

Etude de la résistance électrique du cambium dans les épicéas (*Picea abies* L.) dépérissants

J.P. Garrec¹, C. Heymes¹, C. Rose¹, R. de Legge²
et J.C. Toulemonde²

¹ INRA, centre de recherches forestières, laboratoire d'étude de la pollution atmosphérique, Champenoux, 54280 Seichamps;

² 12, rue d'Aguesseau, 92100 Boulogne, France

(reçu le 25 mai 1989; accepté le 8 février 1989)

Résumé — La résistance électrique du cambium a été mesurée dans des épicéas de peuplements sains et de peuplements plus ou moins affectés par des pertes foliaires.

Chez les épicéas sains, il apparaît en particulier que la résistance diminue lorsque le diamètre des arbres augmente et cette relation entre la résistance et le diamètre est fonction de la station (influence de la fertilité ?). Lorsque le diamètre des arbres est inférieur à 10 cm (arbres âgés de moins de 20 ans), augmentation de la résistance devient brutalement très importante (influence du bois juvénile ?).

Chez les épicéas dépérissants, nous mettons en évidence que le dépérissement entraîne une augmentation significative de la résistance électrique du cambium. Cette augmentation est d'autant plus importante que le diamètre des arbres est petit. Cette étude montre que la mesure de la résistance électrique du cambium confirme, mais en les quantifiant et en les discriminant, les résultats obtenus à partir des méthodes conventionnelles (observations du pourcentage de chute d'aiguilles).

En symptomatologie, la mesure de la résistance électrique du cambium pourra être utilisée, en particulier, pour donner rapidement sur le terrain l'évolution dans le temps de la vigueur des arbres.

résistance électrique du cambium – épicéa – dépérissement – symptomatologie

Summary — Investigation of cambial electrical resistance in declining spruce (*Picea abies* L.) The cambial electrical resistance of spruce was measured in healthy and in more or less declining stands.

Simultaneously, the influence of a number of factors (position of the electrodes on the trunk, number of measurements, diameter of the tree and external conditions) was evaluated.

In healthy spruce, it appears that resistance increases when the diameter of the trees decreases, and that this relation between resistance and diameter depends on the stand (influence of soil fertility ?).

In declining spruce, we show that this phenomenon leads to a significant increase in cambial electrical resistance, and that the smaller the diameter of the spruce, the more important this

increase is. This study points out that the cambial electrical resistance measurements corroborate the results provided by conventional methods (rate of needle loss), but by quantifying, specifying and magnifying them. Therefore the cambial electrical resistance measurements can be used in symptomatology to provide a rapid assessment in the field of the degree of vitality in declining spruce over time.

cambial electrical resistance – spruce – decline – symptomatology

INTRODUCTION

De très nombreux travaux ont été consacrés aux relations qui existent entre la vigueur des arbres soumis à des stress biotiques ou abiotiques et la mesure de la résistance électrique du cambium. (Tattar *et al.*, 1972; Wargo & Skutt, 1975; Shortle *et al.*, 1979; Shortle & Ostrofsky, 1983; Tomiczek, 1987).

Cette mesure nécessite l'implantation de 2 électrodes au travers de l'écorce dans la zone cambiale vasculaire (cette zone comprend le cambium, mais également les parties conductrices du phloème et du xylème de part et d'autre du cambium). La résistance électrique de cette zone dépend essentiellement de la présence d'ions mobiles, principalement du potassium présent dans l'apoplaste situé entre les deux électrodes (Tattar *et al.*, 1972; Malia & Tattar, 1978; Blanchard *et al.*, 1983). Cette résistance électrique est inversement proportionnelle à la vitalité de l'arbre : quand la résistance électrique augmente, la vitalité de l'arbre diminue.

Cette méthode a l'avantage de donner une évaluation rapide et non destructive de la vitalité de l'arbre, mais de nombreux paramètres physiologiques internes ou environnementaux externes à l'arbre peuvent modifