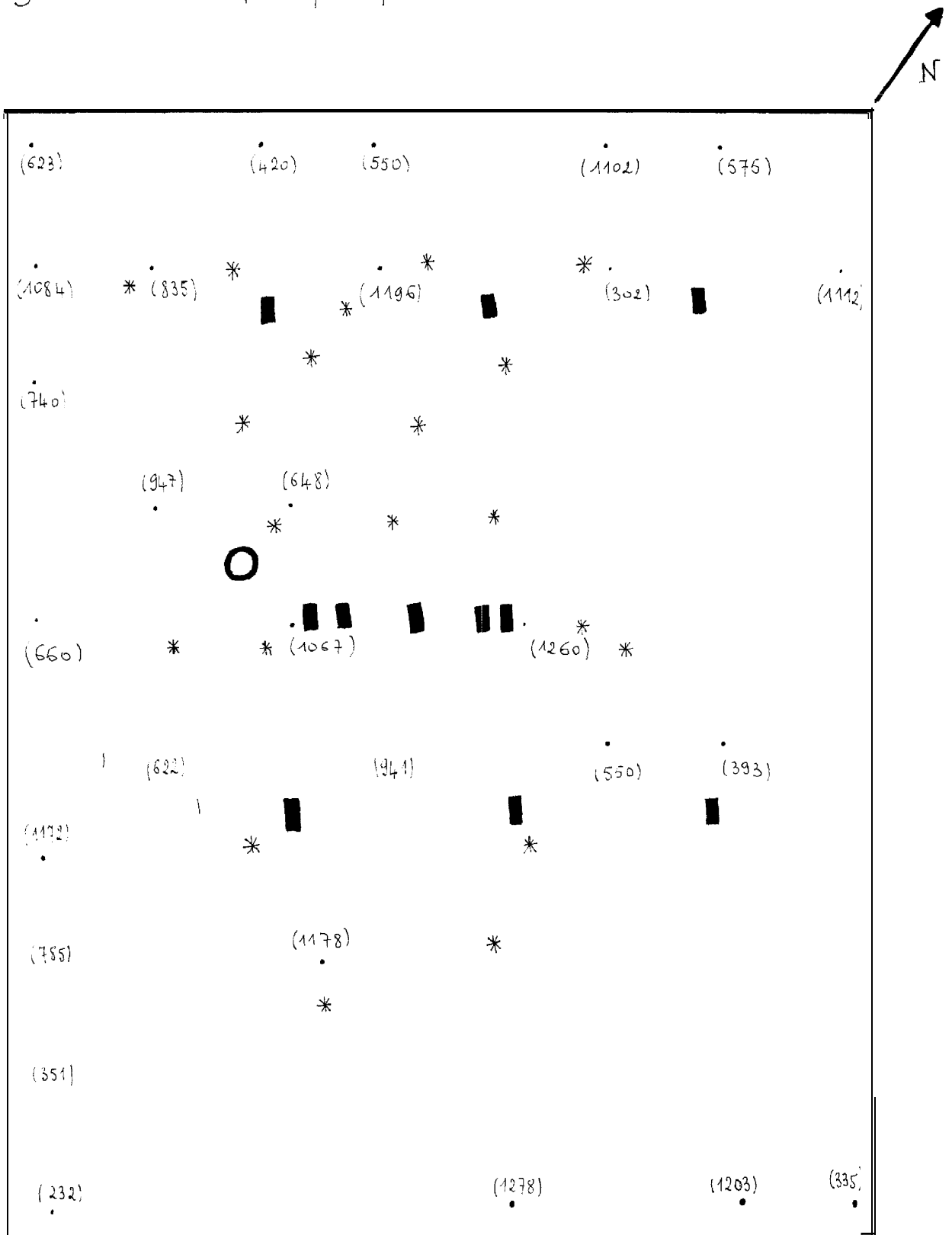
Figure n° 2 : Dispositif expérimental P II d = 1620 arbres/ha



- arbre
- ( ) circonférence à 1<sup>m</sup>,30
- \* pluviomètre
- Tube piézométrique
- Tube de sonde à neutrons  
(n° 82)

Echelle : 1/200

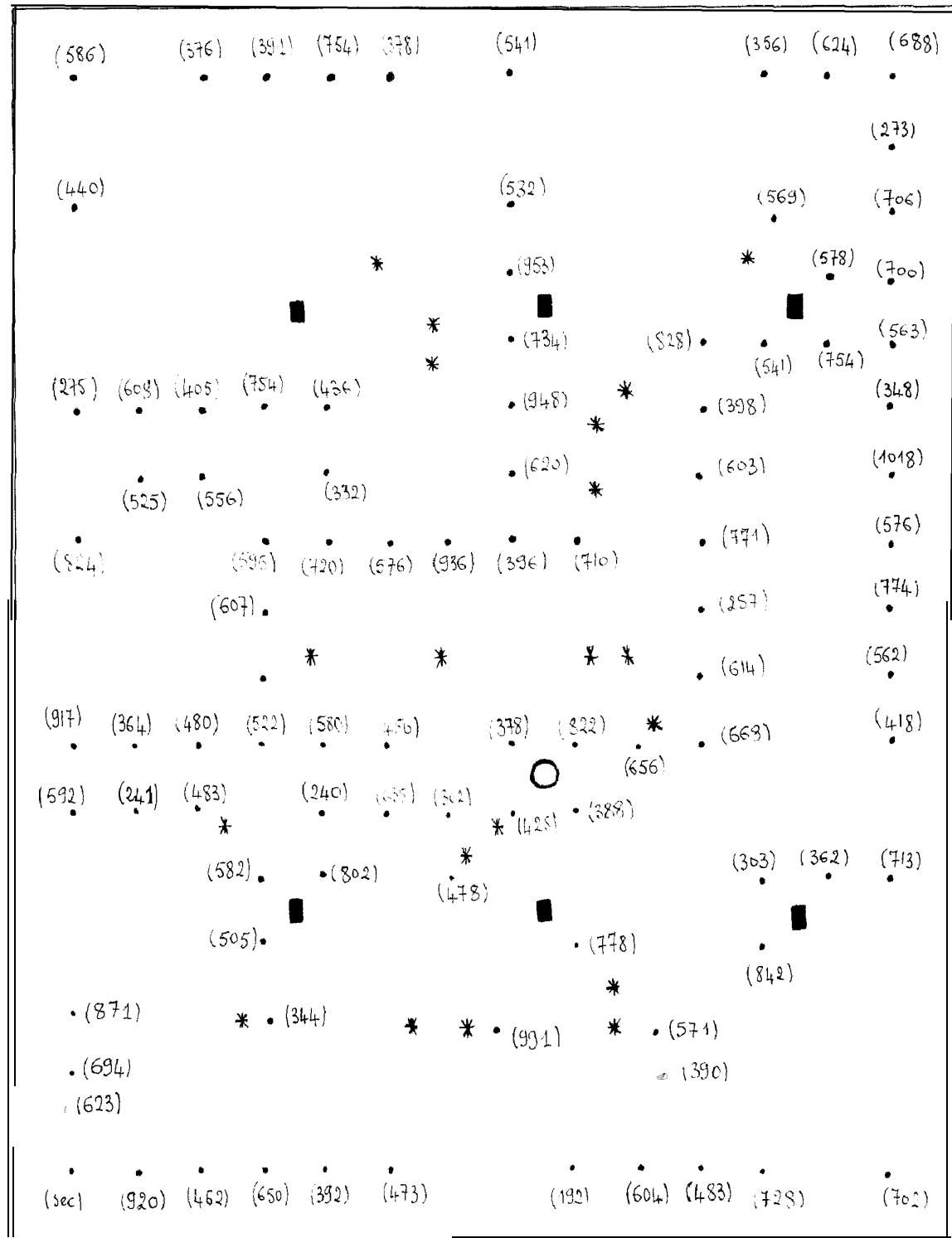
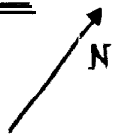
Figure n° 3 : Dispositif expérimental P III d = 530 arbes / Pa



- arbre
  - ( ) circonférence à 1<sup>er</sup> 30
  - \* pluviomètre
  - Tube piézométrique
  - Tube de sonde à neutrons
- (N° 83)

Echelle : 1/175

Figure n° 4 Dispositif expérimental P IV d = 1760 arbres / ha



- arbre
- ( ) circonférence à 1<sup>m</sup>.30
- \* pluviomètre
- tube piézométrique
- tube de sonde à neutrons  
(n: 84)

Echelle : 1/200

### III. ETUDE DU BILAN HYDRIQUE

---

#### 1. NOTION DE BILAN HYDRIQUE

A l'instar du chef d'entreprise qui choisit un moment bien précis pour faire son bilan financier, le forestier délimite un temps dans la vie de son peuplement pour dresser un bilan d'eau. Les théories récentes affirment que le bilan hydrique n'est en fait rien d'autre que l'expression de la loi de "la conservation de la matière" (HILLEL, 1974). Ce qui, dans notre étude, veut dire que pour un volume de sol donné, la teneur en eau ne peut augmenter sans apport venant de l'extérieur (infiltration, remontée capillaire) et ne peut diminuer sans départ de l'eau vers l'atmosphère par évapotranspiration ou en profondeur par drainage.

Il reste évident, au-delà de ce constat, que cette dynamique de l'eau nécessite de l'énergie : d'où la notion de bilan d'énergie. Ces deux bilans (énergétique et hydrique) sont donc intimement liés. Pour une période donnée, on peut donc écrire une équation, dite du bilan hydrique, formulée comme suit :

$$(1) P_i = E + T + I_n + D + F + R \pm \Delta S \quad (\text{AUSSENAC, 1975})$$

$P_i$  = précipitations incidentes     $T$  = transpiration

$I_n$  = interception nette

$D$  = drainage profond

$E$  = évaporation du sol

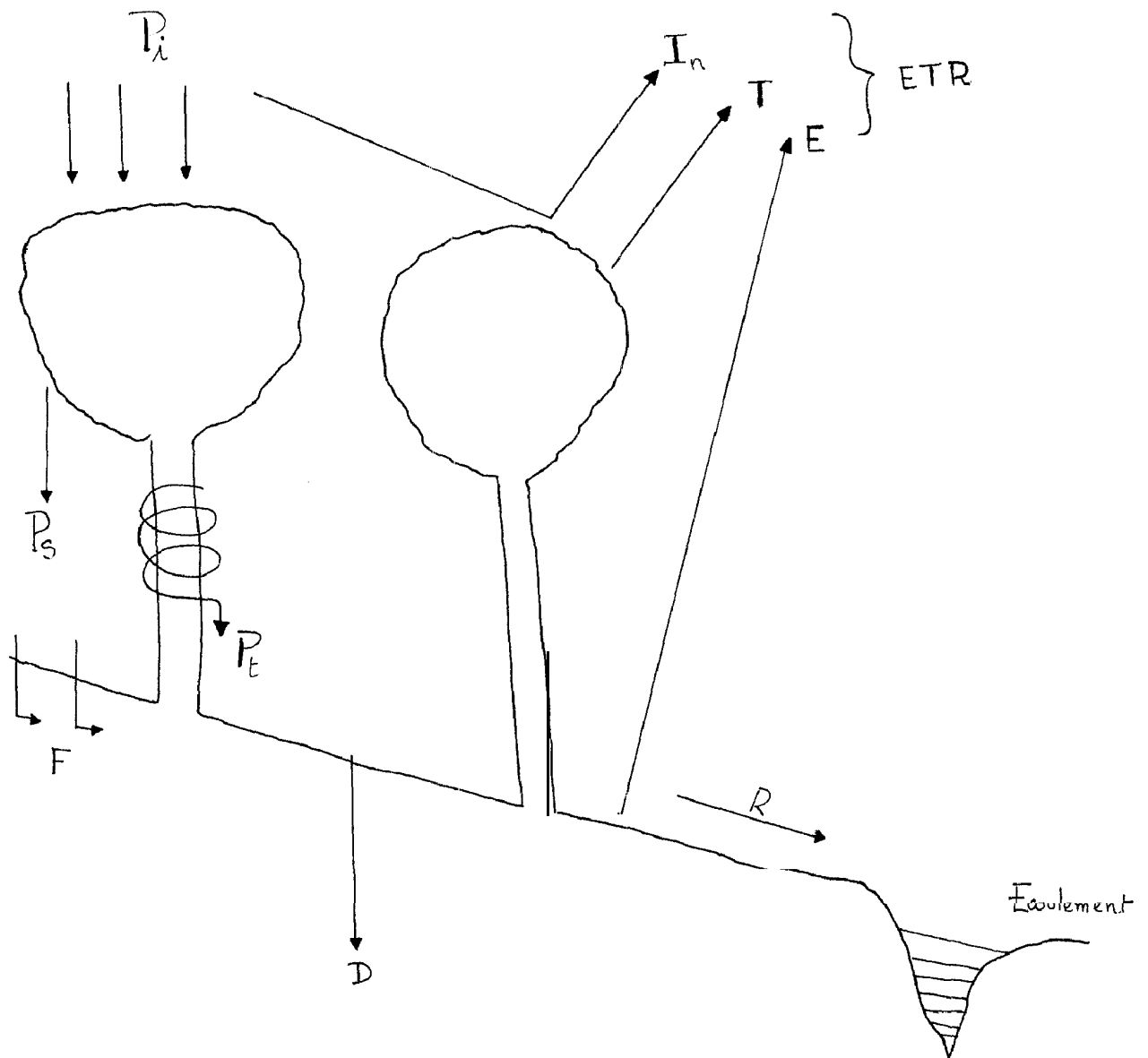
$F$  = drainage latéral superficiel

$R$  = ruissellement

$\Delta S$  = variation du stock d'eau dans le sol.

Cependant cette égalité ne peut avoir de sens qu'à trois conditions :

Schéma n° 1 : Le cycle hydrologique en forêt



$P_i$  = Précipitations incidentes

$P_s$  = Précipitations traversant le couvert

$P_t$  = Ecoulement le long des troncs

$F$  = Drainage latéral superficiel

$D$  = Drainage profond

$I_n$  = interception

$T$  = Transpiration

$E$  = Évaporation du sol

$R$  = Ruissellement

$ETR$  = Evapotranspiration réelle

( AUSSENAC, 1975 )

1°/ que l'état initial (humidité) du sol soit égal à l'état final,

2°/ que le volume et les caractéristiques du sol ne varient pas,

3°/ que le sol ne reçoive pas d'eau à partir d'une nappe phréatique.

## 2. INTERCEPTION DES PRECIPITATIONS

### a. Généralités sur l'interception

La pluie qui tombe sur un peuplement (pluie incidente =  $P_i$ ) se comporte de la façon suivante :

- Une partie parvient presque immédiatement au sol ( $P_s$ ) soit directement, soit en traversant le houppier ; le cas le plus fréquent est l'action combinée des deux phénomènes.

- Une fraction arrive également au sol mais en prenant une voie différente : elle s'écoule le long des troncs ( $P_t$ ).

- Le tiers restant, qui est arrêté par le feuillage et les branches jouant le rôle d'un véritable écran, est appelé interception ( $I_n$ ).

Le schéma n° 1 montre la destinée de la pluie qui arrive sur un couvert forestier : on peut d'ores et déjà constater que l'interception est un élément de l'évapotranspiration réelle et de ce fait elle constitue une perte d'eau pour le système considéré.

On peut se demander si l'eau interceptée est totalement perdue ou si elle peut dans certaines conditions être récupérée. Des auteurs pensent qu'une partie serait absorbée par les feuilles et que son départ par évaporation entraînerait une réduction de la transpiration : d'où un effet tampon au niveau du bilan hydrique. En tout état de cause, la capacité d'interception des cimes reste très importante.

Selon BURGER (in DELFS, 1967), 1 kilogramme d'aiguilles de Sapin correspond à une surface foliaire moyenne de  $5,5 \text{ m}^2$ . Ainsi, associées aux rameaux et aux branches, les aiguilles représentent une surface d'interception de plusieurs dizaines de  $\text{m}^2$  par couronne.

Il est donc intéressant de retenir qu'au niveau d'un peuplement, la surface d'interception du feuillage est sensiblement vingt fois plus importante que celle du sol.

Il reste entendu que lorsque les précipitations sont très faibles, l'interception est maximale (100%).

Mais à partir de quelle limite peut-on dire qu'une précipitation n'est plus faible ? Cela dépend évidemment des essences.

Pour le Sapin de Vancouver une valeur de 0,5 mm a été trouvée ; 0,6 mm et 0,4 mm pour l'Epicéa (Picea abies) et le Pin sylvestre (Pinus sylvestris) (AUSSENAC, 1968) . En deçà de ces hauteurs de pluie, l'interception est totale ; et au-delà, le feuillage se sature de manière progressive jusqu'à ce que la capacité de stockage maximale soit atteinte et à partir de ce moment (où les forces de pesanteur deviennent plus importantes que les forces de tension de surface), seules sont retenues les quantités additionnelles compensatrices des départs dus à l'évaporation.

Dès lors, il devient intéressant de quantifier la hauteur d'eau maximale qu'un couvert peut retenir : ce paramètre est appelé capacité de saturation des couronnes (S).

LEYTON *et al* (1965), WEIHE en 1974 (in BOULANGEAT, 1978) ont utilisé pour la calculer, la droite de régression suivante :

$$(2) P_i = P_s + P_t - S$$

LEONARD (1967) propose la formule suivante :

$$(3) I = S + REt$$

I = interception (mm)

S = capacité de saturation (mm)

E = évaporation (mm/h) pendant l'averse

t = durée de l'averse en heures.

et suggère que des études soient dirigées vers une équation de la forme :

$$(4) I = f(K) (AB)$$

A = surface d'interception

B = hauteur d'eau.

K = temps séparant deux remplissages consécutifs de la capacité de saturation



Schéma n° 2 Dispositif de mesure de l'écoulement le long du tronc (Pt)

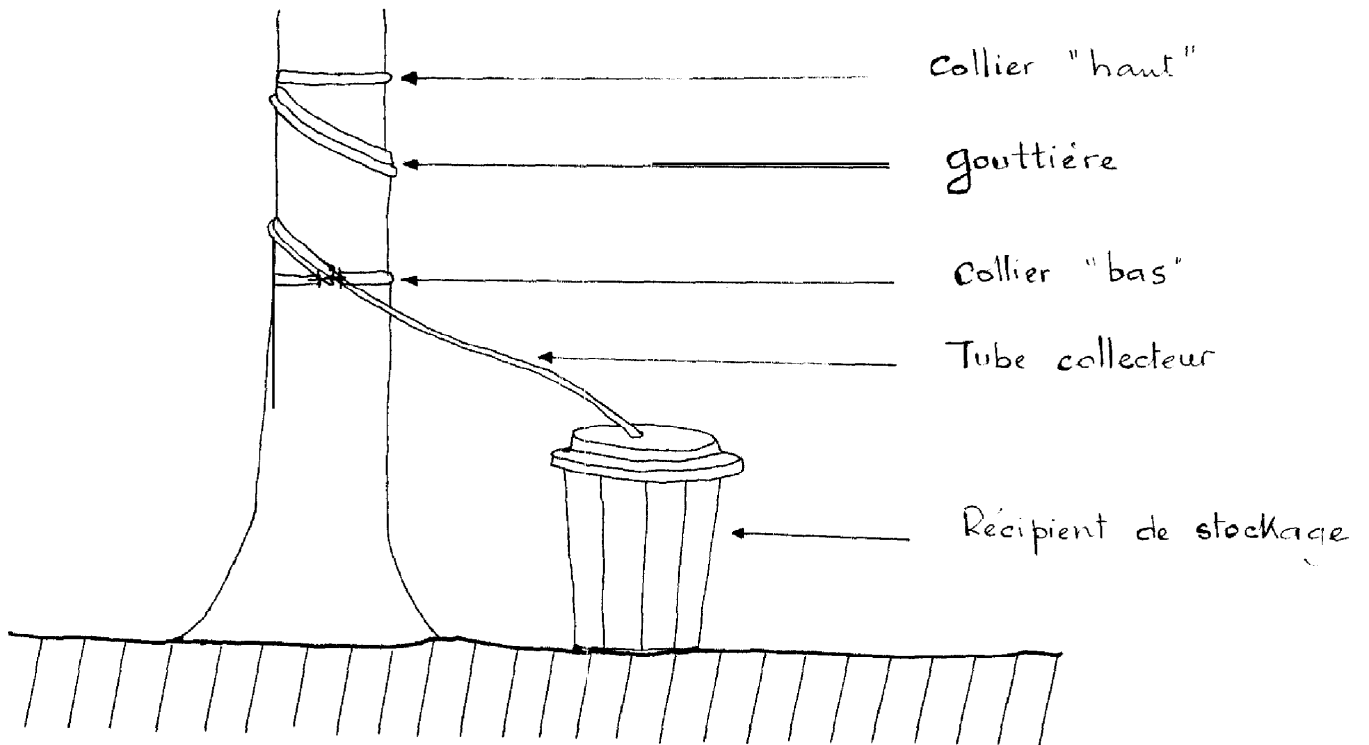
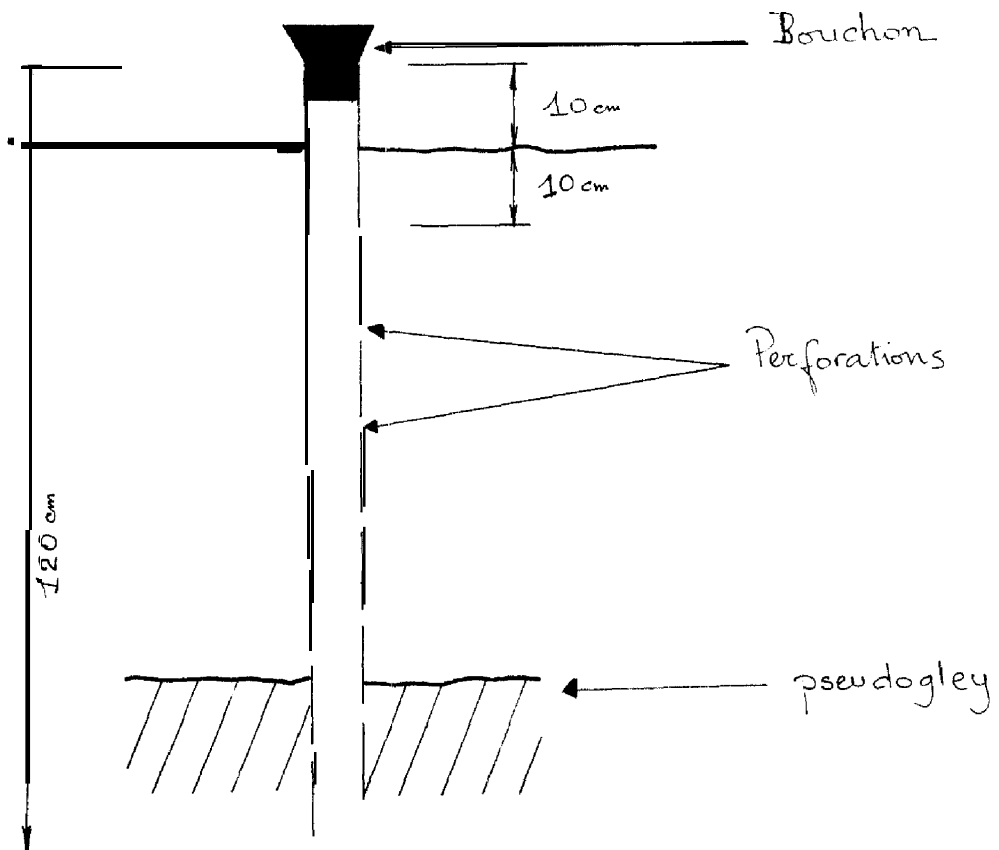


Schéma n° 3 Tube piézométrique



AUSSENAC (1968), avec des averses nocturnes (évaporation très faible), importantes et continues a obtenu les valeurs suivantes :

• Sapin de Vancouver	$3,8 \pm 1,5$ mm
• Epicéa	$3,1 \pm 0,8$ mm
• Pin sylvestre	$3,0 \pm 0,8$ mm

#### **b. Dispositif expérimental de mesures**

Pour ce qui est de notre dispositif, nous avons installé un pluviomètre sur un support à 100 mètres du carré latin et en plein découvert pour recueillir la pluie incidente ( $P_i$ ). Nous étions donc à environ un peu plus de quatre fois la hauteur du peuplement.

Éliminant deux rangées d'arbres de chaque côté de la parcelle, ceci pour éviter les effets de bordure, nous avons obtenu une placette plus réduite dans laquelle nous avons réparti vingt pluviomètres pour mesurer l'eau arrivant au sol ( $P_s$ ). Un tirage avec la table des nombres au hasard, a été fait pour désigner les emplacements : 80 pluviomètres au total ont donc été disposés dans le carré latin. Ils sont de type SPEIA (Syndicat Professionnel Engrais de l'Industrie Azotée). Une centrale d'acquisition de mesures installée au laboratoire de Bioclimatologie et reliée au poste météo du C.N.R.F. (situé à 2km du carré latin) nous servait de référence pour constater les différences qu'il pouvait y avoir entre deux points de mesure si peu distants.

Après avoir mesuré tous les arbres, nous avons calculé la moyenne géométrique dans chaque parcelle et l'arbre-moyen était choisi pour représenter l'écoulement le long des troncs au niveau du peuplement ( $P_t$ ). L'idéal serait certainement d'avoir un collier autour de chaque arbre du peuplement. Le choix de l'arbre-moyen se justifie par le fait qu'il y a une corrélation entre l'écoulement et le diamètre de l'arbre (DELFs, 1967). Le collier, fait de feuillard, était de temps à autre desserré afin de ne pas étrangler l'arbre. Le schéma n° 2 montre une représentation du dispositif de mesure de l'écoulement  $P_t$ .

TABLEAU N°1 - VALEURS DE: Ps, Pt, In AU NIVEAU DE CHAQUE PARCELLE

(résultats de 18 mesures)

Pi = 234,00 mm	Ps		Pt		In	
	mm	%	mm	%	mm	%
P.I d = 730 ar- bres/ha	174,91	75,0	2,25	1,00	56,84	24,0
P.II d = 1620 arbres/ha	164,96	71,0	4,16	2,00	64,88	28,0
P.III d = 530 ar- bres/ha	177,08	76,0	1,10	0,50	54,62	23,5
P.IV d = 1760 arbres/ha	162,87	70,0	9,10	4,00	62,03	27,0

TABLEAU N°2 - VALEURS DE Ps, Pt, In AU NIVEAU DE CHAQUE PARCELLE

(résultats de 16 mesures)

Pi = 153,00 mm	Ps		Pt		In	
	mm	%	mm	%	mm	%
P.I d = 730 ar- bres/ha	99,11	65,0	0,69	0,50	53,20	35,0
P.II d = 1620 arbres/ha	95,81	62,5	1,10	1,00	56,09	36,5
P.III d = 530 ar- bres/ha	102,87	67,0	0,32	0,20	49,81	33,0
P.IV d = 1760 arbres/ha	97,94	64,0	2,47	2,00	52,59	34,0

Pi : pluie incidente - Ps : pluie arrivant au sol -

Pt : écoulement le long des troncs - In : interception

c. Résultats

Du 29.4.1982 au 23.7.1982, nous avons effectué 18 mesures de  $P_i$ ,  $P_t$ ,  $P_s$  et  $I_n$ .

$I_n$  est obtenu en faisant  $P_i = (P_s + P_t)$  (5)

Au niveau d'une parcelle  $P_s$  est donné par (6)

$$\frac{\sum_1^n P_s}{n} \quad (n = 20)$$

Le volume d'eau s'écoulant le long des troncs est calculé à partir du relevé fait sur l'arbre-échantillon.

Le contenu du récipient collecteur représente un volume d'eau qui, rapporté à la surface d'épandage, s'exprime. alors en hauteur d'eau (AUSSENAC, 1975)

$$P_t = \frac{\sum_1^n P_t \times N}{n (S_p - G)}$$

$P_t$  = volume recueilli par arbre-échantillon  
 $N$  = nombre d'arbres du placeau  
 $n$  = nombre d'arbres-échantillon  
 $S_p$  = surface du placeau  
 $G$  = surface terrière des arbres du placeau

1 mm de pluie correspondant à 40cc, nous avons mis au point des équations qui nous donnaient directement le  $P_t$  total de chaque placeau (ANNEXE I).

Tous les résultats des relevés pluviométriques sont regroupés dans un tableau (ANNEXE II).

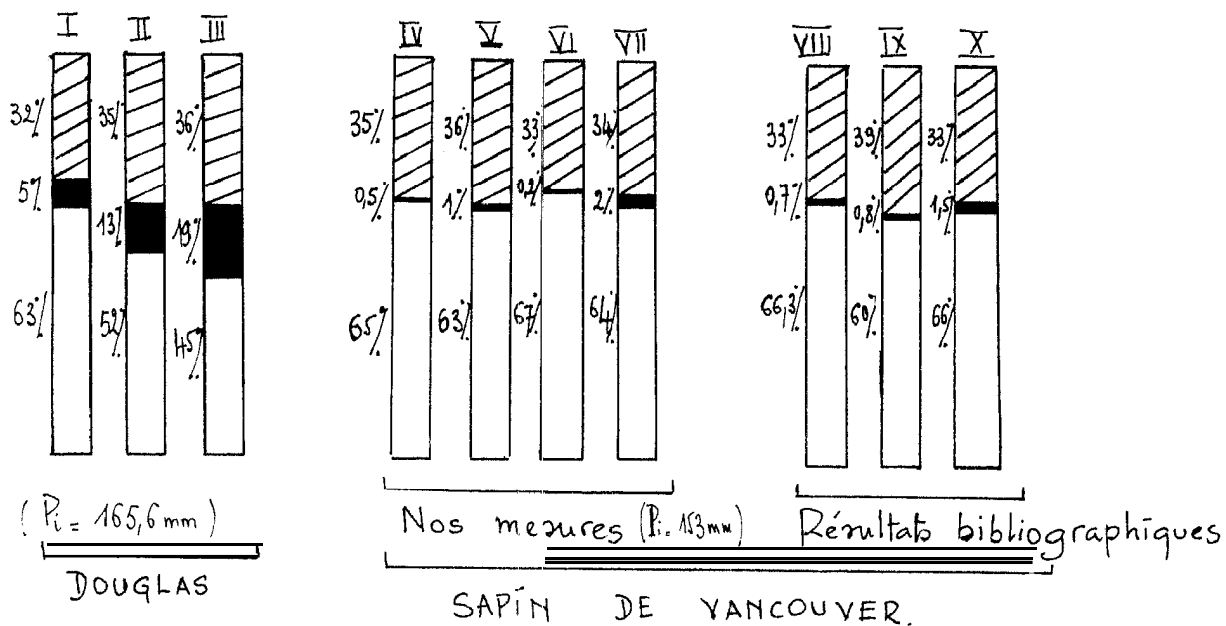
Notre but n'était pas de faire un bilan annuel des pluies mais simplement des mesures ponctuelles afin d'obtenir une estimation moyenne des précipitations arrivant au sol, de l'écoulement le long des troncs et de l'interception (tableau n° 1).




Deux pluies exceptionnelles ont hétérogénéisé les 16 valeurs obtenues : il nous a semblé que l'averse du 3 au 4 juillet ne s'était abattue que sur quelques zones de chaque parcelle : les données recueillies nous ont paru aberrantes.

La deuxième mesure qui a perturbé nos résultats est l'orage du 14 juillet et l'averse matinale du lendemain.

Dans notre pluviomètre de référence nous avons obtenu 53mm. Depuis le 8.6.1953, c'était la première fois que le poste climatologique d'Amance enregistrait une telle valeur en 24 heures (DESJEUNES, 1982).

Figure n° 5 Action du couvert forestier sur  $I_n$ ,  $P_t$  et  $P_s$  exprimés en % de  $P_i$ .



 Interception ( $I_n$ )     
  Ecoulement des troncs ( $P_t$ )     
  Eau arrivant au sol ( $P_s$ )

I :  $d = 535$  arbres / ha

II :  $d = 1030$  arbres / ha

III :  $d = 2229$  arbres / ha

IV :  $d = 730$  arbres / ha

V :  $d = 1620$  arbres / ha

VI :  $d = 530$  arbres / ha

VII :  $d = 1760$  arbres / ha

VIII, IX, X :  $d = 620$  arbres / ha

( $P_i$  respectives de : 77,8 ; 56,7 ; 42,7) mm

$P_i =$  pluie incidente.

Avec une telle intensité, la capacité de saturation fut vite atteinte et c'est à notre avis l'explication des très faibles interceptions obtenues (3; 7; 7 et 10% pour les 4 parcelles).

En enlevant ces deux mesures (sur 18) l'interception, par exemple pour la parcelle I ( $d = 730$  arbres/ha) est majorée de 11%. Les résultats obtenus avec les 16 mesures sont données dans le tableau n° 2.

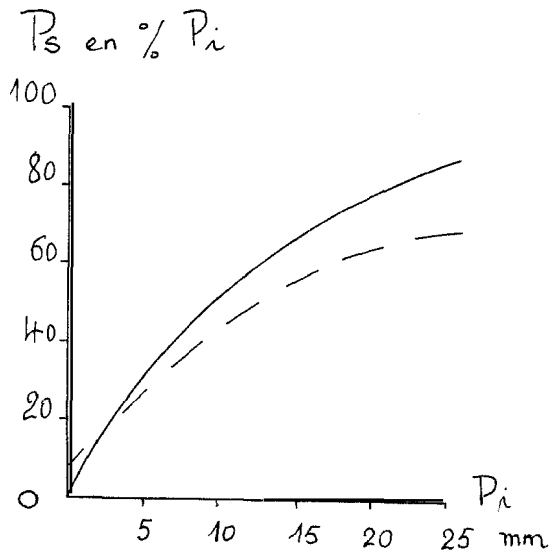
#### d. Discussion et conclusion

Une première conclusion intéressante est de constater le faible écoulement le long des troncs du Sapin de Vancouver : 0,2 ; 0,5 ; 1 et 2%  $P_i$ . Ces résultats corroborent ceux de STALFELT en Suède (0,4%  $P_i$ ) ; d'OVINGTON à Bedgebry (0,13%  $P_i$ ) (in OVINGTON, 1954) et d'AUSSENAC (1968) qui trouve un écoulement maximal de 1,6%  $P_i$ .

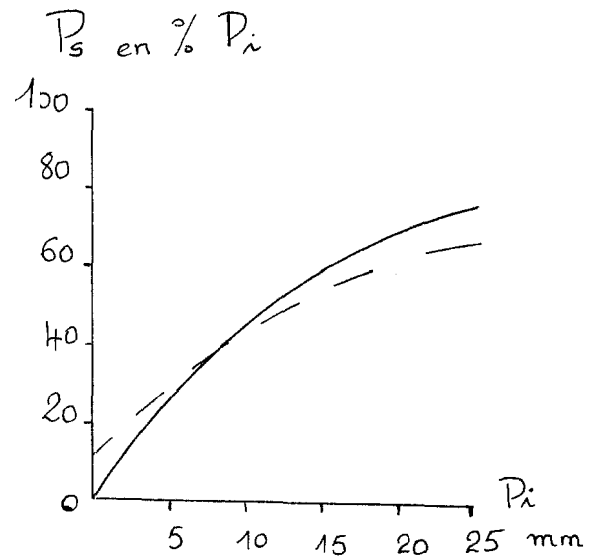
Densité (arbres/ha)	530	620	730	1620	1760	2174	-
Age (ans)	24	35	24	24	24	20	40
$P_t$ % $P_i$	0,2	1,0	0,50	1,0	2,00	0,13	0,4

De ce tableau nous pouvons dire que, malgré sa faible valeur, l'écoulement le long des troncs varie très sensiblement d'une densité à l'autre. Il ne semble pas, d'après les résultats dont nous disposons, qu'il y ait une corrélation significative avec l'âge. Si l'on sait par ailleurs que le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb) peut avoir un écoulement de 13% (MITSCHERLICH et MOLL, Allemagne, 1970 ; in BOULANGEAT, 1978) et même de 15% (AUSSENAC, 1975) , on comprend alors aisément que le Sapin de Vancouver soit considéré comme une essence forestière à faible écoulement. La représentation schématique (figure 5) est très édifiante.

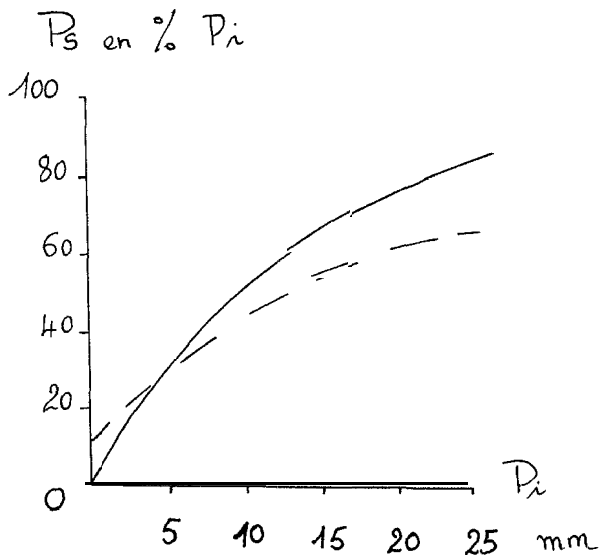
Figure n° 6. Variation de l'eau arrivant au sol ( $P_s$ ) en fonction de la pluie incidente ( $P_i$ )



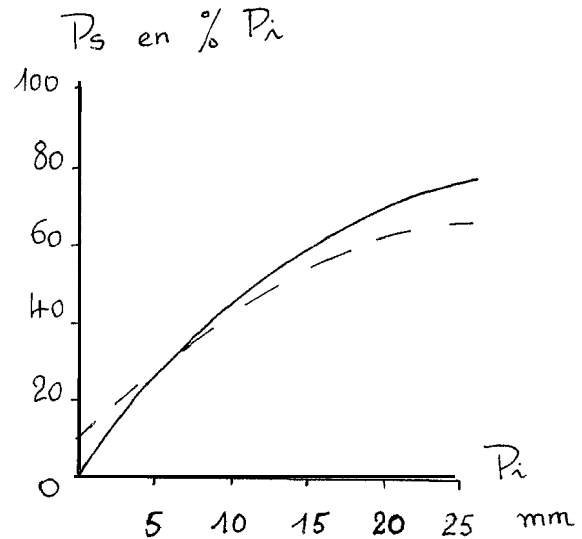
P.I d = 730 arbres/ha



P.II d = 1620 arbres/ha



P.III d = 530 arbres/ha



P.IV d = 1760 arbres/ha

— Résultats de nos mesures

--- Sapin de Vancouver d = 2.17 arbres/ha (OVINGTON, 1954)

Dans cette même étude, nous avons cherché si effectivement il y avait une corrélation positive entre le diamètre de l'arbre et le volume d'eau récolté.

Pour 3 arbres-moyens la relation est vérifiée : plus l'arbre est gros, plus il récolte d'eau [circonférence en mm de 528 (P II), 603 (P IV) et 803 (P I)]. Cependant la hauteur d'eau que recueille l'arbre de 835 mm, de la parcelle III, n'est pas la plus forte valeur (ceci à chaque mesure).

A. ESCHNER (1967) rapporte des résultats obtenus sur des sapins par HOPPE ; résultats qui justifient qu'il est possible d'avoir des relations comparables aux nôtres.

Nous savions déjà que le Sapin était un résineux à ramification horizontale (PARDE, 1974) : ce qui peut expliquer le faible écoulement ; mais en plus notre arbre-moyen de la P. III semblait avoir un mode d'insertion des branches qui ne favorisait pas l'écoulement de l'eau des branches au tronc. Une fois de plus, se fait sentir l'absolue nécessité d'avoir plusieurs arbres-échantillons dans une même parcelle.

La pluie qui arrive au sol ( $P_s$ ) varie de 62,5%  $P_i$  (P II  $d = 1620$  arbres/ha) à 67%  $P_i$  (P. III  $d = 530$  arbres/ha).

Nous avons représenté graphiquement les courbes ( $P_s$  en %  $P_i$  en fonction de  $P_i$ ) de nos quatre parcelles et comparé chacune d'elles à celle obtenue par OVINGTON (1954) dans un peuplement d'*Abies grandis* de densité 2 174 arbres/ha (figure 6).

Pour chaque cas de figure, nous remarquons que plus il pleut, plus les deux courbes s'écartent.

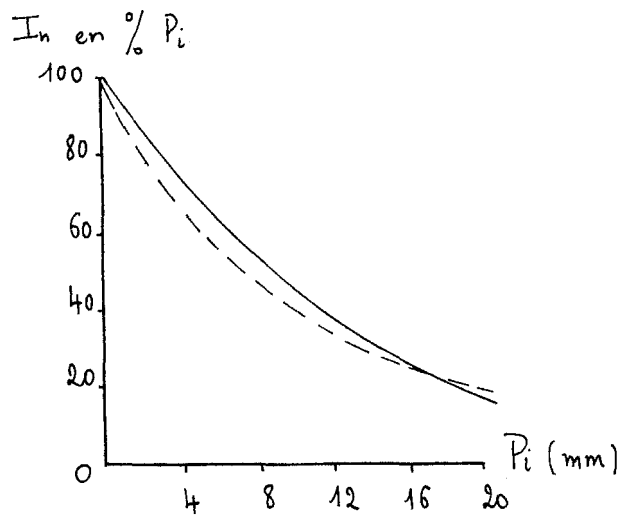
A un  $P_s$  et à un  $P_i$  donnés, cet écart n'est pas le même pour les quatre cas considérés ; la courbe d'OVINGTON est toujours en dessous de la nôtre et la différence de densité entre deux de nos parcelles se traduit par un écart plus ou moins accentué selon le cas.

De ces observations, il ressort qu'il y a une variation de l'eau qui arrive au sol ( $P_s$ ) ; fluctuation apparemment liée à la densité.

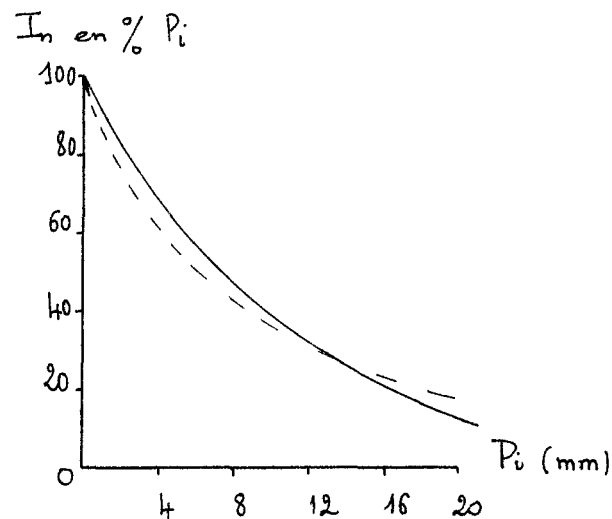
Les interceptions (1,) des quatre peuplements sont assez voisines malgré la différence de densité. Nous pensons qu'elles représentent des valeurs correctes en comparaison



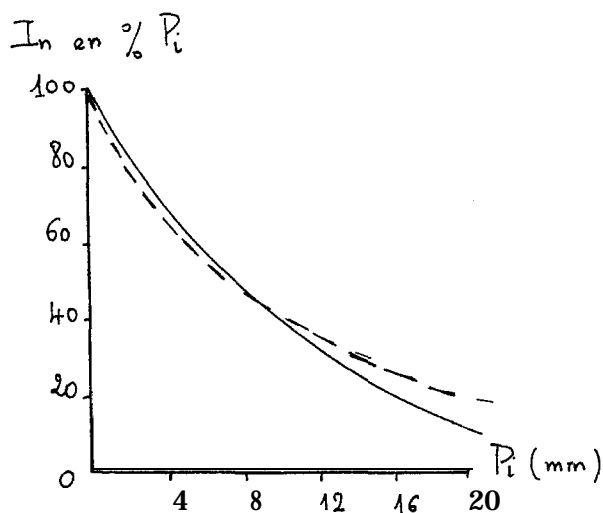
Figure n°7. Variation de l'interception ( $I_n$ ) en fonction de la pluie incidente ( $P_i$ )



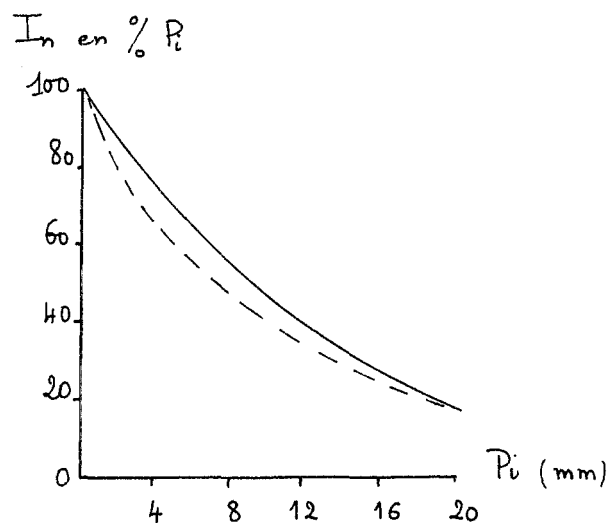
P.I d = 730 arbres/ha



P.II d = 1620 arbres/ha



P.III d = 530 arbres/ha



P.IV d = 1760 arbres/ha

| Résultats de  
 | : Nos mesures

| : Sapin de Vancouver d = 620 arbres/ha ( - AUSSENAC, 1968)

de celles trouvées pendant deux années de mesures en Lorraine (AUSSENAC, 1968) ; la courbe d'interception en fonction des précipitations qui a résulté de ces travaux est comparée à chacune de nos quatre courbes (figure 7).

La courbe d'AUSSENAC ne se superpose à aucune des nôtres mais l'écart est relativement faible.

En prenant la parcelle IV, plus de deux fois et demie plus dense que celle d'AUSSENAC (1760 arbres/ha contre 620), les courbes se touchent aux environs de 20mm de pluie incidente.

Pour les autres parcelles, l'écart est moindre et le chevauchement des deux courbes considérées a lieu entre 10 et 15 mm. C'est la preuve que cette différence de variation de l'interception entre les parcelles est relativement faible.

En reprenant tous nos résultats, nous avons établi sur un même graphique les variations de  $P_s$ ,  $I_n$  et  $P_t$  en fonction de la densité (figure 8). Nous avons aussi représenté les valeurs trouvées dans le carré latin de Douglas qui juxtapose le nôtre.

Le Sapin de Vancouver et le Douglas sont deux espèces qui vivent dans la même aire écologique ; ils constituent des peuplements presque toujours en mélange. Aussi nous a-t-il paru intéressant de les comparer sur le plan des composantes de la pluie incidente.

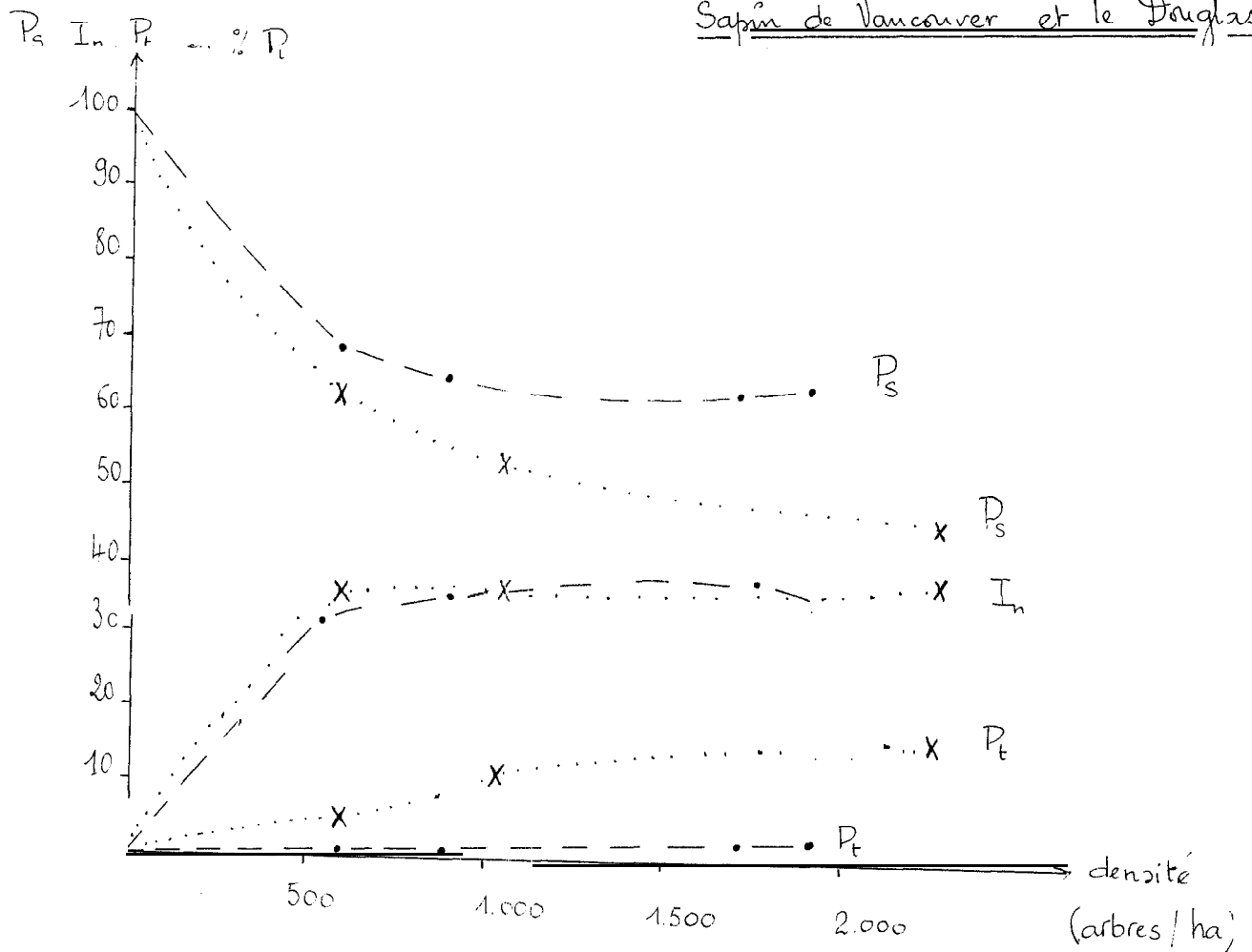
Nous avons déjà constaté que le Douglas avait un écoulement plus important que le Sapin de Vancouver (figure 5). Par contre la quantité d'eau arrivant au sol sous l'*Abies grandis* ( $P_s$ ) est supérieure à celle du Douglas : les deux phénomènes semblent se compenser.

L'interception est sensiblement la même aussi bien au niveau des deux espèces qu'en fonction de la densité au sein d'un même peuplement. Pour des plantations de même âge que les nôtres (25 ans), BOULANGEAT (1978) a une interception de 35 à 37%.

C'est par conséquent au niveau de la distribution de l'eau au sol ( $P_s$  et  $P_t$ ) qu'intervient l'influence de la densité ; les peuplements à couvert fermé, que nous avons étudiés, interceptent sensiblement la même quantité d'eau.

Figure n° 8 Variation de  $P_s$ ,  $P_t$  et  $I_n$  en fonction de la densité pour le

Sapin de Vancouver et le Douglas.



— · — · — Carre latin Abies grandis

· · · · · x · · · · · Carre latin Douglas (Boulaye, 1978)

$P_s$ : précipitations arrivant au sol

$I_n$ : interception

$P_t$ : Écoulement le long des troncs.

### 3. EVOLUTION DES NAPPES PERCHEES

#### a. Dispositif de mesure

Nous avons travaillé sur un sol brun lessivé à pseudoqley, développé sur des marnes liasiques recouvertes de limons. Il a été étudié et décrit de façon très détaillée (SCHNEIDER, 1972). Aux environs de 50 - 70 cm, l'existence d'une couche imperméable de pseudoqley sert de "plancher" à la nappe d'eau libre stagnante résultat de l'accumulation du drainage de l'eau de gravité : une telle nappe est dite "perchée".

C'est donc dans notre cas une nappe alimentée par les eaux de surface, c'est-à-dire par les eaux d'infiltration.

Elle est dite temporaire parce que disparaissant plus ou moins rapidement selon les conditions climatiques.

Cette eau, tout en étant un stock de réserve, peut être de par le milieu asphyxiant ou de par la limitation de la profondeur d'enracinement, une contrainte majeure pour la végétation. L'évolution de cette nappe a été suivie grâce à la mise en place de tubes piézométriques.

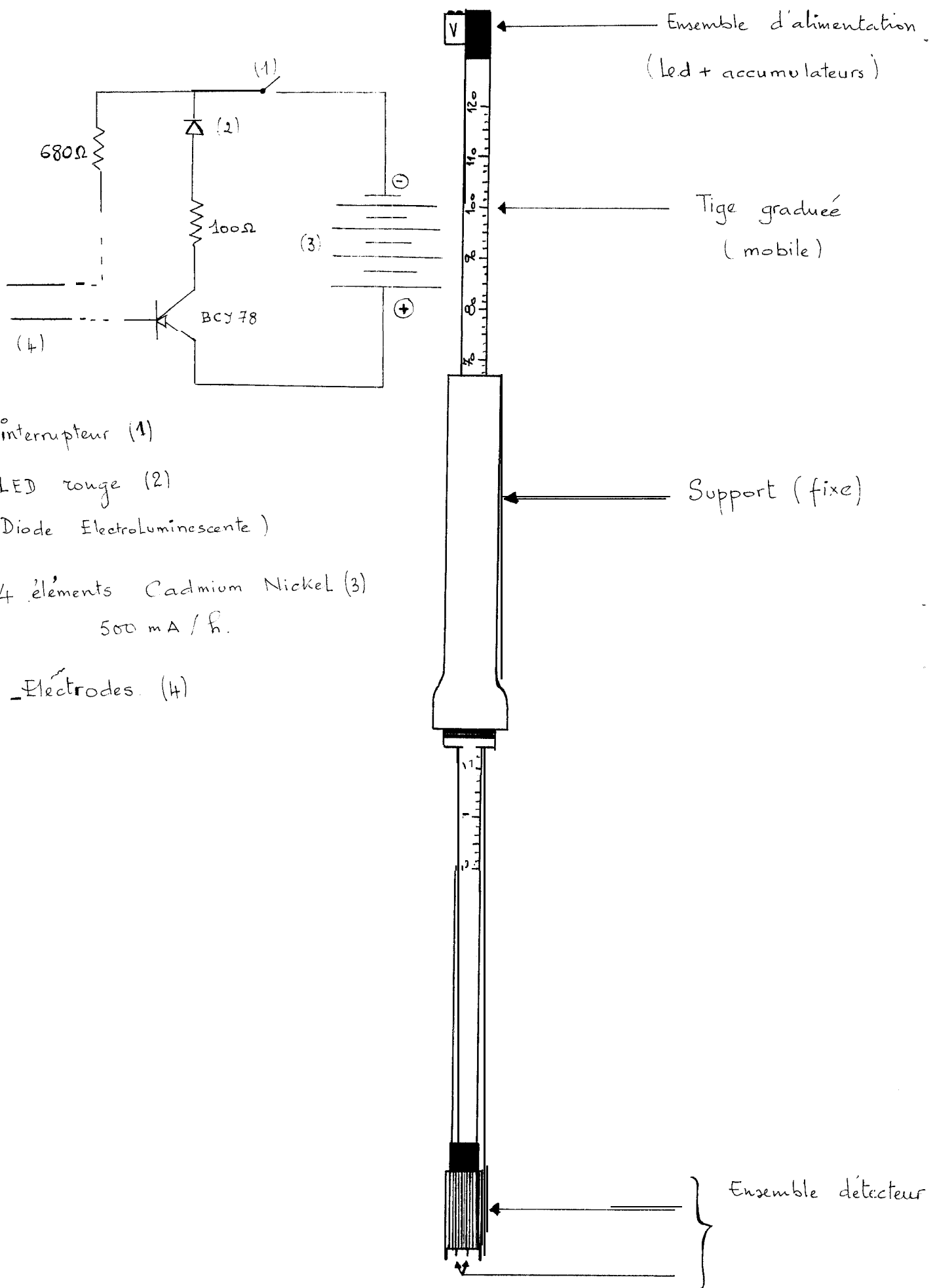
Les piézomètres étant des appareils servant à la mesure de compressibilité des liquides, gaz et solides, c'est-à-dire au pouvoir qu'ont ces états de la matière de réduire de volume sous l'action d'une pression (cf. Loi de MARIOTTE).

Nos piézomètres (schéma 3) sont des tubes en polyvinyle de 80 mm de diamètre, percés de nombreux petits orifices sur un mètre pour favoriser la pénétration de l'eau. Ils ont une longueur totale de 1,20 mètre et une hauteur hors-sol de 10 cm. Afin d'éviter le ruissellement le long des tubes, nous avons utilisé une tarière de même diamètre. Chaque tube est soigneusement fermé par un bouchon.

Les trous qui, de fait ont 1,10 m de profondeur, permettent aux tubes de se situer bien en dessous du plancher argileux (base de la nappe).

En utilisant cette marge, on risque d'avoir de l'eau dans le tube et ceci en l'absence de nappe.

# Schéma n°4. Jauge électrique (et montage)



(1) = interrupteur (1)

(2) = LED rouge (2)  
(Diode Electroluminescente)

(3) = 4 éléments Cadmium Nickel (3)  
500 mA / h.

(4) : -Électrodes. (4)

Ensemble d'alimentation  
(led + accumulateurs)

Tige graduée  
(mobile)

Support (fixe)

Ensemble détecteur

Nous avons essayé de supprimer ce risque en pompant systématiquement les piézomètres pour les vider après chaque mesure.

L'eau stagnante était donc éliminée et la prochaine mesure devait refléter fidèlement l'état réel de la nappe.

Nous disposions d'une pompe à diaphragme qui à chaque pression délivrait 0,5 litre.

Notre but était donc de connaître, chaque jour, le toit de la nappe. L'Unité de Bioclimatologie avait, en la circonstance, mis au point une jauge électrique avec un voyant rouge qui s'allumait dès que les électrodes touchaient l'eau et la lecture se faisait directement sur un ruban fixe à la tige.

Représentation et montage (schéma 4).

Wotre dispositif comprenait 29 tubes dont :

- 11 dans la parcelle la moins dense (P. III)
- et 18 également répartis dans les 3 autres parcelles. (figures 1, 2, 3, 4).

#### **b. Résultats**

Nous avons fait les mesures du 28 novembre 1981 au 30 juillet 1982, mais la nappe n'était présente qu'entre le 1er décembre 1981 (après une pluie de 14 mm) et le 19 avril 1982. Elle est apparue simultanément dans les 4 parcelles. Nous avons qualifié d'hivernale cette période de 4 mois et demi de présence de la nappe perchée.

Il aura fallu l'orage du 14 juillet (53 mm) pour constater des traces d'eau au fond des piézomètres. A aucun autre moment la nappe ne s'est rechargée.

Le premier résultat intéressant est la disparition quasi définitive de la nappe vers la mi-avril sous les quatre peuplements.

Ce constat corrobore les conclusions obtenues et relatives au départ de la nappe sous les Résineux en forêt d'Amance (LEVY, 1969), (AUSSENAC, 1975), (BOULANGEAT, 1978).

<u>Année</u>	<u>Peuplement</u>	<u>Apparition</u>	<u>Disparition</u>
1967	Sapin de Vancouver	20 octobre	19 avril
1969	Sapin de Vancouver	15 décembre	19 avril
1982	Sapin de Vancouver	1er décembre	15 - 19 avril
1978	Douglas	6 - 8 novembre	2ème quinzaine Avril

Pour chaque parcelle, le niveau moyen de la nappe est donné par la moyenne des relevés des tubes.

$$(8) \bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^p n_i}{p}$$

n = profondeur du toit de la nappe  
p = nombre de tubes piézométriques

Après une mesure, l'évolution de chaque tube est suivie graphiquement et comparée par transparence aux 28 autres (ANNEXE III).

Par ailleurs, nous avons calculé l'écart-type ( $\sigma$ ) lors de la détermination du niveau moyen de la nappe afin d'évaluer la dispersion des mesures autour de la moyenne. Les corrélations nous ont paru satisfaisantes. Nous constatons cependant un écart-type relativement élevé lors de l'apparition des nappes et qui devient faible au moment de leur disparition.

<u>Parcelles</u>	<u>densité</u> (arbres/ha)	<u>Ecart-type (cm)</u>	
		<u>apparition</u>	<u>disparition</u>
P. I	730	30	1 à 2
P. II	1760	20	1 à 3
P. III	530	37	3
P. IV	1620	15	0,5 à 1

NOUS constatons aussi que dans la P.I (730 arbres/ha) nous avons eu une présence de nappe plus tardive (disparition le 29 avril). Il est difficile d'expliquer ce fait mais nous pensons qu'il pourrait être lié au temps de réaction des tubes de la parcelle. Il ne semble pas y avoir une explication topographique.

Pendant cette période de non-végétation où l'évaporation du sol et la transpiration des végétaux sont très faibles, l'abaissement de la nappe s'explique par les pertes par drainage (en profondeur et/ou latéral).

Un modèle de régression linéaire a déjà été utilisé dans un peuplement voisin de Douglas pour quantifier le drainage (BOULANGEAT, 1978). Nous avons essayé de l'améliorer en y intégrant l'évapotranspiration potentielle (E.T.P.).

Ainsi, la fluctuation de la nappe, enregistrée entre le jour  $j$  et le jour  $j + 1$  ( $\Delta n = n_j - n_{j+1}$ ) dépendrait :

- de la profondeur de la nappe au jour  $j$  ( $n_j$ )
- de la pluie alimentant le sol au jour  $j$  [[ $(P_s + P_t)_j$ ]]
- et de la demande climatique le jour  $j$  ( $ETP_j$ )

L'intérêt d'une telle étude est que non seulement on arrive, si les résultats sont satisfaisants, à les introduire dans le calcul du bilan hydrique (formule 1) mais aussi on aboutit à une étude descriptive de la consommation en eau des arbres. Lorsqu'il n'y a pas de fluctuation de la nappe, l'eau perdue par drainage représente exactement la pluie qui est arrivée au sol (ceci en l'absence de transpiration c'est-à-dire en hiver). Ainsi, pour évaluer le drainage quotidien, il suffit de poser  $\Delta n = 0$ . L'équation linéaire est de la forme

$$\left[ \Delta n \right]_j^{j+1} = a + b (n_j) + c [(P_s + P_t)_j] + d (ETP_j)$$

avec trois variables explicatives ( $n$ ,  $P_s + P_t$ ,  $ETP$ ) et une variable expliquée ( $\Delta n$ ).

En annulant  $\Delta n$  on obtient

$$\Delta n = 0 \Rightarrow (P_s + P_t)_j = \frac{-a - b(n_j) - d(ETP_j)}{c} = D + Fmm / \text{jour} \quad (9)$$

$\Delta n$  = différence de deux mesures consécutives

$n$  = niveau moyen de la nappe.

$ETP$  = données météorologiques de Nancy-Essey

$P_s + P_t$  = pluie arrivant au sol. Elle sera estimée à partir des mesures que nous avons faites sur le terrain, puisque pendant l'hiver et à cause du gel, il nous était pratiquement impossible d'installer des pluviomètres.

Nous avons essayé de faire varier la période et les variables prises en compte dans les modèles de régression linéaire.



Ainsi, nous avons fait les calculs suivants :

- (1) Toute la période de présence de la nappe avec les facteurs suivants :  $n_j, n_{j+1}, \Delta n, (P_s + P_t)_j$
- (2) Le même calcul que (1) mais avec  $ETP_j$  en plus.
- (3) Début d'apparition de la nappe jusqu'au moment où  $ETP$  devient importante avec les variables  $n_j, n_{j+1}, \Delta n$  et  $(P_s + P_t)_j$
- (4) Même période que (3) mais en y incluant  $ETP_j$
- (5) Nos relevés piézométriques nous ont montré que les tubes avaient des réponses différentes : ce qui veut dire que la nappe ne suit pas une linéarité stricte. Dans le but de donner un aspect parabolique à la variation du drainage, nous avons introduit les facteurs  $n_j^2$  et  $n_{j+1}^2$  à la place de  $n_j$  et  $n_{j+1}$

Nous avons obtenu les coefficients de corrélation suivants ( $R^2$ ) :

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
P. I	0,70	0,68	0,87	0,88	0,89
P. II	0,40	0,45	0,57	0,56	0,56
P. III	0,54	0,58	0,66	0,68	0,68
P. IV	0,50	0,50	0,55	0,75	0,57

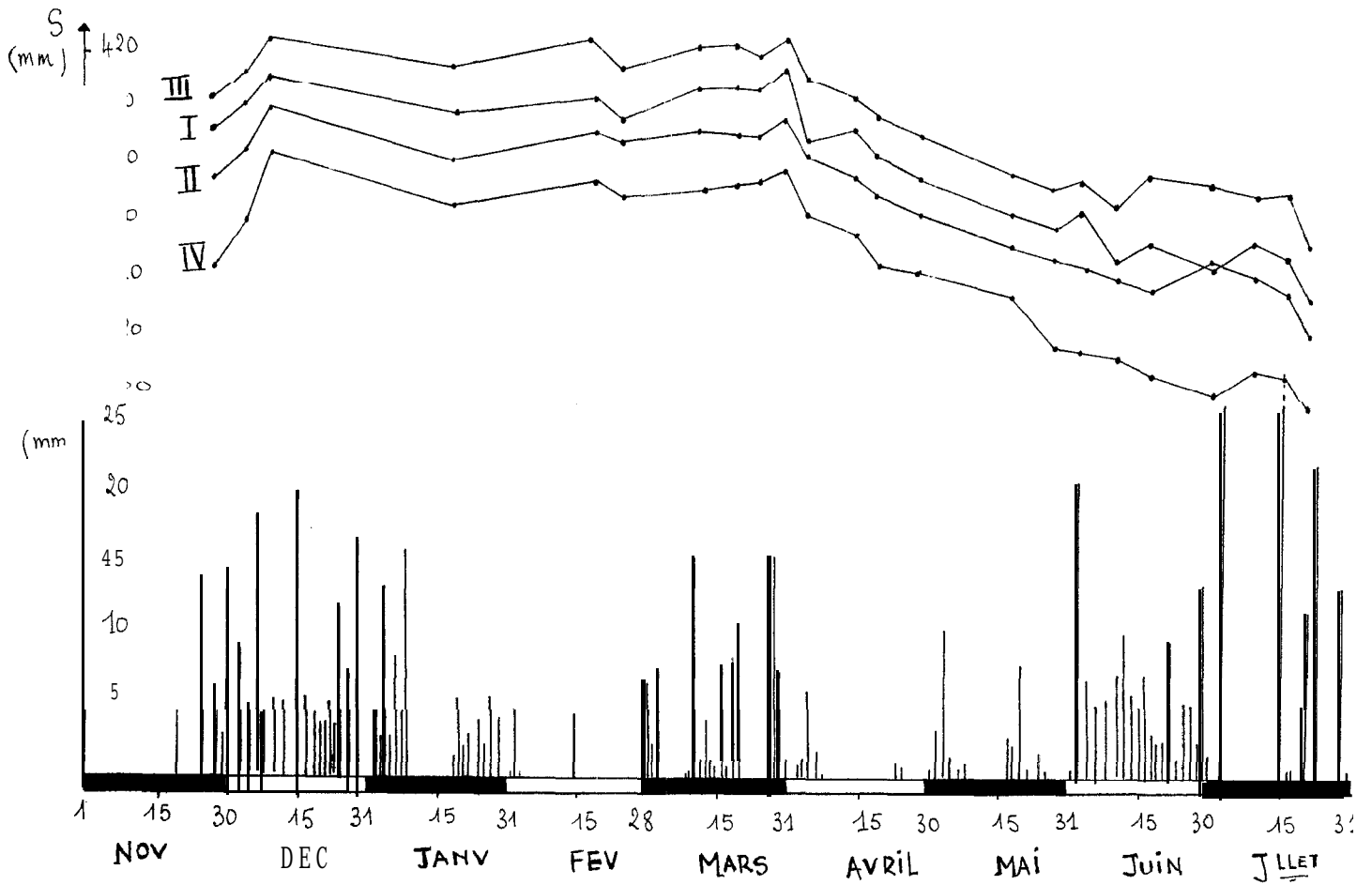
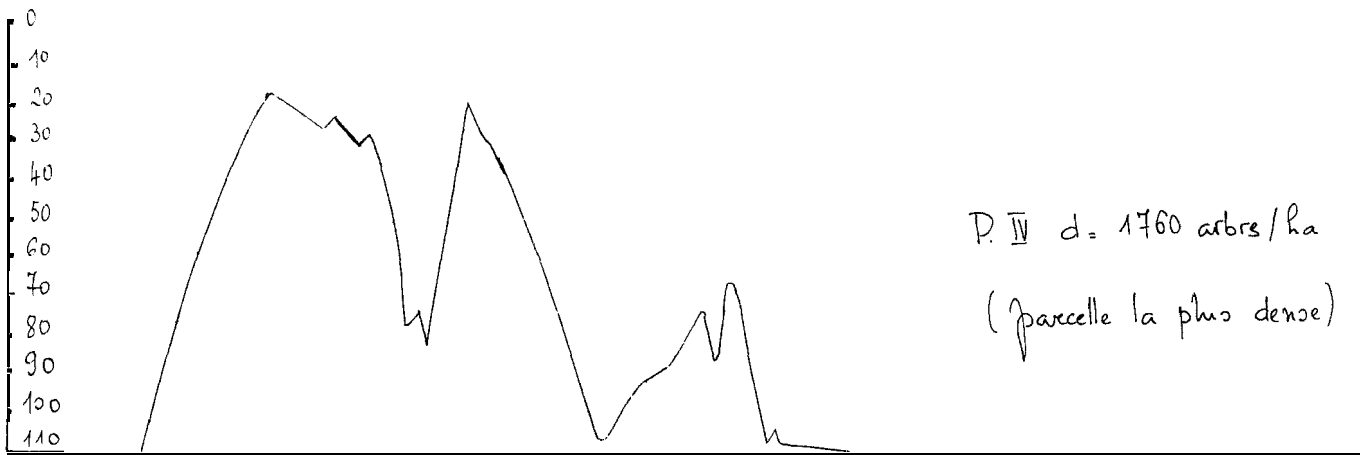
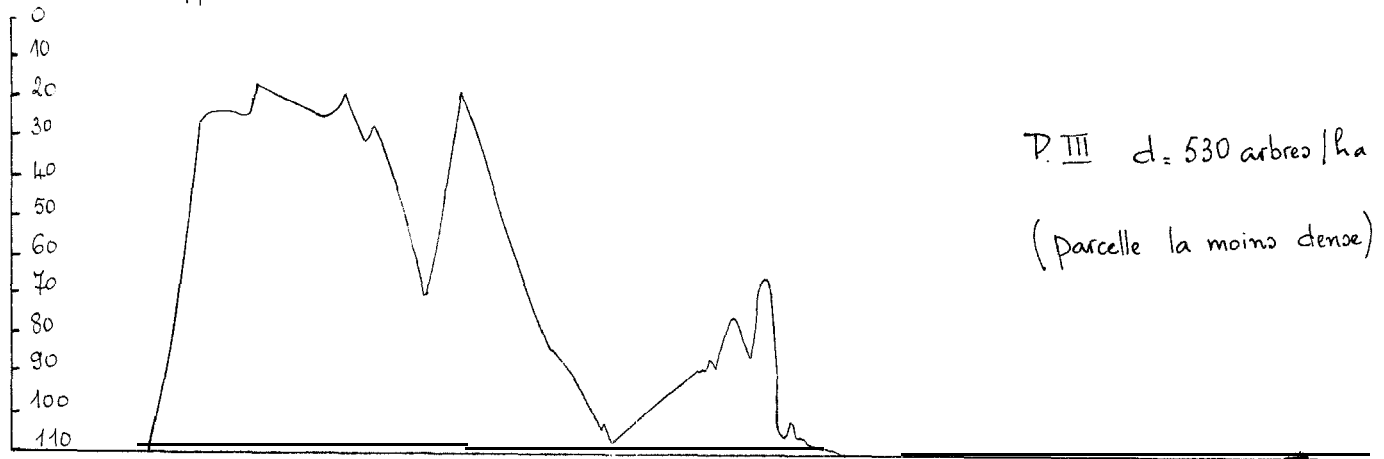
Ces résultats ont donné des valeurs de  $R$ , qui, dans nos conditions expérimentales, ne nous ont pas paru satisfaisantes. Elles sont plus faibles que celles trouvées au carré latin de Douglas (BOULANGEAT, 1978) qui n'ont cependant pas été retenues. Notre intention n'est pas de justifier ces résultats, mais nous tentons de les expliquer :

1". Nous avons fait un calcul débouchant sur un niveau moyen de la nappe malgré la variabilité des tubes. A notre avis, un seul tube piézométrique ne peut pas traduire toutes les fluctuations au niveau de la nappe.

2". En exploitant les résultats, nous nous sommes demandés si les tubes n'avaient pas été descendus un peu trop en dessous du pseudogley. Le cas échéant, les bruits de fond peuvent remettre en cause la validité de nos mesures.

Figure n° 9. Fluctuations de la hauteur moyenne de la nappe perchée et du stock d'eau du sol (S) en fonction de la pluie incidente (Pi)

Toit de la nappe (cm)



3". En période de neige et de gel, il devient difficile de corrélérer l'eau qui arrive au sol et celle qui a alimenté la nappe au moment de la mesure. Il n'était évidemment pas question d'attendre le dégel ou la fonte de la neige pour effectuer nos relevés.

4°. En plus de ces considérations, il apparaît fondamental de faire le maximum de mesures pour espérer aboutir à des résultats concluants.

Nos obligations scolaires ne nous ont pas permis de faire des mesures quotidiennes:

Il faut, autant que possible, faire des relevés très rapprochés. Nous avons représenté pour deux parcelles (la plus dense et la moins dense) la fluctuation de la nappe en fonction de la pluie incidente ( $P_i$ ) (figure 9).

Les courbes ont la même allure ; la nappe se vide dans les deux cas pendant une courte période sans pluie (Ière quinzaine de janvier) ; le même phénomène se répète durant le mois de février (0,3 mm la 2ème quinzaine).

La nappe se recharge avec les 67,70 mm tombés entre le 1er et le 21 mars, fluctue jusqu'au 31 mars. A partir de ce jour, elle descendra jusqu'à sa disparition totale.

Cette représentation permet tout de même de faire une étude descriptive de la perte en eau du sol.

Elle montre, malgré une précision insuffisante pour chiffrer le drainage, qu'il y a une corrélation positive entre le niveau moyen de la nappe et la pluie.

Nous pouvons aussi remarquer que le niveau moyen le plus élevé atteint par la nappe varie selon les parcelles.

<u>Parcelles</u>	<u>Densité</u> (arbres/ha)	<u>Date</u>	<u>Niveau maximum</u> <u>atteint (cm)</u>
P. I	730	8. 12. 1981	19, 17
P. II	1620	23. 12. 1981	19, 74
P. III	530	23. 12. 1981	16, 91
P. IV	1760	23. 12. 1981	17, 40

Nous remarquons que la nappe de la P. 1 qui sera la dernière à disparaître, atteint son maximum plus tôt que celles des autres parcelles.

La disposition de la nappe, vers mi-avril, coïncide avec le début de la saison de végétation qui implique le démarrage de la transpiration. C'est à ce moment que la demande climatique se précise : l'évapotranspiration potentielle dépasse pour la première fois 4 mm.

Il s'avère donc que la nappe constitue en fait la première source d'alimentation des arbres ; il devient alors possible de parler d'un "équivalent en eau de la nappe" qui, ajouté à la réserve utile, représente le stock d'eau disponible dans le sol. Au moment de la vidange de la nappe et quand les arbres entameront la réserve utile, nous serons à la capacité au champ. Elle n'est donc pas une nappe défavorable et ceci d'autant plus qu'elle ne sera pas présente pour asphyxier les racines quand ces dernières commenceront leur activité d'absorption.

#### 4. MESURES DE LA TENEUR EN EAU DU SOL

##### a. Concept de disponibilité en eau : la réserve utile

La réserve en eau du sol représente la quantité d'eau qui, retenue par capillarité contre les forces de pesanteur, peut être recédée à l'atmosphère par évaporation ou transpiration. THORNTHWAITE propose un schéma pour évaluer mois par mois ou sur l'ensemble de l'année l'Evapotranspiration réelle, les périodes de déficit hydrique et leur importance, de même que l'écoulement. Ce schéma, loin d'être universel, représente un modèle qui pose le problème de la réserve utile (HALLAIRE, 1968).

Nous savons que pour un horizon d'épaisseur (z), de densité apparente (d.a), la hauteur d'eau quand l'humidité est à la valeur H est :

$$Q_m = H \times d.a \times Z \quad (10)$$

Elle est exprimée à la même unité que l'épaisseur de sol (mm le plus souvent). Pour ce qui est de la réserve utile (R.U.), THORNTHWAITE la suppose égale à 100 mm d'eau ( $\approx$  4 pouces). S'il semble admis que la R.U. représente 45% de la quantité d'eau contenue dans le sol à la capacité au champ (45% dont 30% de réserve facilement utilisable (RFU) et 15% "plus diffi-

cilement utilisable") (DUTHIL, 1970) ; il n'en demeure pas moins qu'on dispose de formules pour les calculer ; ainsi

$$RFU = \sum_0^P Z_i \times d.a_i \times (H_{CR} - H_{RC}) \quad (11)$$

$$RU = \sum_0^P Z_i \times d.a_i \times (H_{CR} - H_F) \quad (12)$$

$H_{CR}$  = Humidité à la capacité de rétention

$H_{RC}$  = Humidité de rupture de lien capillaire = Humidité au point de flétrissement temporaire :  $pF = 3,7$ .

$H_F$  = Humidité au  $pF = 4,2$

Toujours est-il que des théories récentes s'opposent à ce sujet (HILLEL, 1974).

En effet, pour VEIHMEYER et HENDRICKSON l'eau est indifféremment disponible dans un intervalle défini par deux constantes du sol donné : la capacité au champ (c. c) et le point de flétrissement permanent (PFP). De leur côté RICHARDS et WALDLEIGH estiment que la disponibilité tend à diminuer avec la chute de la teneur en eau.

D'autres auteurs divisent cette disponibilité en domaines "facilement disponible" et "disponible de façon décroissante".

## **b. Utilisation de la presse à membrane**

### **b.1. notion de $pF$**

Nous avons utilisé la presse à membrane de RICHARDS pour déterminer les teneurs en eau à différentes humidités. Différentes forces font que le sol retient l'eau. Cette contrainte du sol (= succion  $S$ ) représente donc la pression qu'il faut lui appliquer pour en extraire l'eau. Pour rompre cette tension, une énergie appelée potentiel matriciel ( $\Psi$ ) est nécessaire.

SCHOFIELD (HELLER, 1969) propose d'exprimer le potentiel matriciel par la hauteur de la colonne d'eau exprimée en centimètres et capable d'équilibrer la succion (1 ml d'eau pèse 1g). C'est donc la hauteur à laquelle cette différence d'énergie élève 1g d'eau dans le champ de la pesanteur (CACHAN, 1981). L'échelle de variation de  $\Psi$  pouvant être très étendue dans un système comme le sol, il a été plus facile d'avoir une représentation logarithmique.

Ainsi en prenant le log décimal de  $\gamma$  , on obtient une valeur appelée (pF)

$$pF = \log \gamma \quad (13)$$

F = ancien symbole de l'énergie libre.

### **b.2. mesures effectuées**

Pour ce qui est de notre travail, nous avons prélevé des échantillons de sol tous les 10 centimètres dans les quatre parcelles choisies pour notre étude.

La présence d'une dalle très dure dans la parcelle III (d = 530 arbres/ha) à 1 mètre de profondeur nous a obligés à ne faire que 10 prélèvements.

Au laboratoire nous avons utilisé les pressions suivantes :

<u>pF</u>	<u>pression correspondante</u> (bars)
2,5	0,32
2,9	0,80
3,3	2,00
3,8	6,31
4,2	16

Avec des pressions aussi variées, nous avons utilisé la presse à membrane de RICHARDS pour les valeurs supérieures à trois bars et l'extracteur à basse pression le cas contraire. Nos échantillons de sol étaient saturés dans des anneaux de rétention par remontée capillaire avec de l'eau distillée. Le prélèvement à la tarière ayant pour conséquence le remaniement des échantillons, il aurait été plus judicieux de faire des fosses ; les contraintes matérielles ne nous ont pas permis de les creuser.

Une fois nos échantillons saturés, nous appliquions la pression désirée jusqu'à l'absence totale d'écoulement d'eau. A ce niveau de stabilité hydrique de l'échantillon, la pression appliquée indique le potentiel matriciel.

Une dessiccation à 105°C dans une étuve pendant 48 heures permet une détermination de la teneur en eau (à ce stade, il est empiriquement admis qu'une augmentation de la température ou du temps de séchage n'entraîne plus de départ d'eau : seule l'eau de constitution reste en place).

TABLEAU N° 3 - DENSITES APPARENTES SECHES DES QUATRE

PEUPLLEMENTS PAK NIVEAU DE 10 CM

Profondeur (cm)	P.I d = 730 ar- bres/ha	P.II d = 1620 ar- bres/ha	P.III d = 530 ar- bres/ha	P.IV d = 1760 ar- bres/ha
10	1,194	1,174	1,272	1,226
20	1,235	1,116	1,218	1,301
30	1,387	1,321	1,375	1,446
40	1,401	1,433	1,431	1,451
50	1,452	1,470	1,437	1,487
60	1,489	1,471	1,478	1,473
70	1,443	1,428	1,475	1,494
80	1,500	1,497	1,440	1,516
90	1,535	1,441	1,414	1,489
100	1,492	1,478	1,385	1,475
120	1,457	1,360		1,556
140	1,542			1,436
160	1,521			1,434

Nous avons calculé les humidités pondérales suivant la relation

$$(14) H_p = \frac{PF - PS}{PS} \times 100$$

Hp = humidité pondérale  
PF = poids de l'échantillon frais  
PS = poids de l'échantillon sec.

Les valeurs des humidités volumiques obtenues sont en ANNEXES IV, V, VI et VII (Humidité volumique = Humidité pondérale x densité apparente sèche). En calculant l'humidité pondérale par rapport au poids de l'échantillon frais, on évalue sa teneur en eau mais notre but étant d'étudier les mouvements d'eau, il est plus expressif d'utiliser le poids de l'échantillon sec (le rapport se fait sur une valeur constante) .

Les densités apparentes sèches des 4 parcelles ont été obtenues lors de l'étalonnage de la sonde gammaneutronique. Elles varient de 1,116 à 1,556 g/cm<sup>3</sup> - (tableau 3) et sont très voisines de celles trouvées par BOULANGEAT (1978) dans le carré latin de Douglas situé à une vingtaine de mètres du nôtre (de 1,09 à 1,6 g/cm<sup>3</sup>). Elles résultent des différences :

Densité humide - Humidité volumique.

Pour la comparaison des réserves utiles (R.U.) de nos 4 stations, s'il est généralement admis que l'humidité au point de flétrissement est à pF 4,2, notre choix de la limite supérieure (pF 2,5) est discutable.

**Nous** savons que la capacité au champ est une mesure qui se fait **insitu** alors que celle de la capacité de rétention a lieu au laboratoire (MERIAUX, 1979) et que l'écart hydrique entre les deux termes exprime un écoulement d'eau gravitaire (DUCHAUFOR, 1960). Aussi, certains auteurs proposent-ils d'appliquer aux échantillons de sol un potentiel capillaire d'autant plus bas que la texture est grossière ; ceci dans le but d'avoir une estimation la plus proche possible de la capacité au champ : pF 3 pour les sols argileux ; 2,5 pour les sols limoneux et 2,1 pour les sols sableux (BONNEAU, 1961).



Figure n° 10 Profil hydrique de la parcelle I : d = 730 arbres/ha

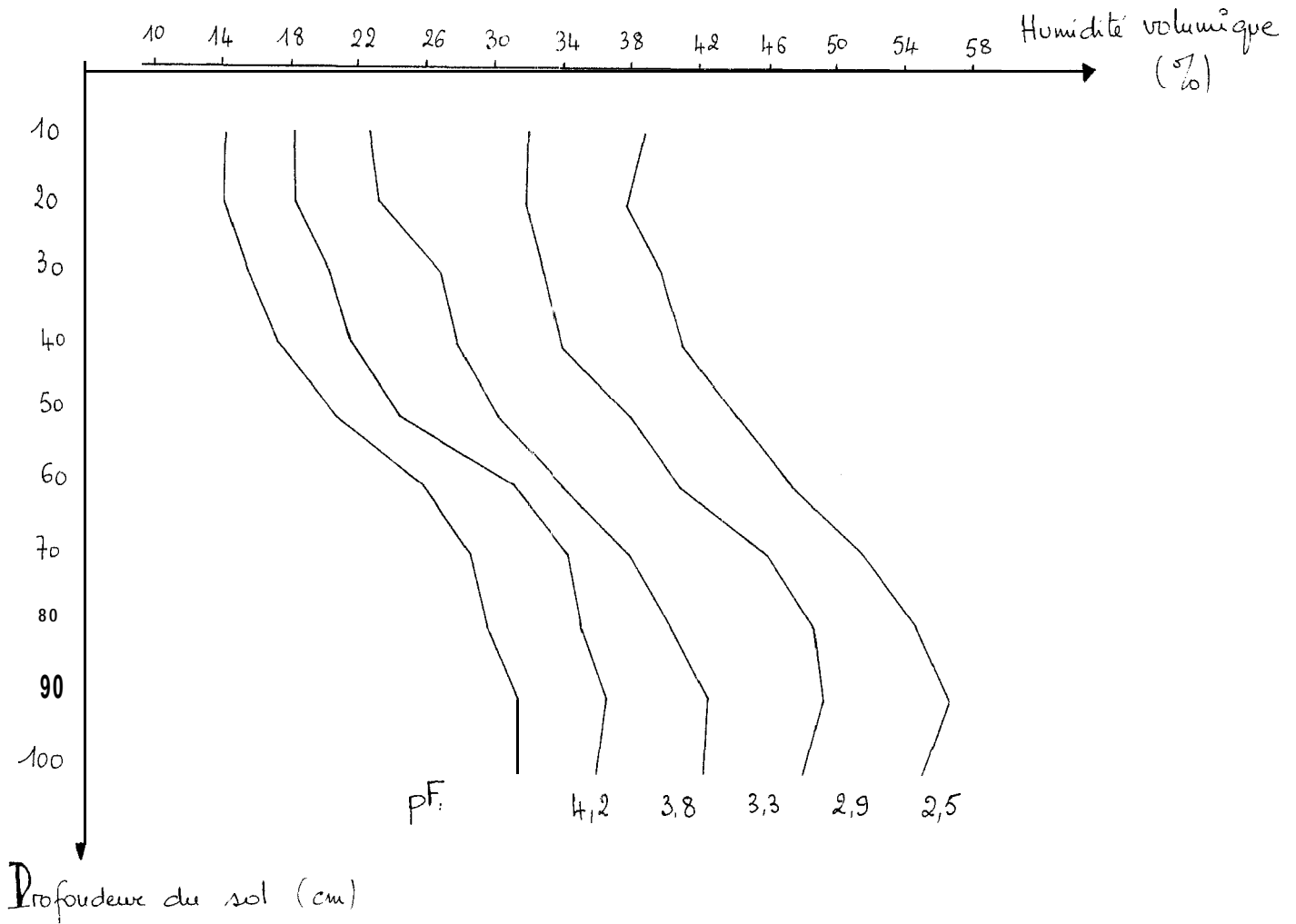


Figure n° 11. Profil hydrique de la parcelle II. d = 1620 arbres/ha

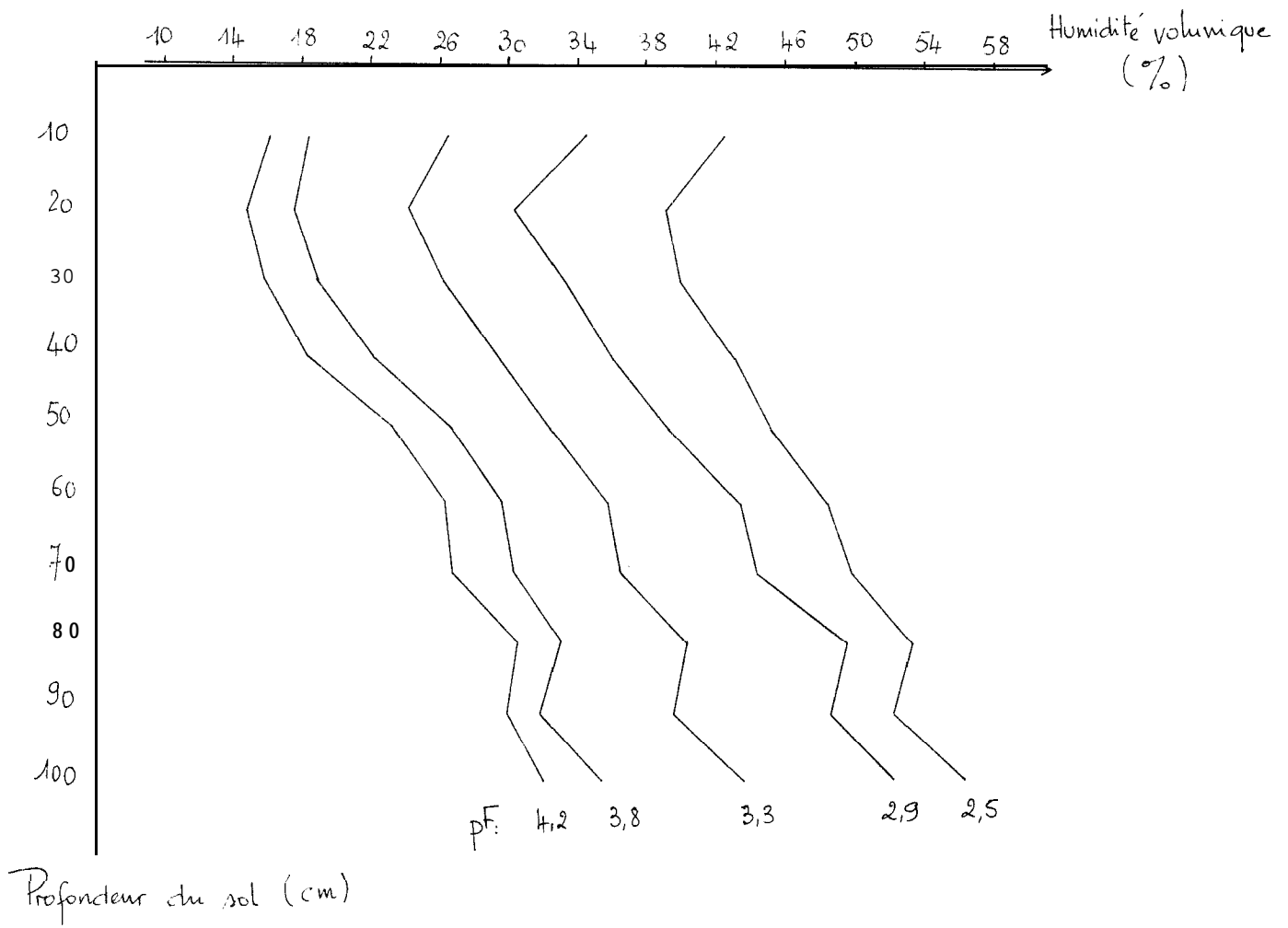


Figure N° 12. Profil hydrique de la parcelle III = 530 arbes/ha

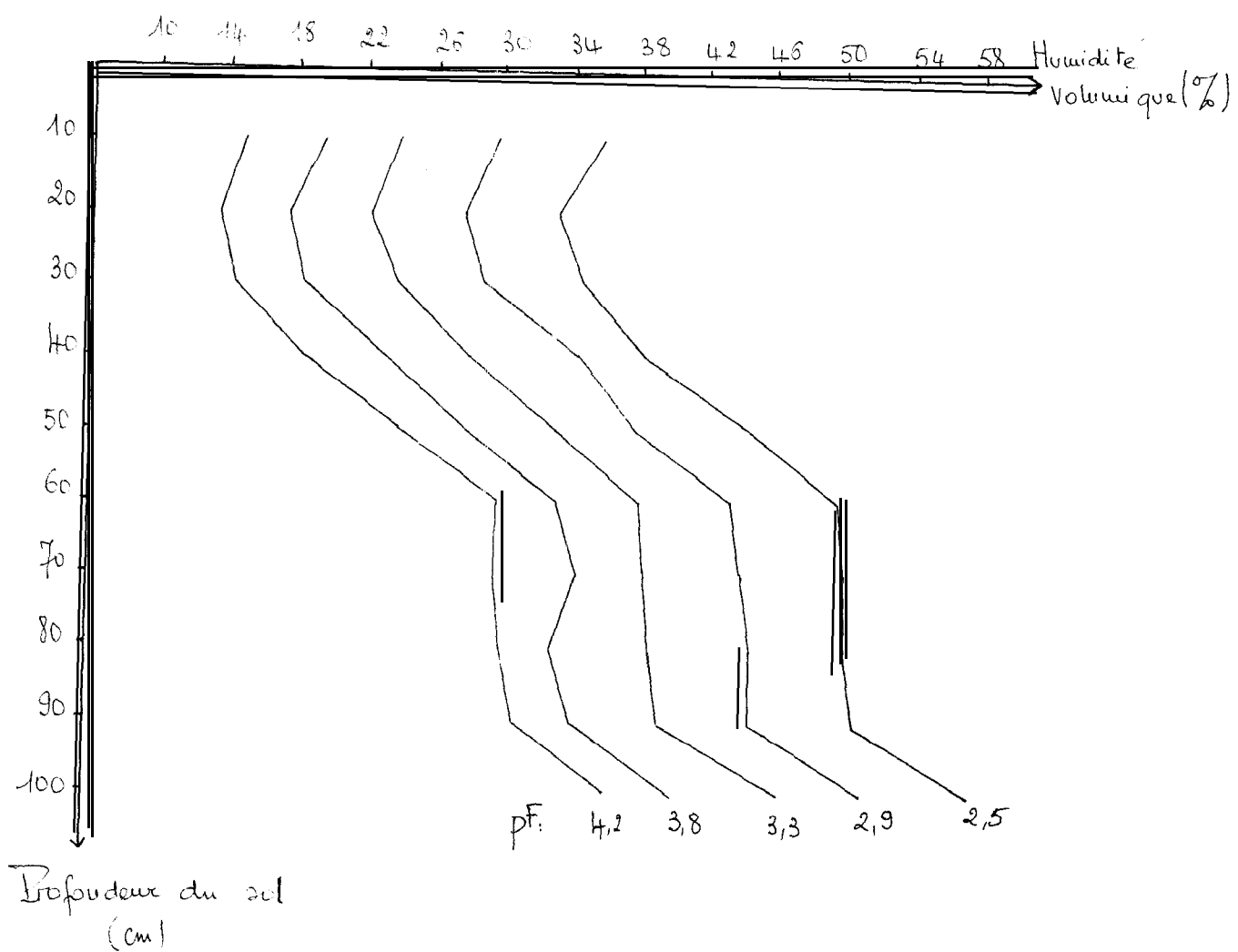


Figure n° 13. Profil hydrique de la parcelle IV d = 1760 arbres/ha

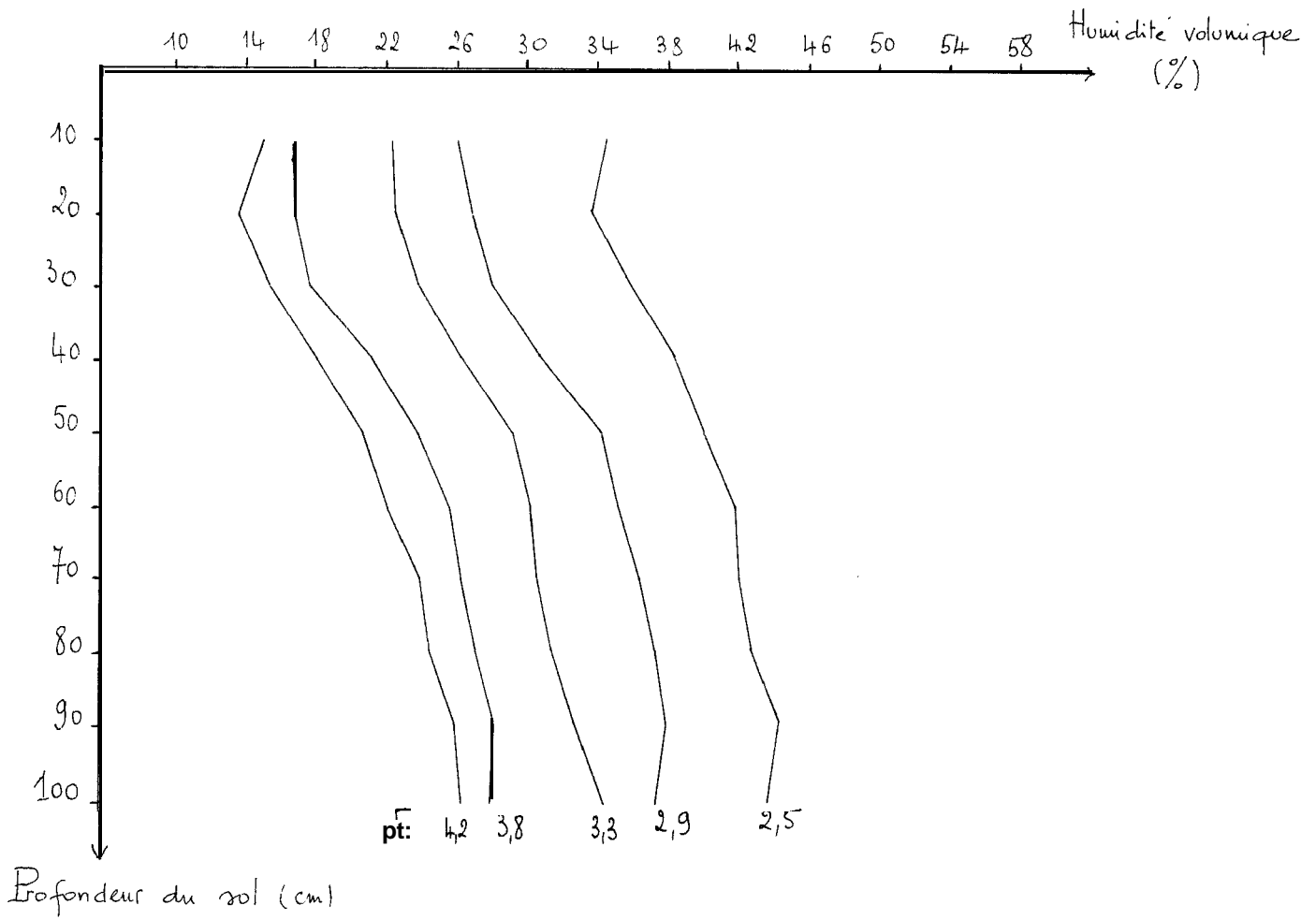


TABLEAU N° 4 - VALEURS DE LA RESERVE UTILE (RU) ET DE LA POROSITE (T)

Profondeur (cm)	P.I d = 730 arbres/ha		P.II d = 1620 arbres/ha		P.III d = 530 arbres/ha		P.IV d = 1760 arbres/ha	
	R.U (mm)	T (%)	R.U (mm)	T (%)	R.U (mm)	T (%)	R.U (mm)	T (%)
10	24,66	54,94	25,81	55,69	21,22	52,00	18,41	53,73
20	19,52	53,39	21,43	57,88	19,63	54,03	21,07	50,90
30	23,58	47,66	23,96	50,15	19,12	48,11	21,60	45,43
40	23,84	47,13	24,74	45,92	19,32	46,00	20,43	45,24
50	24,18	45,20	22,35	44,52	20,82	45,77	19,64	43,88
60	21,54	43,81	22,58	44,49	20,42	44,22	19,35	44,41
70	23,19	45,54	22,84	46,11	20,68	44,33	18,12	43,62
80	25,75	43,39	23,07	43,50	19,80	45,66	18,26	42,79
90	25,62	42,07	23,23	45,62	20,23	46,64	18,59	43,81
100	24,48	43,69	23,75	44,22	22,41	47,73	17,94	44,33
TOTAL	236,36		233,76		203,65		193,41	

T est exprimé en % du volume de sol

Notre choix du  $pF$  2,5 est justifié par nos conditions de sol et par le fait que les valeurs souvent admises ne sont que des approximations adoptées par consensus et qui sont des moyennes qui tentent de répondre à un besoin pratique d'analyses d'échantillons puisque la technique de laboratoire ne reflète pas fidèlement le comportement du sol en place.

Chacune de nos stations peut donc être caractérisée par un profil hydrique qui nous permet non seulement d'avoir la R.U. à chaque profondeur mais aussi de savoir après chaque mesure d'humidité à quelle contrainte est soumise l'eau. (figures 10, 11, 12, 13). Nos quatre graphiques ont la même allure. L'avantage de faire des  $pF$  compris entre 2,5 et 4,2 est d'obtenir des points intermédiaires qui sont déterminants dans l'allure de la courbe  $pF$ /humidité.

Sur 1 mètre de sol, nous avons obtenu les R.U. suivantes :

P.I = 236,36 mm                      P.II = 233,76 mm

P.III = 203,65 mm                      P.IV = 193,41 mm

La R.U. étant étroitement liée au type de sol considéré, on est tenté de penser obtenir approximativement les mêmes valeurs puisque nos quatre stations se trouvent à quelques mètres de distance dans le même carré latin.

Il faut savoir que plusieurs facteurs peuvent être à la base de ces variations : la texture (BONNEAU, 1961), le tassement du sol (PERIGAUD, 1963), les conditions de préparation du matériau en vue de la mesure (MONNIER et KONAN, 1968) (in MERIAUX, 1979). Les résultats indiquant les R.U. par tranche de 10 cm de sol (tableau 4), montrent que nous sommes bien placés dans les limites généralement admises : R.U. de 400mm en sol limoneux profond et 50 à 60mm en sol superficiel limité à 30 cm par un horizon difficilement pénétrable par les racines (MERIAUX, 1979). Nous avons pris soin, à titre comparatif, de calculer l'espace poral (T) de chaque niveau (10, 30, . . . 100 cm).

En effet, l'espace poral total (T) représente le pourcentage de sol non occupé par la phase solide, c'est-à-dire le volume disponible pour l'eau et/ou l'air. Il est exprimé en % du volume de l'échantillon (SOIL SURVEY, 1977).

Tous nos résultats d'humidité volumique au pF 2,5 c'est-à-dire au maximum de rétention d'eau sont inférieurs aux valeurs d'espace poral correspondantes : c'est déjà un constat non aberrant.

La porosité (T) est donnée par :

$$T = \frac{\text{Volume de tous les pores de l'échantillon}}{\text{Volume total de l'échantillon (V)}} \times 100$$

$$\text{or, volume de l'échantillon} = \frac{\text{masse du sol sec (Ms)}}{\text{densité apparente (d.a.)}}$$

et volume des pores = volume total de l'échantillon - volume de la phase solide du sol (Vs)

$$\text{Volume de la phase solide du sol} = \frac{\text{masse du sol sec (Ms)}}{\text{densité réelle (d.r.)}}$$

$$\text{Par conséquent } T = \frac{V - V_s}{V} \times 100 = \frac{Ms/d.a}{Ms/d.r} \times 100 = \left(1 - \frac{d.r.}{d.a.}\right) \times 100 \quad (15)$$

Le tableau 4 donne des valeurs de T presque deux fois supérieures à celles de la R.U correspondante mais cela ne veut pas dire que l'air et l'eau se partagent l'espace poral en trois fractions égales (2 pour l'eau et 1 pour l'air).

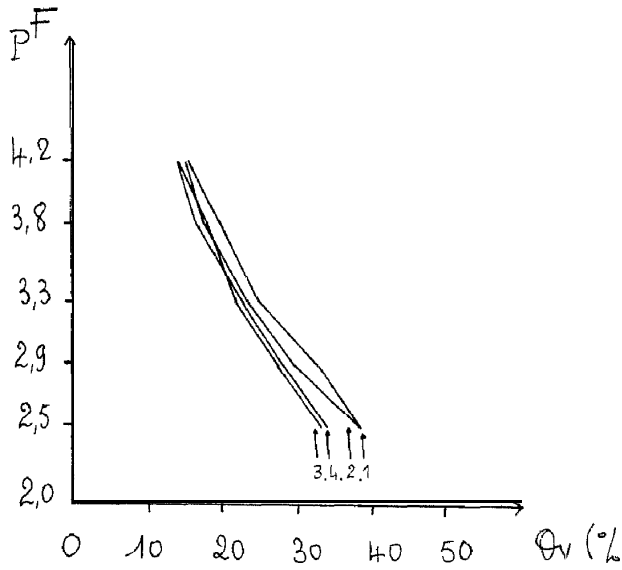
Il ne faut pas oublier qu'en deçà du pF 4,2 il y a de l'eau (hygroscopique donc non utilisable mais qu'il faut comptabiliser). Ainsi pour la P. 1 avec l'échantillon 0 - 10 cm on a une R.U de 24,66 mm (=24,66%), un T de 54,94% du volume de sol en place, et une humidité volumique de 14,48% (pF 4,2). Nous obtenons donc une teneur en eau de 24,66 + 14,48 = 39,14%. ce qui donne une capacité en air (c.a.) égale à

$$54,94 - 39,14 = 15,80\%$$

La capacité en air représente donc la différence entre la porosité et l'humidité volumique à la capacité au champ. Le sol sur lequel nous avons travaillé est très compact; il ne renferme pratiquement pas d'air et de ce fait il reste un volume disponible pour l'eau.

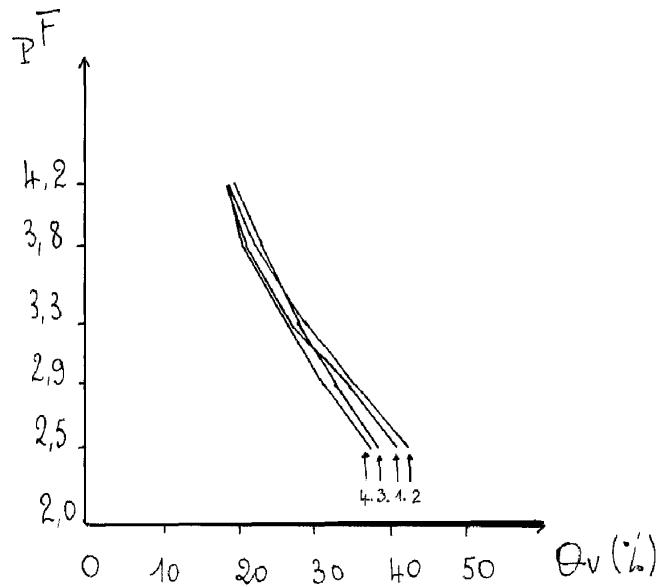
Ce volume sera donc occupé par une partie du supplément d'eau qui allait drainer une fois la capacité au champ atteinte.

wee 14. Courbes du pF en fonction de l'humidité volumique ( $\theta_v$ )  
des 4 parcelles à 4 niveaux de prélèvement différents.



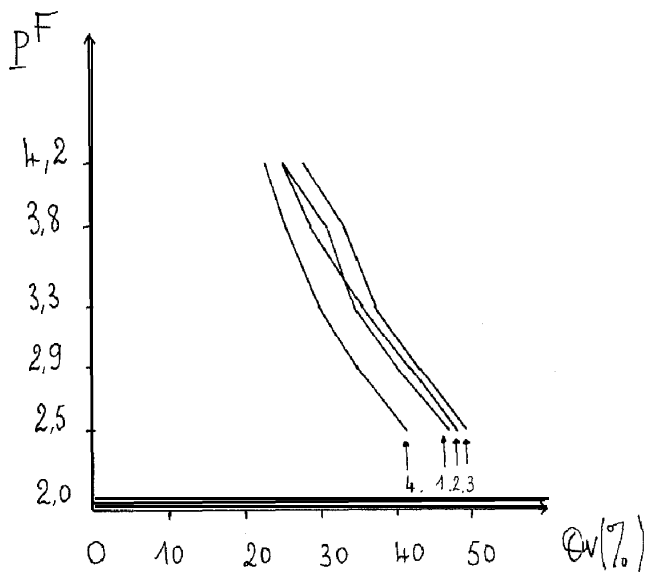
a. Niveau 10-20 cm

- 1. = Parcelle I  $d = 730$  arbres/ha
- 2. = Parcelle II  $d = 1620$  arbres/ha

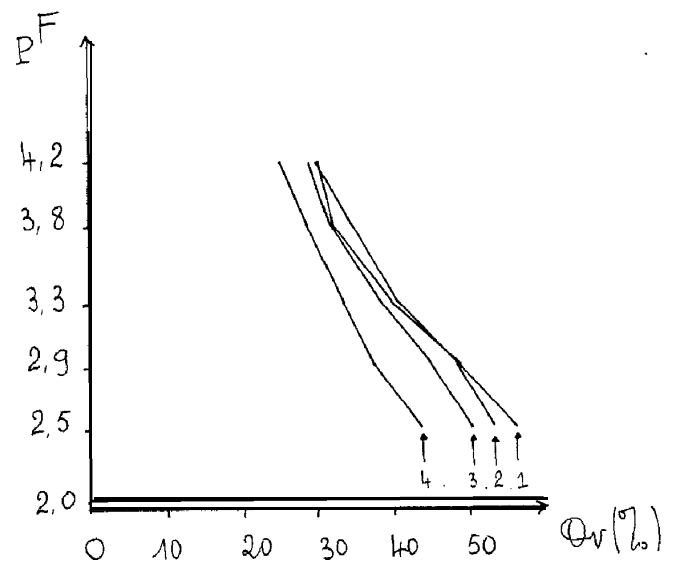


b. Niveau 30-40 cm

- 3. = Parcelle III  $d = 530$  arbres/ha
- 4. = Parcelle IV  $d = 1760$  arbres/ha



c. Niveau 50-60 cm



d. Niveau 70-80 cm



Par conséquent, si on suppose qu'il existe une faible quantité d'air piégé dans le sol, 15% environ du volume de sol en place seront constitués d'eau absorbable par les plantes.

Sur les dix premiers centimètres de la P.I, la porosité qui représente 54,94% du volume de sol en place se décompose comme suit :

- 14,48 mm d'eau capillaire non absorbable
- 24,66 de réserve utile
- 15mm d'eau disponible (en supposant 0,8% d'occupation par l'air).

La terre représente donc (100 - 54,94) 45,06% du volume de sol en place.

La nappe constitue donc un apport d'eau non négligeable. Nous avons comparé nos résultats à ceux trouvés sur un sol brun lessivé à hydromorphie de profondeur de la forêt domaniale de MARLY LE ROI à Paris (BELGRAND, 1978).

La R.U de 133,5 mm qu'elle trouve entre 0 et 75cm est assez voisine de la nôtre qui est de 138,62 mm pour la parcelle IV. Nous notons cependant une légère différence de densité vers 70 - 80cm (1,6 à MARLY contre 1,4 à AMANCE). Elle peut être due au début d'apparition du pseudogley.

L'utilisation de la presse à membrane nous a également permis de tracer la courbe caractéristique de l'humidité du sol également appelée courbe pF/humidité ou courbe de rétention de l'humidité du sol : (figure 14 : a,b,c et d). Elle est faite pour chaque échantillon aux niveaux de prélèvement 10 - 20 cm, 30 - 40 cm, 50 - 60 cm, 70-80cm.

A un pF donné, quelqu'un qui aurait travaillé en sorption (humidification) sur le même échantillon, trouverait une teneur en eau plus faible.

Sur le tracé, les "courbes de passage" (entre nos deux courbes) indiqueraient la différence de teneur en eau. Nous en concluons que notre sol argilo-limoneux présente un comportement différent selon qu'il se dessèche ou qu'il se réhumecte (phénomène d'hystérésis).

En d'autres termes, pour un même taux d'humidité, l'eau est moins disponible lorsque le sol est en voie de dessiccation que lorsqu'il s'humidifie.

Les quatre courbes des parcelles sont pratiquement identiques pour chaque niveau de prélèvement choisi. La courbe pF/humidité de chaque parcelle peut exprimer, pour l'ensemble de notre zone expérimentale, les relations entre les diverses caractéristiques physiques et biologiques du sol. Une telle courbe prend toute son importance en physique du sol parce qu'elle exprime l'influence de la structure, de la porosité, de la distribution des pores et de l'adsorption sur l'état de l'eau du sol ; "Etat et variations qui déterminent la direction et influencent le régime du mouvement de l'humidité du sol et du prélèvement en eau par les plantes" (HILLEL, 1974).

### c. Résultats obtenus avec la sonde à neutrons et calcul de l'ETR

#### **c.1. généralités**

L'évapotranspiration réelle est égale à

$$ETR = E + T + I_n \quad (16)$$

E = évaporation

T = transpiration

I<sub>n</sub> = interception

L'évaporation représente le phénomène de vaporisation de l'eau libre ou de celle contenue dans les substances inertes (sol, bois mort...). Elle peut représenter jusqu'à 50% du stock du sol (SCHOELLER, 1962).

La transpiration représente le rejet de vapeur d'eau par les plantes. Sur une consommation de 100 unités d'eau, 99% sont destinées à la transpiration, 0,85% à l'hydratation des tissus vivants et 0,15% à la métabolisation.

Ces deux processus [l'un physique (évaporation), l'autre physiologique (transpiration)] peuvent être confondus puisqu'ils représentent des pertes au niveau du bilan. C'est ainsi que l'ETR désigne l'eau évaporée par un couvert végétal

soumis aux conditions et aux aléas climatiques et édaphiques : c'est la perte réelle du peuplement.

THORNTHWAITE a proposé le terme d'évapotranspiration potentielle (E.T.P.) pour exprimer les pertes d'eau en conditions idéales. C'est une limite supérieure des quantités d'eau qui peuvent être évaporées. Il en donne une définition biologique : "c'est la quantité d'eau transformable en vapeur par évaporation du sol et transpiration d'une végétation couvrant bien le sol, abondamment alimentée en eau et en phase de croissance active:

PENMAN reprenait la même notion mais sous un aspect physique : c'est, dit-il "la quantité maximum d'énergie transformée en chaleur latente, de vaporisation de l'eau par une surface homogène". La formule de PENMAN [la plus utilisée et la plus rationnelle (LEMEE, 1978)] est donnée par :

$$E.T.P. = \frac{A R_n / L + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (17)$$

$\gamma$  = constante psychrométrique (0,485 mmHg, °C)

$L$  = chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $\approx 59$  calories/cm<sup>2</sup> pour 1mm d'eau équivalente)

$\Delta = \frac{\delta e}{\delta T}$  = pente de la courbe de pression de vapeur à la température de l'air en admettant que cette dernière est approximativement la même que celle de la surface évaporante.

$E_a = f(u) (e_s - e_a)$  : équation empirique de DALTON

$f(u)$  = une fonction de la vitesse moyenne du vent

$e_s$  = pression saturante de vapeur d'eau à la surface évaporante

$e_a$  = pression à une hauteur donnée au-dessus de cette surface.

Pourquoi utiliser l'ETP alors qu'on peut avoir l'ETR ? L'ETP représente la demande climatique. C'est l'exigence du climat qui impose à la plante un appel d'eau que cette dernière est plus ou moins à même de satisfaire selon ses possibilités d'approvisionnement.

C'est donc un maximum qui dépend uniquement d'éléments climatiques (vent, température, rayonnement net...) tandis que l'E.T.R. peut avoir d'autres facteurs limitants (eau, morphologie du végétal...). Des auteurs ont donc essayé de relier les deux termes.

Des recherches qui ont été faites établissent des relations entre la consommation d'eau et le rendement (BOUCHET *et al*, 1964). Ces travaux montrent que le rendement optimal est obtenu lorsque les besoins en eau définis par l'ETP sont satisfaits. Le rendement diminue lorsque ETR est inférieure à ETP. Des résultats obtenus sur *Abies grandis* montrent que ETR/ETP varie de 0,99 à 1,28 (AUSSENAC, 1972). Il explique ce dépassement de l'unité par le fait que ETP est toujours établie par rapport à une végétation herbacée tandis que l'énergie advective présente en forêt accentue l'ETR.

### c.2. mesures effectuées

Dans notre étude, il a été possible de calculer l'ETR en l'absence de nappe c'est-à-dire en période où le sol est en dessous de la capacité au champ.

La capacité au champ correspond à l'humidité maximale retenue dans un sol lorsqu'il n'y a plus d'écoulement par gravité. En supposant les écoulements et les remontées capillaires négligeables, l'équation du bilan hydrique se résume à

$$(18) \text{ ETR} = P_1 - \Delta S \quad (\Delta S \text{ positif quand l'humidité du sol augmente})$$

(AUSSENAC, GRANIER, 1979)

Dans cette formule l'eau biologiquement fixée est considérée comme négligeable (SCHNOCK, 1972).

Dans chaque peuplement, nous avons installé un tube de sonde en duralumin (diamètres extérieur et intérieur 45 et 41 mm). Afin d'éviter tout écoulement préférentiel d'eau, nous avons creusé les trous avec une tarière de même diamètre que les tubes.

Nous avons essayé, autant que possible, d'installer les tubes au centre d'un carré formé par quatre arbres situés en plein milieu du peuplement. Il fallait aussi éviter de

TABLEAU N° 5 - VALEURS DU STOCK D'EAU (S) ET DE SA VARIATION (AS) SUR

UN METRE DE PROFONDEUR POUR DES MESURES EFFECTUEES DU

24.11.1981 au 20.7.1982

Dates des mesures	F. d = 730 arbres/ha		P.II d = 1620 arbres/ha		P.III d = 530 arbres/ha		P.IV d = 530 arbres/ha	
	S (mm)	AS (mm)	S (mm)	ΔS (mm)	S (mm)	P s (mm)	S (mm)	ΔS (mm)
24.11.81	390,86		375,84		405,77		342,14	
		+ 9,96		+ 9,53		+ 9,74		+ 19,13
3.12.81	400,82		385,37		415,51		361,27	
		+ 8,63		+ 16,57		+ 12,56		+ 22,94
10.12.81	409,45		401,94		428,07		384,21	
		- 10,99		- 19,41		- 10,97		- 18,63
21.01.82	398,46		382,53		417,10		365,58	
		+ 6,16		+ 11,25		+ 9,18		+ 9,16
18.02.82	404,62		393,78		426,28		374,74	
		- 8,46		- 5,10		- 10,14		- 6,70
23.02.82	396,16		388,68		416,14		368,04	
		+ 9,89		+ 4,66		+ 5,82		+ 0,32
12.03.82	406,05		393,34		421,96		368,36	
		+ 0,46		- 0,67		+ 0,16		+ 2,40
19.03.82	406,51		392,67		422,12		370,76	
		- 1,10		- 1,32		- 2,29		+ 0,88
24.03.82	405,41		391,35		419,83		371,64	
		+ 7,75		+ 5,44		+ 6,58		+ 5,61
31.03.82	413,16		396,79		426,41		377,25	
		- 23,75		- 14,02		- 13,52		- 15,53
7.04.82	389,41		382,77		412,89		361,72	
		+ 2,47		+ 6,05		- 6,64		- 6,80
14.04.82	391,88		376,72		406,25		354,92	
		- 9,76		- 10,13		- 8,20		- 9,01
20.04.82	382,12		366,59		398,05		345,91	
		+ 5,62		- 5,20		- 6,00		+ 1,88
28.04.82	376,50		361,39		392,05		344,03	
		- 13,59		+ 7,41		- 13,34		+ 8,53
19.05.82	362,91		353,98		378,71		335,50	
		- 5,50		+ 7,74		- 5,93		+ 16,56
28.05.82	357,41		346,24		372,78		318,94	
		+ 5,98		+ 1,64		+ 2,49		+ 0,25
3.06.82	363,39		344,60		375,27		318,69	
		- 16,25		+ 3,23		- 9,17		+ 1,83
8.06.82	347,14		341,37		366,10		316,86	
		+ 6,06		+ 2,38		+ 12,21		+ 9,88
17.06.82	353,20		338,99		378,31		306,98	
		- 9,02		+ 6,10		- 4,52		+ 5,20
30.06.82	344,18		345,09		373,79		301,78	
		+ 9,58		+ 2,65		- 5,68		+ 7,14
7.07.82	354,04		342,44		368,11		308,92	
		- 6,39		+ 4,55		+ 0,21		+ 3,16
16.07.82	347,65		337,83		368,32		305,76	
		- 13,42		- 16,26		- 19,13		+ 8,72
20.07.82	334,23		321,63		349,19		297,04	

les placer dans un endroit qui collecterait les eaux de ruissellement ou celles provenant de l'égouttement des branches et des feuilles.

C'est ce qui explique la position un peu décalée des tubes 82 et 83 (figures 2, 3).

Compte tenu de l'hétérogénéité intra-parcellaire, il aurait fallu installer 20 ou 30 tubes dans chaque peuplement mais nous n'aurions certainement pas eu le temps matériel de faire toutes ces mesures.

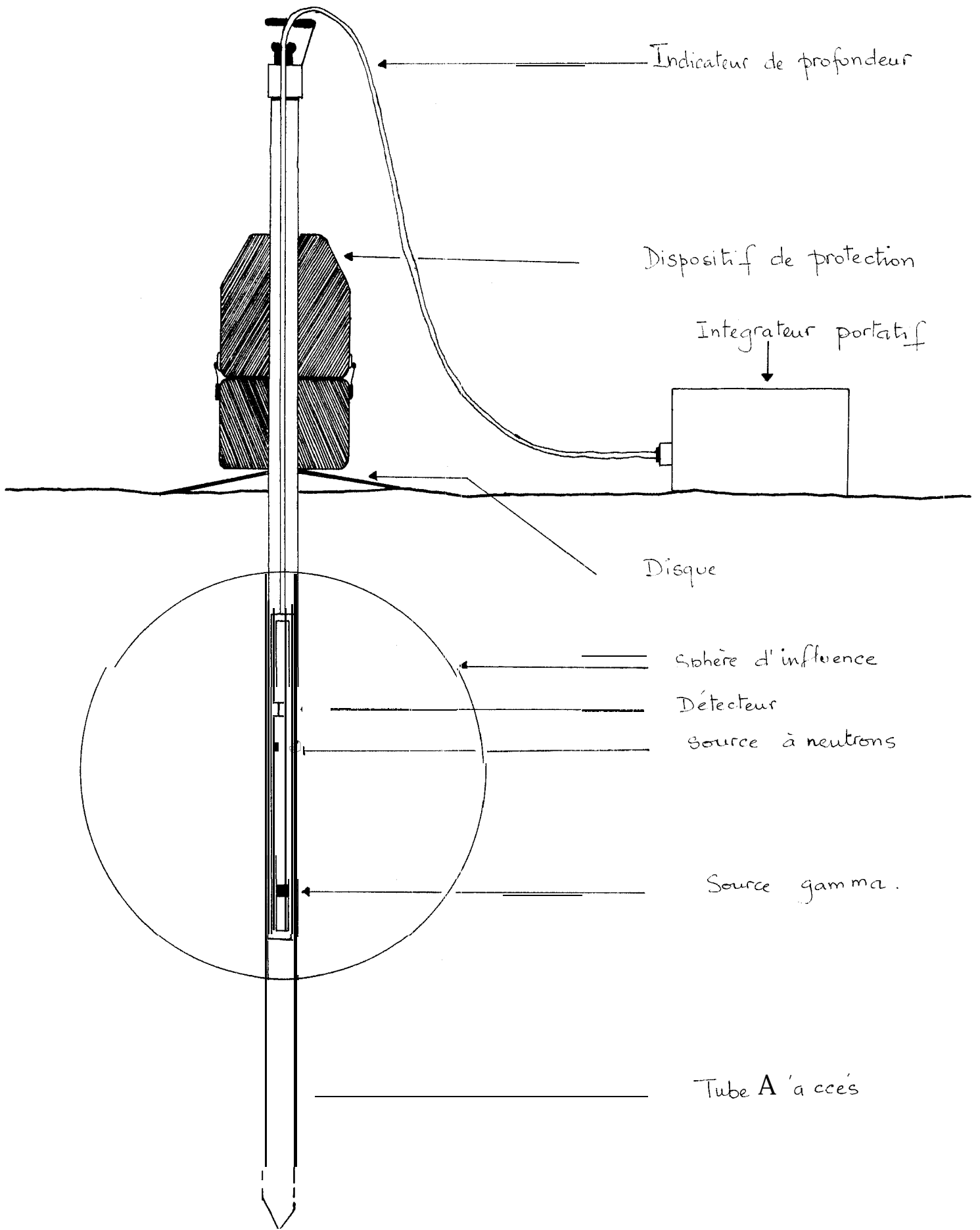
Nous avons suivi le mouvement d'eau, palier par palier (tous les 10 cm), avec la sonde à neutrons et nous avons fait des prélèvements (méthode gravimétrique) tous les 30cm pour voir l'homogénéité hydrique aux niveaux 30, 60 et 90 cm (paragraphe suivant).

Une mesure était faite chaque semaine ; la sonde était très sollicitée et a même été immobilisée pendant trois semaines pour panne de photomultiplicateur. Du 24.11.1981 au 20.7.1982 nous avons fait 23 mesures (tableau 5). Nos tubes étaient soigneusement bouchés afin d'éviter toute entrée d'eau. Le principe de la sonde est basé sur la propriété qu'à l'hydrogène de thermaliser (ralentir au niveau thermique) (DAUDET, 1970) facilement les neutrons rapides. La source de neutrons rapides (Americium - Béryllium), associée à un détecteur de neutrons thermiques, est descendue à l'aide d'un câble à la profondeur choisie, dans le tube d'accès installé dans le sol. Nous noterons que la sonde ayant une zone d'influence sphérique, lorsque la mesure se fera à 1 mètre de profondeur, la teneur en eau indiquée correspondra en fait à 1,05 mètre.

Après un temps de comptage déterminé à l'avance (30 ou 60 secondes), le nombre de neutrons lents détectés est converti en pulsions électriques qui sont approximativement proportionnelles à l'humidité volumique . Nous avons une sonde N.E.A. (Nordisk Elektrisk Apparatfabrik. DANEMARK) (schéma 5).

L'étalonnage de la sonde a consisté à faire des prélèvements de sol tous les 10cm jusqu'à 1 mètre puis tous les 20cm jusqu'à 1,60 m le cas échéant. Des mesures d'humidité

Schema n° 5    Sonde gamma neutronique (N.E.A)



pondérale ont été faites pour servir de référence aux trois mesures de densité et d'humidité faites à chaque palier au moment de la pose des tubes et ceci en considérant les valeurs d'humidité calculées à partir des données de la sonde (programme USETA du CTGREF - ANTONY - NORMAND, 1973).

### c.3. résultats obtenus

En l'absence de nappe perchée et avec l'équation (18), puisque la pluie incidente ( $P_i$ ) est la même au niveau des quatre parcelles, faire la comparaison des ETR revient tout simplement à comparer les variations de stock d'eau ( $\Delta S$ ).

En trois mois (du 20.4.1982 au 20.7.1982), les différentes ETR montrent que de la P.III ( $d = 530$  arbres/ha) à la P. II ( $d = 1620$  arbres/ha) en passant par la P. I ( $d = 730$  arbres/ha), la variation est inférieure à 4mm d'eau (tableau 6).

A l'échelle d'un hectare, cette différence paraît très faible compte tenu du nombre d'arbres qu'il y a entre ces deux parcelles ( $1620 - 530 = 1.090$ ).

La P. IV avec une densité de 1760 arbres (la plus forte), évapotranspire un peu plus que les autres parcelles.

Nous notons une variation de 14mm entre la parcelle la moins dense (530 arbres/ha) et celle qui a la plus forte densité (1760 arbres/ha).

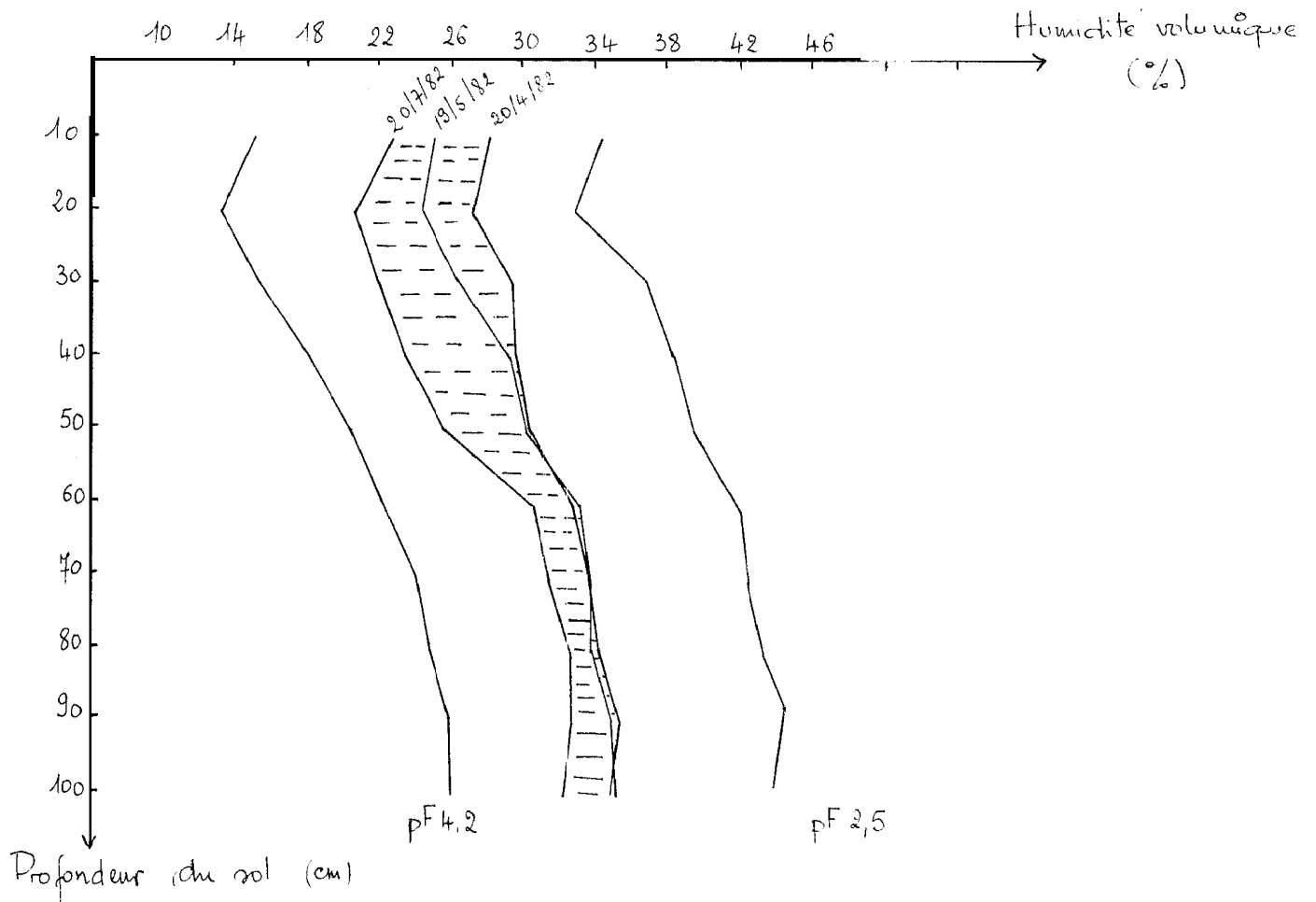
14 mm pour un rapport entre les deux parcelles d'environ 3,5 nous semble, dans nos conditions d'étude, une surconsommation assez peu importante : ils correspondent à une augmentation de 4,848 ; chiffre trois fois moins élevé que les 16,7% de différence entre deux parcelles de Douglas : l'une témoin, l'autre éclaircie de moitié (1 rang sur 2) (AUSSENAC et al, 1982).

La deuxième remarque que nous faisons est que pendant cette période il n'est tombé que 225,9 mm ; valeur inférieure aux différentes ETR ; ce qui veut dire que la pluie qui tombe sur le peuplement ( $P_i$ ) ne compense pas les pertes d'eau vers l'atmosphère : on a donc un déficit au niveau du bilan. Pendant ces trois mois, nous avons suivi l'état de dessèchement progressif de la parcelle IV (figure 15).



Figure n° 15 Dessèchement progressif du sol de la parcelle IV (I = 1760 arbres/ha)

période du 20/4/82 au 20/7/82



≡ perte en eau

Nous avons retenu trois dates :

- Le 20.4.1982 qui représente la première mesure d'humidité après la disparition de la nappe.
- Le 20.7.1982 où nous avons obtenu le stock le plus faible (297,04 mm) depuis le début de nos mesures.
- Entre ces deux dates nous avons choisi celle du 19.5.1982 qui représente un profil intermédiaire.

Sur le graphique, du 20.4.1982 au 19.5.1982 nous observons une perte d'eau jusqu'à 40 cm ; la consommation devient relativement plus faible jusqu'à 50 cm, profondeur à partir de laquelle on n'observe pratiquement plus de fluctuation d'humidité. L'exploitation des racines semble être freinée à ce niveau.

Par contre, entre le 19.5.1982 et le 20.7.1982 nous remarquons qu'en deçà de 50 cm de profondeur, la perte en eau continue ; dans notre sol qui est compact et où le pseudogley provoque la présence d'une nappe perchée pendant 4 mois et demi, ce départ n'est certainement pas dû à l'activité racinaire.

Avec les seules mesures de teneur en eau du sol, il nous est impossible de déterminer les flux dans cette zone non explorée par les racines. En effet, cette réduction du stock d'eau à partir de la cote 55 cm environ, peut résulter soit d'une évaporation vers la zone de surface, soit d'un drainage dans la zone inférieure ou alors de l'action combinée des deux phénomènes.

La connaissance du gradient de potentiel est donc indispensable pour déterminer le sens de l'écoulement et pour cela il faudrait faire des mesures simultanées de tensiométrie et de teneur en eau.

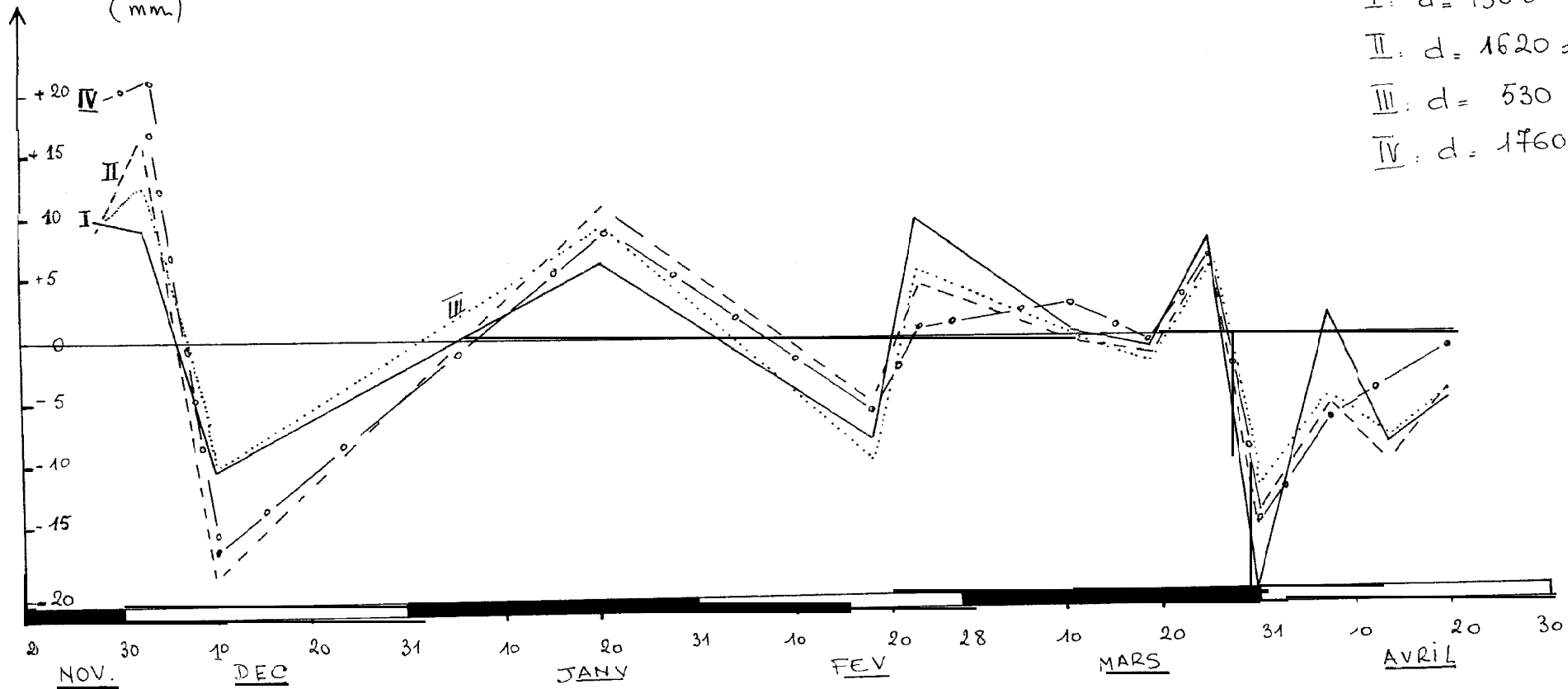
Nous constatons aussi qu'il existe encore une quantité de la R.U dans le sol ; le profil le plus sec que nous ayons obtenu n'atteint pas le seuil critique de pF 4,2.

A cette date, il restait sur 1 mètre de profondeur 90 mm d'eau disponible. Teneur en eau du sol le 20.7.1982 (= 297,04 mm) - teneur en eau au pF 4,2 (= 207,04 mm).

Nous avons également étudié comment variait la réserve du sol pendant la présence de la nappe perchée (figure 16).

Figure N° 16 Variations d'humidité dans les 4 peuplements pendant la période de présence de la nappe perchée

Variation de la réserve du sol (ΔS)  
(mm)



L'humidité dans nos quatre parcelles fluctue toujours dans le même sens. Le graphique montre aussi toute l'importance du drainage pendant cette période. Il est difficile de se prononcer sur l'effet de la densité.

Nous pouvons cependant remarquer que la densité et le stock d'eau varient en sens inverse (figure 9).

L'autre remarque importante que nous pouvons faire sur ce graphique est de constater la corrélation très étroite qu'il y a entre le toit de la nappe, la pluie incidente et le stock d'eau dans le sol.

A partir de mi-avril, (disparition de la nappe, début de la saison de végétation), le stock diminue malgré d'assez importantes pluies : l'ETP est élevé et la transpiration forte.

Nous avons par ailleurs calculé les ETP pour les quatre parcelles et à chaque intervalle de mesure de sonde en utilisant la formule de BROCHET - GERBIER (1975)

$$ETP = mRg + nEp \quad (19)$$

Rg = rayonnement global (calories/cm<sup>2</sup>/jour)

Ep = évaporation mesurée en mm, sous abri à l'évaporomètre de PICHE

m et n = facteurs de correction.

Il s'agit bien entendu de l'ETP gazon.

Faisant la synthèse des résultats obtenus quant à l'effet de l'interception sur l'ETP forêt, et la part de l'interception ( $I_n$ ) et de la perte par interception ( $P_{in}$ ) dans l'ETR, AUSSENAC (1981) propose d'exprimer l'Evapotranspiration potentielle nette de la façon suivante :

$$ETP \text{ forêt} = \alpha ETP \text{ gazon} + \beta I_n \quad (20)$$

$\beta I_n$  = perte par interception ( $P_{in}$ )

$\alpha$  et  $\beta$  doivent être définis pour chaque type de peuplement.

Il semble qu'ils soient voisins de 0,8 pour les résineux en climats tempérés.

Compte tenu des valeurs d'ETP totales obtenues pendant ces trois mois (environ 320mm par parcelle), nous espérons aboutir à des ETR correspondantes plus élevées (tableau 6).

TABLEAU N°6 - RESULTATS DE L'E.T.R., DE L'E.T.P. ET DE  $\epsilon$  POUR DES PERIODES SANS NAPPE PERCHEE

(du 20.4.1982 au 20.7.1982)

Périodes de mesures	Pi (mm)	P.I d = 730 arbres/ha			P.II d = 1620 arbres/ha			P.III d = 530 arbres/ha			P.IV d = 1760 arbres/ha		
		E.T.R. (mm)	E.T.P. (mm)	$\epsilon$	E.T.R. (mm)	E.T.P. (mm)	$\epsilon$	E.T.R. (mm)	E.T.P. (mm)	$\epsilon$	E.T.R. (mm)	E.T.P. (mm)	$\epsilon$
0.4.82 au 28.4.82	2,9	8,52	18,36	0,46	8,10	18,26	0,44	8,90	18,55	0,48	4,78	18,59	0,26
8.4.82 au 19.5.82	24,25	37,84	60,34	0,63	31,66	59,53	0,53	37,59	59,53	0,63	32,78	59,29	0,55
9.5.82 au 26.5.82	8,0	13,50	22,24	0,61	15,74	21,00	0,75	13,93	21,63	0,64	24,56	21,54	1,14
6.5.82 au 3.6.82	22,0	16,02	28,19	0,57	23,64	26,77	0,88	19,51	27,20	0,72	22,25	27,02	0,82
3.6.82 au 8.6.82	7,0	23,25	23,81	0,98	10,23	23,52	0,43	16,17	23,79	0,68	8,83	23,30	0,38
8.6.82 au 17.6.82	35,0	28,94	33,13	0,87	37,38	33,61	1,11	22,79	33,15	0,69	44,88	33,03	1,36
17.6.82 au 30.6.82	45,75	54,77	54,29	1,01	39,64	52,73	0,75	50,27	63,44	0,79	50,95	53,54	0,95
0.6.82 au 7.7.82	28,0	18,42	26,01	0,71	30,65	26,33	1,16	33,68	25,61	1,32	35,14	29,03	1,21
7.7.82 au 16.7.82	53,0	59,39	42,11	1,41	57,55	42,16	1,37	52,79	40,33	1,31	56,16	43,17	1,30
16.7.82 au 20.7.82	0,0	13,42	15,29	0,88	16,26	15,29	1,06	19,13	15,29	1,25	8,72	15,29	0,57
TOTAL	225,9	274,07	323,77		270,81	319,26		274,76	328,52		289,05	323,80	

L'ETR de la P. IV (289,05 mm pour 323,80 mm d'ETP) paraît être une valeur satisfaisante. En effet, nos tubes de sonde étant tous installés entre quatre arbres, plus la densité est forte, plus le tube est proche de l'arbre et mieux il reflète l'état hydrique du peuplement.

Il est peut-être un peu difficile de l'imaginer dans nos conditions d'expérience (700 mm en 180 jours à Nancy. Il pleut un jour sur deux), mais il est sûr qu'en période de sécheresse prononcée, plus le tube est loin de l'arbre, plus il évalue par excès le stock d'eau d'où une sous-estimation de l'ETR.

Un autre argument qui va dans le même sens est de constater que sur notre profil hydrique de la figure 15, le point zéro (point à partir duquel l'humidité reste constante dans le temps) n'apparaît pas ; il y a donc une perte d'eau dont nous n'avons pas tenu compte dans l'évaluation de l'ETR. Nous avons calculé l'indice d'évapotranspiration  $\mathcal{E} = \frac{ETR}{ETP}$  (21) (tableau 6). Il est nettement inférieur à 1 en période peu pluvieuse surtout en début de végétation ; il est parfois supérieur à 1 (pluies de 28 et 53mm dont nous avons déjà parlé). Plus cet indice est proche de 1, plus l'ETR se rapproche de l'ETP : la demande climatique peut alors être satisfaite ; le peuplement fonctionne à ETP forêt ; ce qui veut dire que l'eau existe en quantité suffisante pour alimenter l'évapotranspiration jusqu'à sa valeur potentielle.

#### **d. Résultats par la méthode gravimétrique**

La sonde à neutrons nous donnait des teneurs en eau que par palier de 10 cm (sur 1 mètre de profondeur). Nous avons voulu savoir s'il y avait une homogénéité des teneurs en eau à l'échelle de la parcelle entre 0 et 30 cm ; 30 et 60cm ; 60 et 90 cm. Le seul moyen dont nous disposions était la méthode gravimétrique qui nous permettait de faire plusieurs prélèvements à différents endroits de la parcelle. Nous avons donc prélevé des échantillons de sol à ces trois niveaux, dans chaque parcelle, le 18.5.1982 et le 25.5.1982. (8 profils par parcelle à chaque date).

TABLEAU N°7 - RESULTATS DES PRELEVEMENTS PONDERAUX EFFECTUES LE 18.5.82  
ET LE 25.5.82

		18.5.1982			25.5.1982		
	Niveau (cm)	Moyenne %	E.T. %	C.V. %	Moyenne %	E.T. %	C.V. %
P.I	0 - 30	21,66	1,46	6,74	22,44	2,15	9,58
	30 - 60	25,82	1,49	5,77	24,61	2,25	9,14
	60 - 90	29,29	1,24	4,23	28,38	2,19	7,72
	0 - 90	76,77			75,43		
P.II	0 - 30	25,75	1,59	6,42	21,52	1,60	7,43
	30 - 60	24,40	0,60	2,46	21,20	0,48	2,26
	60 - 90	27,15	1,10	4,05	24,60	0,02	0,08
	0 - 90	76,30			67,32		
P.III	0 - 30	23,00	0,26	1,13	19,53	1,83	9,37
	30 - 60	23,18	0,26	1,12	20,75	1,03	4,96
	60 - 90	31,24	0,99	3,16	28,96	2,12	7,34
	0 - 90	77,42			69,24		
P.IV	0 - 30	23,11	0,02	0,09	20,51	1,23	6,00
	30 - 60	21,70	0,16	0,74	20,00	0,92	4,60
	60 - 90	23,05	0,02	0,09	21,71	1,63	7,51
	0 - 90	67,86			62,22		

E.T : Ecart-type

c.v : Coefficient de variation

P.I : d = 730 arbres/ha

P.II : d = 1620 arbres/ha

P.III: d = 5.30 arbres/ha

P.IV : d = 1760 arbres/ha

L'emplacement des profils était déterminé par tirage au sort.

Les échantillons étaient aussitôt ramenés au laboratoire pour être pesés et mis à l'étuve pendant 48 heures à 105°C. Des mesures d'humidité pondérale ont été faites afin de déterminer les teneurs en eau.

Avec les prélèvements du 18.5.1982, pour chaque parcelle et à chaque niveau, nous avons calculé la moyenne, l'écart type et le coefficient de variation.

Le même travail a été fait pour ceux du 25.5.1982 (tableau 7). Tous les coefficients de variation sont inférieurs à 10% ; cette valeur peut être considérée comme relativement faible dans nos conditions expérimentales.

Entre le 18.5.1982 et le 25.5.1982, les teneurs en eau entre 0 et 90 cm de profondeur des quatre parcelles ont baissé malgré une pluviométrie de 10,65 mm : l'évapotranspiration reste donc relativement élevée à cette période.

Cette perte d'eau varie d'une parcelle à l'autre et nous ne trouvons pas de corrélation entre ces départs au sein des trois niveaux d'une même placette.

Nous observons cependant, que la teneur en eau sur 90 cm de profondeur le 18.5.1982 est sensiblement la même pour trois parcelles : P. I: 76,77%, P. II: 76,30%, P. III : 77,42%. La plus dense (P. IV) a une humidité pondérale moindre (67,86%).

Nous aurions pu faire des comparaisons de moyennes pour évaluer la variabilité entre les trois niveaux d'une même parcelle mais ce n'était pas le but de l'étude.

Avec un nombre élevé de prélèvements à des dates différentes, il aurait été possible de suivre dans le temps l'évolution de la variabilité et de faire des profils hydriques en même temps.

Une étude relative à la comparaison d'un même niveau pour les quatre parcelles aurait certainement permis d'évaluer l'influence de la densité.

Par conséquent, nous constatons que si certaines conditions sont réunies, on peut arriver à étudier une composante intéressante du bilan hydrique. Mais comme beaucoup de



méthodes, celle-ci a ses limites :

De telles mesures ne peuvent être intéressantes que quand le sol a un certain déficit hydrique ; il faut donc pour cela avoir des périodes sèches assez longues.

Le choix du site de prélèvement détermine la teneur en eau de l'échantillon et le fait de creuser le profil dans la zone exploitée par les racines ou dans une zone nue peut engendrer une variation importante liée à l'apparition du pseudoqley qui n'est pas la même partout.

Afin d'avoir une bonne représentativité de l'échantillonnage, il faut faire beaucoup de profils tout en évitant le dessèchement des échantillons et en préservant la structure du sol.

Le plus grand inconvénient de cette méthode est qu'il est impossible de suivre l'évolution de l'homogénéité d'un même niveau dans le temps (avantage de la sonde).

Avec les densités moyennes, nous avons obtenu les humidités volumiques suivantes :

P. 1 d = 730 arbres/ha

<u>Niveau</u>	<u>Densité moyenne</u>	<u>H.V. (18. 5. 1982)</u>	<u>H.V. (25. 5. 1982)</u>
0 - 30	1,272	27,55	28,54
30 - 60	1,447	37,36	35,61
60 - 90	1,493	43,73	42,37

P. II d = 1620 arbres/ha

0 - 30	1,204	29,80	25,91
30 - 60	1,458	35,58	30,91
60 - 90	1,455	39,50	35,79

P. III d = 530 arbres/ha

0 - 30	1,288	29,62	25,15
30 - 60	1,449	33,59	30,07
60 - 90	1,443	45,07	41,79

P. IV d = 1760 arbres/ha

<u>Niveau</u>	<u>Densité moyenne</u> (g/cm <sup>3</sup> )	<u>H.V. (18.5.1982)</u>	<u>H.V. (25.5.1982)</u>
0 - 30	1,324	30,60	27,16
30 - 60	1,470	31,90	29,40
60 - 90	1,500	34,58	32,57

H.V. = humidité volumique exprimée en %

Les prélèvements n'ont pas pu être poursuivis faute de sécheresse. Ces résultats pourraient être mieux exploités si les prélèvements avaient eu lieu aux abords des tubes de sonde et que des mesures neutroniques aient été faites le même jour.

Cela prouve que cette méthode gravimétrique est une méthode de référence. Elle doit non seulement être poursuivie dans le temps mais a besoin d'être couplée à d'autres méthodes.

Une mesure de sonde à neutrons faite moins de 24 heures après le prélèvement pondéral du 18.5.1982 (tableau 5), nous donne les résultats comparatifs suivants :

	<u>Niveau</u>	<u>Lame d'eau</u> (mm)	<u>Total sur 90 cm</u> (méthode gravimé- trique)	<u>Stock d'eau sur</u> <u>1,05 m</u> (sonde à neutrons)
P. I	0- 30	82,65		
	30 - 60	112,08	325,92 mm	362,91 mm
	60 - 90	131,19		
P. II	0- 30	89,40		
	30 - 60	106,74	314,64 mm	353,98 mm
	60 - 90	118,50		
P. III	0- 30	88,66		
	30 - 60	100,77	324,86 mm	378,71 mm
	60 - 90	135,23		
P. IV	0- 30	91,80		
	30 - 60	95,70	291,24 mm	335,50 mm
	60 - 90	103,74		

Les parcelles 1, II, III et IV présentent une réserve d'une quarantaine (40) de mm d'eau entre 90 et 105cm de profon-

deur ; valeur qui nous paraît très correcte comparée à celles fournies par les "listings".

Mieux, nous constatons une diminution de la teneur en eau en fonction de l'importance de l'écartement. Ce résultat, déjà observé avec la sonde, est confirmé par la méthode gravimétrique.

#### IV. CONCLUSION GENERALE

---

Nous nous étions fixés comme objectif l'étude comparée du bilan hydrique de quatre peuplements de Sapin de Vancouver de densités différentes. Au terme de ce travail, il nous paraît nécessaire de tirer certaines conclusions. Nous avons essayé d'étudier les différents facteurs de l'équation du bilan hydrique ( $ETR = P_i - D - F - R \pm \mathbf{As}$ ).

Nous avons constaté que la pluie qui arrive au sol ( $P_s$ ) est sensiblement la même au niveau des quatre parcelles (67% de  $P_i$  dans la P. III de densité 530 arbres/ha contre 64% de la pluie incidente dans la P.IV de densité 1760 arbres/ha).

L'écoulement le long des troncs avec une valeur d'environ 1%  $P_i$  n'entre pratiquement pas en compte dans le bilan pluvial. Nous savions que ce terme ( $P_t$ ) était relativement faible pour les résineux : le Sapin de Vancouver le confirme.

L'interception ( $I$ ) qui varie très peu autour de 35% de  $P_i$  dans nos quatre parcelles est très importante compte tenu des pertes d'eau qu'elle engendre.

En période de nappe perchée, nous avons tenté, sans succès, d'évaluer les drainages vertical et latéral ( $D$  et  $F$ ) en fonction du niveau supérieur de cette dernière.

Nos mesures de sonde à neutrons n'ont pas toujours fluctué dans le même sens. Cependant, on notait à chaque mesure un stock dégressif au fur et à mesure que la densité diminuait.

Le bilan global, ou plutôt la résultante de tous ces facteurs nous donne des consommations d'eau assez voisines pour les quatre peuplements en cette période de déficit hydrique ( $ETR > P_i$ ).

Il nous faut avouer qu'en débutant les expériences, nous étions convaincus d'aboutir à des différences au niveau de chaque terme du bilan compte tenu des densités en place et des opérations sylvicoles intervenues au printemps 1980.

La réalité des chiffres est autre : le couvert s'est pratiquement refermé deux ans seulement après l'éclaircie. Dans nos conditions expérimentales, avec cette fermeture du couvert, un peuplement de 530 arbres/ha consomme presque la même quantité d'eau qu'un autre de 1760 arbres/ha.

Dans la conclusion de son étude sur la croissance et la production d'*Abies grandis* (ANNEXE VIII), et en comparaison au Douglas, OSWALD (1980) note des diminutions de volume avec la densité plus rapides chez le Sapin de Vancouver. Il pense que ces pertes de production au niveau des grands écartements ne pourront pas être réduites durant une révolution de 60 ans (pertes de 2% pour un écartement de 2,5 m x 2,5 m et de 9% pour 3 m x 3 m). Aussi propose-t-il une densité de plantation plus élevée chez *Abies grandis* (de l'ordre de 1500 à 1800 plants à l'hectare) : les conclusions sylvicoles et bioclimatologiques se rejoignent.

Dans le carré latin d'*Abies grandis*, un inventaire comparatif va bientôt être fait et d'après les discussions que nous avons eues avec OSWALD, nous pensons que la perte de production sera très faible.

A notre avis, un intérêt de notre étude aura été d'avoir des données chiffrées sur cette espèce qui a été relativement peu étudiée.

Nous pensons également qu'il est très intéressant, chiffres à l'appui, de dire que les jeunes Sapins de Vancouver de 25 ans réagissent vigoureusement à la réduction du matériel végétal et que dans un climat humide comme celui de la Lorraine une éclaircie de 30% n'entraîne pratiquement ni de chute de production, ni de variation de consommation d'eau.

En rapport avec les travaux d'AUSSENAC *et al* (1982) nous pouvons tirer la conclusion que pour de jeunes peuplements de Douglas et de Sapin de Vancouver, une éclaircie de moitié (50%) n'influence que très légèrement leur ~~croissance~~ et leur ~~production~~ <sup>production</sup> bilan hydrique.

Alors que se pose le problème de l'enrésinement à outrance, l'efficience transpiratoire

$$\left( = \frac{\text{Production de bois (m}^3\text{)}}{\text{Eau évapotranspirée (m}^3\text{)}} \right)$$

devient un facteur très important.

AUSSENAC (1975) a mis en évidence en forêt d'Amance, que pour une même quantité d'eau consommée, le Sapin de Vancouver et l'Epicéa produisent quatre fois plus de bois que les feuillus.

Au moment où le problème de la gestion des ressources renouvelables est d'actualité, nous ne saurions trop insister sur le facteur hydrique lors du choix des essences de reboisement et de l'écartement. Ainsi les espèces à bonne efficience transpiratoire doivent être conseillées dans des zones à faible déficit hydrique. Dans les régions enregistrant des déficits en eau chroniques, la production d'eau doit être la priorité des priorités et c'est à ce moment qu'il conviendra de trouver un compromis entre, assurer une bonne couverture végétale pour réduire l'évaporation en augmentant la densité de plantation, et diminuer la transpiration et la perte par interception en intervenant par des opérations sylvicoles.

En complément à cette étude du bilan hydrique, nous avons espéré (mais pas souhaité) profiter d'une éventuelle sécheresse pour observer la réaction de nos peuplements face à un stress hydrique prolongé en faisant des mesures de potentiel de sève avec la bombe à pression.

Nous comptons dans un avenir proche, réaliser ce travail dans une zone où les conditions seront "idéales".

## BIBLIOGRAPHIE

---

- AUSSENAC (G.), 1968 - Interception des précipitations par le couvert forestier. Ann. Sci. Forest. 25 (3), p. 135-156.
- AUSSENAC (G.), 1972. Etude de l'ETR de quatre peuplements forestiers dans l'Est de la France. Ann. Sci. Forest. 29 (3), 369-389.
- AUSSENAC (G.), 1975. Couverts forestiers et facteurs du climat : leurs interactions, conséquences écophysiologiques chez quelques résineux. Thèse, Université de Nancy, 234 p.
- AUSSENAC (G.), GRANIER (A.), 1979. Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (Fagus silvatica L. et Quercus sessiliflora Salisb.) de l'Est de la France. Ann. Sci. Forest. 36 (4), 265-280.
- AUSSENAC (G.), 1981. L'interception des précipitations par les peuplements forestiers. La Houille Blanche/n° 7/8.
- AUSSENAC (G.), GRANIER (A.) et NAUD (R.), 1982. Influence d'une éclaircie sur la croissance et le bilan hydrique d'un jeune peuplement de Douglas (Pseudotsuga menziesii (Mir.) France). Journal Canadien de la Recherche Forestière. Vol. 12, n° 2, 222-231.
- BELGRAND (M.), 1978. Etude pédologique de quelques stations de la forêt domaniale de MARLY LE ROI. D.A.A. en Pédologie et Aménagement des Sols. I.N.A. PARIS-GRIGNON.
- BONNEAU (M.), 1961. Evaluation au laboratoire de la capacité au champ en fonction de la texture. Bull. A.F.E.S. 8, 16-26. N° spécial.

- BOUCHET (R.J.), de PARCEVAUX (S.) et ARNOUX (J.), 1964. Amélioration du rendement des végétaux par abaissement de l'ETP. In L'eau et la production végétale, I.N.R.A. PARIS.
- BOULANGEAT (C.), 1978. Etude comparative de l'interception et de l'évapotranspiration d'un peuplement feuillu (Fagus sylvatica L.) et de quatre peuplements de Douglas (Pseudotsuga menziesii Mirb.) Mémoire E.N.I.T.E.F. (BARRES).
- BROCHET (P.) et GERBIER (N.), 1975. L'EVAPOTRANSPIRATION. Aspect agrométéorologique. Evaluation pratique de l'E.T.P. Monographie n° 65 de la Météo Nationale. PARIS.
- CACHAN (P.), 1981. Cours de climatologie. Eléments de météo, climatologie et bioclimatologie. E.N.S.A. - NANCY.
- DAUDET (F.A.), 1970. Méthodes et techniques d'étude de l'état de liaison et de la teneur en eau dans le sol et la plante. 325-338. In Techniques d'études des facteurs physiques de la biosphère. I.N.R.A.
- DELFS (J.), 1967. Interception and stemflow in stands of Norway spruce and Beech in West Germany. In International Symposium on Forest Hydrology, 179-185. Pergamon Press 1967. Sopper W.E. et Lull. H.W.
- DELVAUX (J.), 1969. Le choix objectif de l'essence de sylviculture. Comportement relatif d'Abies grandis LDL et de Pseudotsuga menziesii viridis Franco en Belgique. Bulletin Société Royale Forestière de Belgique, 76 (11) 445 - 459.
- DESJEUNES (J.M.), 1982. Précipitations supérieures à 30,0 mm en 24 heures depuis 1950. Poste climatologique d'Amance. Bioclimatologie - C.N.R.F., Champenoux-Seichamps.
- DUCHAUFOR (Ph.), 1960. Précis de Pédologie. Masson et Cie.



- DUTHIL (J.), 1970. Eléments d'Ecologie et d'Agronomie. J.B. Baillièrè et fils.
- ESCHNER (A.), 1967. Interception and soil moisture distribution, 191-200. In International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon Press, 1967. Sopper W.E. et Lull H.W.
- HALLAIRE (M.), 1968. Quelques problèmes posés par la réserve en eau du sol 283-293. In Mélanges offerts à Maurice PARDE. Editions OPHRYS.
- HELLER (R.), 1969. Biologie Végétale. Nutrition et Métabolisme. Masson et Cie.
- HILLEL (D.), 1974. L'eau et le sol : principes et processus physiques. Editions VANDER (Belgique).
- LACAZE (J.F.) et TOMASSONE (R.), 1967. Contribution à l'étude de la variabilité infraspécifique d'Abies grandis (Lindl). Caractéristiques juvéniles. Ann.Sci.Forest. 24 (4), 277-326.
- LEMEE (G.), 1978. Précis d'Ecologie végétale. Masson.
- LEONARD (R.E.), 1967. Mathematical theory of interception. In International Symposium on Forest Hydrology, 163 - 178. Pergamon Press. Sopper W.E. et Lull H.W.
- LEVY (G.), 1969. Premiers résultats d'étude comparée de la nappe temporaire des pseudogleys sous Résineux et sous Feuillus. Ann. Sci. Forest. 26 (1) 65 - 79.
- LEYTON (L.), REYNOLDS (E.R.C.), THOMSON (F.B.), 1967. Rainfall interception in forest and moorland. 163 - 178. In International Symposium on forest Hydrology. Pergamon Press.
- MERIAUX (S.), 1979. L'eau et le sol, 266 - 312. In Précis de Pédologie - 2 - constituants et propriétés du sol.

- MULLER (K.M.), 1935-1936. Abies grandis und ihre Klimarassen.  
Mitteilungen der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft  
54 - 124 (1935), 82-123 (1936).
- NORMAND (M.), 1974. Une méthode d'étalonnage d'un humidimètre à neutrons utilisant les mesures de densité du densimètre gamma associé. In "Isotope and Radiation Techniques in soil physics and Irrigation Studies 1973". AIEA-Vienne.
- OSWALD (H.), 1980. Une expérience d'espacement de plantation de Sapin de Vancouver (Abies grandis). Rev. For. Franç. XXXII - 1 - ; 60-78.
- OVINGTON (J.D.), 1954. A comparison of rainfall in different woodlands. Forestry. Vol. XXVII : n° 1.
- PARDE (J.) et PRAX (J.L.), 1964. Les résineux dans le Nord-Ouest de l'Hérault. Rev. For. Franç. 21 (4), 286 - 301.
- PARDE (J.), 1966. Essences de haute productivité. Rev. For. Franç. Novembre 1966.
- PARDE (J.), 1974. Ecologie Forestière - Microclimat en forêt 1-19. Gauthier-Villars, 1980.
- SCHNEIDER (J.P.), 1972. Pédologie et répartition de certaines plantes en forêt domaniale d'Amance. Mémoire D.E.A. C.N.R.F. - Champenoux.
- SCHNOCK (G.), 1971. Le bilan de l'eau dans l'écosystème forêt. Application à une chênaie mélangée de Haute-Belgique. UNESCO. Actes du colloque de Bruxelles. 1969. 41 - 46.
- SCHOELLER (H.), 1962. Les eaux souterraines. Masson et Cie.
- SOIL SURVEY, 1977. Water Retention, Porosity and Density of Field Soils. Technical monograph n° 9. HARPENDEN.

- A N N E : X E S -

- -

ANNEXE 1 - CALCUL DE L'ECOULEMENT DE LONG DES TRONCS (Pt)

$$\text{Pt (total)} = \frac{\text{Pt} \times \text{N}}{\text{n} (\text{Sp} - \text{G})} \quad \text{avec n} = 1 \text{ nous avons}$$

$$\frac{\text{N} \times \text{Pt Lue en (mm)} \times 40}{(\text{Sp} - \text{G}) \text{ en (cm}^2\text{)}} \times 10 = \quad \text{en (mm)}$$

Parcelle I : d = 730 arbres/ha

$$\text{Pt (total)} = \frac{\text{Pt} \times 73 \times 40 \times 10}{(1\,000 - 3,82) \cdot 10^4} = \underline{\underline{\text{Pt} \times 2,93 \cdot 10^{-3}}}$$

Parcelle II : d = 1620 arbres/ha

$$\text{Pt (total.)} = \frac{\text{Pt} \times 162 \times 40 \times 10}{(1\,000 - 3,525) \cdot 10^4} = \underline{\underline{\text{Pt} \times 6,5 \cdot 10^{-3}}}$$

Parcelle III : d = 530 arbres/ha

$$\text{Pt (total)} = \frac{\text{Pt} \times 53 \times 40 \times 10}{(1\,000 - 2,77) \cdot 10^4} = \underline{\underline{\text{Pt} \times 2,12 \cdot 10^{-3}}}$$

Parcelle IV : d = 1760 arbres/ha

$$\text{Pt (total)} = \frac{\text{Pt} \times 176 \times 40 \times 10}{(1\,000 - 5,093) \cdot 10^4} = \underline{\underline{\text{Pt} \times 7,07 \cdot 10^{-3}}}$$

ANNEXE II - RESULTATS DES HELEVES PLUVIOMETRIQUES

Date de Relevé	Pi (mm)	P.I d = 730 arbres/ha						P.II d = 1620 arbres				
		PS		Pt		In		PS		Ft		In
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm
24.4.82	3,00	1,20	40	0	0	1,80	60	1,45	48	0	0	1,55
30.4.82	2,10	0,40	20	0	0	1,70	80	0,44	21	0	0	1,66
3.5.82	0,80	0,04	5	0	0	0,76	95	0,09	11	0	0	0,71
5.5.82	13,30	9,93	75	0,06	0,20	3,30	24,80	9,05	68	0,09	0,70	4,16
10.5.82	2,40	0,60	26	0	0	1,80	74	0,56	23	0	0	1,84
19.5.82	2,65	1,37	52	0	0	1,28	48	1,20	45	0	0	1,45
25.5.82	8,00	4,00	51	0,01	0	3,99	49	3,29	41	0,01	0,20	4,70
3.6.82	22,00	20,00	91	0,45	2	1,55	7	18,58	84	0,68	3,50	2,74
7.6.82	7,00	3,85	55	0,01	0,10	3,14	44,90	3,83	55	0,01	0	3,16
14.6.82	23,00	13,40	58	0,01	0,30	9,59	41,70	13,43	58	0,02	0,50	9,55
17.6.82	12,00	10,00	84	0,10	0,60	1,85	15,40	10,00	84	0,10	0,90	1,90
21.6.82	4,75	1,45	31	0	0	3,30	69,00	1,49	31	0	0	3,26
23.6.82	13,50	9,02	67	0,01	0	4,47	33	11,90	88	0,05	0	1,55
28.6.82	13,50	4,07	30	0	0	9,43	0	3,65	27	0	0	9,85
29.6.82	14,00	10,90	78	0,04	0	3,06	22	8,78	63	0,13	1,00	5,09
5.7.82	28,00	25,75	92	0,23	1	2,02	7	22,65	81	0,41	1,00	4,94
15.7.82	53,00	50,05	94	1,33	3	1,62	3	46,5	88	2,65	5,00	3,85
23.7.82	11,00	8,68	79	0	0	2,32	21	8,05	73	0	0	2,95

Pi : pluie incidente

Pt : écoulement le long des troncs

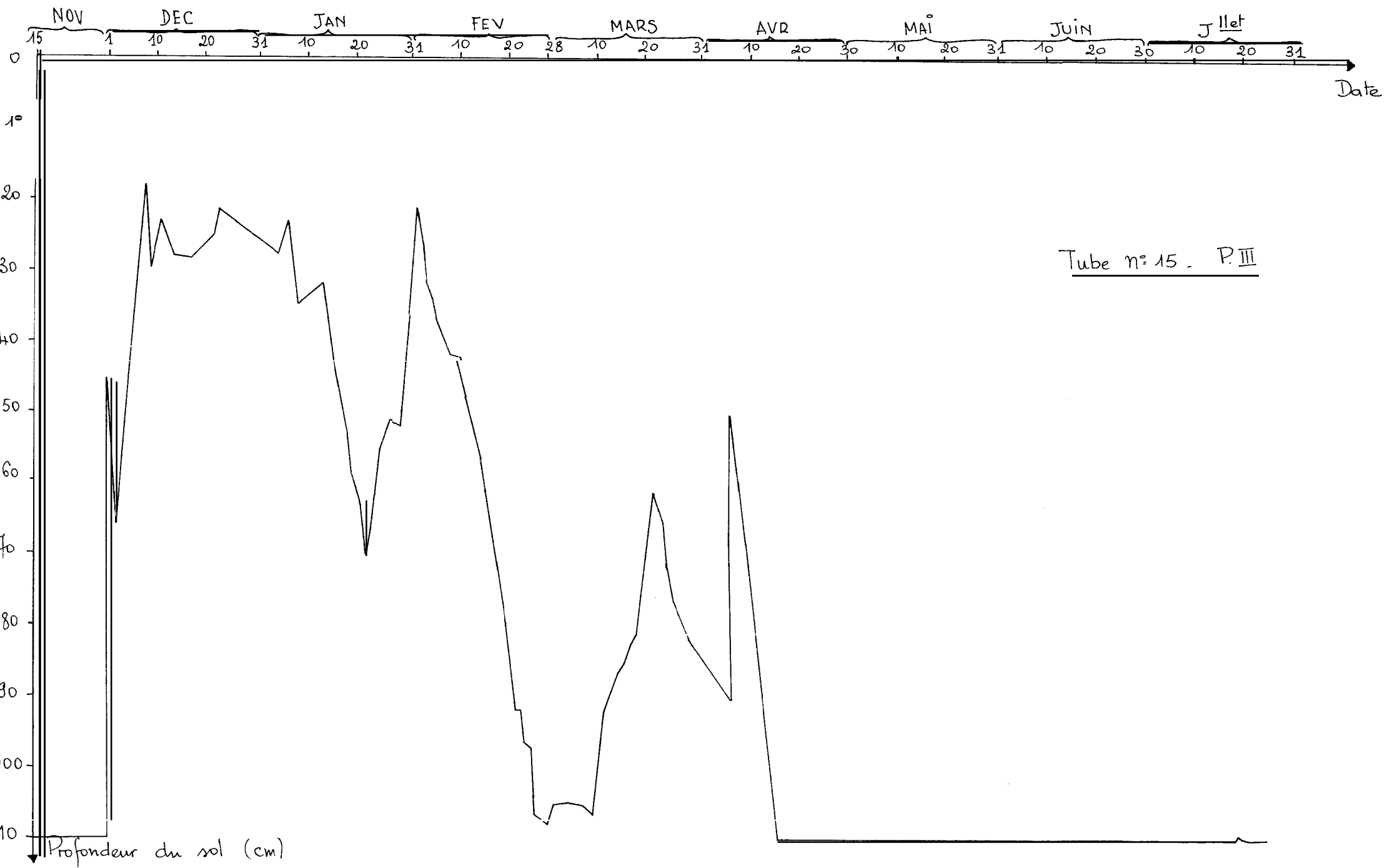
PS : pluie arrivant au sol

In : interception

/ha	P.III d = 530 arbres/ha						P.IV d = 1760 arbres/ha					
	PS		Pt		ln		PS		Pt		In	
	%	mm	%	mm	%	mm	mm	%	mm	%	mm	%
52	1,58	53	0	0	1,42	47	1,16	39	0	0	1,84	61
79	0,53	25	0	0	1,57	75	0,40	19	0	0	1,70	81
89	0,15	19	0	0	0,65	81	0,14	18	0	0	0,66	82
31,30	9,58	72	0,03	0,20	3,69	27,8	10,15	76	0,12	1	3,03	23
77	0,71	30	0	0	1,69	70	0,60	25	0	0	1,80	75
55	1,44	54	0	0	1,21	46	1,34	51	0	0	1,31	49
58,80	4,78	60	0	0	3,22	40	4,18	52	0	0	3,82	48
12,50	20,83	95	0,20	0,60	0,91	4,40	19,60	89	1,13	5	1,27	6
45	4,20	60	0	0	2,80	40	4,47	64	0,01	0	2,52	36
41,50	13,50	59	0	0	9,50	41	13,38	58	0,07	0,50	9,55	41,5
15,10	9,44	79	0,06	0,20	2,50	20,8	9,56	80	0,70	5,50	1,74	14,5
69	1,90	40	0	0	2,85	60	1,9	40	0	0	2,85	60
12	9,43	70	0	0	4,07	30	9,03	67	0,22	2	4,25	31
73	5,61	42	0	0	7,89	58	4,83	36	0	0	8,67	64
36	10,98	78	0,02	1,00	3,00	21	10,73	77	0,22	1	3,05	22
18	25,75	92	0,14	5,00	0,90	3	22,13	79	1,60	6	4,27	15
7	48,45	91	0,64	2,00	3,91	7	42,80	81	5,03	9	5,17	10
27	8,23	75	0	0	2,177	25	6,48	59	0	0	4,52	41

Ps, Pt et ln sont exprimés en % de Pi

ANNEXE III : Fluctuations journalières de la nappe perchée dans un tube piézométrique du 20/11/81 au 30/7/82



Tube n° 15 - P. III

ANNEXE IV - Humidités volumiques (en %) obtenues avec la presse à membrane  
et l'extracteur à basse pression

P.I d = 730 arbres/ha

Profondeur (cm)	pF				
	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2
10	39,14	32,67	23,08	18,96	14,48
20	38,07	32,48	24,39	19,01	14,55
30	40,42	33,45	28,11	21,48	16,84
40	41,69	34,69	27,28	22,01	17,85
50	45,52	38,71	30,88	25,74	21,34
60	47,95	41,23	34,86	31,83	26,41
70	52,27	46,77	38,72	34,82	29,08
80	55,80	49,32	41,10	35,67	30,05
90	57,56	49,93	42,93	37,65	31,94
100	55,68	48,65	42,19	37,09	31,20



ANNEXE V - Humidités volumiques (en %) obtenues avec la presse à membrane  
et l'extracteur à basse pression

P.I d = 1620 arbres/ha

Profondeur (cm)	pF				
	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2
10	42,48	34,83	26,59	18,55	16,67
20	38,86	30,02	23,77	17,45	14,43
30	40,83	33,82	26,43	19,48	15,87
40	43,41	36,24	29,19	22,23	18,67
50	45,69	39,62	32,78	26,75	23,34
60	48,98	43,06	36,04	29,54	26,40
70	49,39	44,34	36,26	30,13	26,55
80	53,59	49,40	40,52	33,37	30,52
90	52,83	48,07	39,38	31,79	29,60
100	56,40	52,50	43,57	35,43	32,65

ANNEXEVI - Humidités volumiques (en %) obtenues avec la presse à membrane  
et l'extracteur à basse pression

P.III d = 530 arbres/ha

Profondeur (cm)	pF				
	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2
10	36,67	29,71	24,65	19,74	15,45
20	33,02	27,17	22,57	17,59	13,39
30	34,51	29,38	24,59	18,66	15,39
40	38,94	33,34	28,21	23,44	19,62
50	45,18	37,74	38,03	28,08	24,36
60	50,02	44,10	38,21	33,71	29,60
70	50,05	44,65	38,47	34,22	29,37
80	50,69	45,07	38,74	32,53	29,89
90	51,24	44,57	39,27	34,54	31,01
100	58,28	52,27	46,37	40,37	35,87

ANNEXE VII - Humidités volumiques (en %) obtenues avec la presse à membrane  
et l'extracteur à basse pression

P.IV d = 1760 arbres/ha

Profondeur (cm)	pF				
	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2
10	34,52	26,00	22,31	16,22	15,31
20	33,72	27,26	22,94	16,30	13,45
30	37,25	28,18	24,47	17,77	15,65
40	38,63	31,20	26,77	21,112	18,20
50	40,55	34,32	29,04	23,96	20,91
60	42,00	35,48	30,40	25,39	22,65
70	42,16	36,63	31,43	26,32	24,04
80	43,02	37,32	32,32	27,30	24,76
90	44,60	38,04	33,06	28,38	26,01
100	44,00	37,52	34,26	28,04	26,06

## Annexe VIII

### CROISSANCE ET PRODUCTION DE DEUX PEUPELEMENTS D'*Abies grandis* EN LORRAINE

Age (ans)	Peuplement avant éclaircie							Eclaircie			Peuplement après éclaircie					Production totale (m³)	Accroissement courant (m³/an)	Accroissement moyen (m³/an)
	Ho (m)	Hg (m)	N	Co (cm)	Cg (cm)	G (m²)	V (m³)	N	Cg (cm)	V (m³)	N	Hg (m)	Cg (cm)	G (m²)	V (m³)			

#### Arboretum de la SIVRITE (54), Placeau N° 7

3			3 000															
29	15.9	13.1	1910	84	49	35.8	218	625	34	27	1 285	13.7	54	29.9	191	218	—	7.5
34	20.9	18.5	1 285	98	63	40.0	354	298	47	41	987	19.1	67	34.7	313	381	32.6	11.2
39	26.7	23.6	985	109	75	43.8	495	260	54	59	727	24.3	61	37.8	437	564	36.6	14.5
45	29.5	27.9	727	120	89	46.1	623	251	76	151	476	28.4	96	34.6	472	750	31.0	16.7

#### Forêt domaniale d'AMANCE (54), Parcelle 46

3			4 000															
30	16.3	12.1	2 554	83	40	35.0	201	964	24	13	1890	13.0	46	31.6	188	201	—	6.7
33	20.2	16.0	1 857	91	51	38.6	295	415	35	19	1474	16.0	54	34.8	276	308	35.7	9.3
37	23.0	19.9	1474	101	62	44.4	409	305	47	47	1 169	20.4	65	38.9	362	441	33.3	11.9
41	26.7	22.9	1 169	112	72	48.0	512	362	50	68	807	24.3	80	40.7	444	591	37.5	14.4
44	28.7	26.9	807	119	85	46.6	561				807	26.9	85	46.6	561	708	39.2	16.1
47	29.6	27.3	807	125	90	51.8	680	193	68	90	614	27.7	96	44.7	590	827	39.6	17.6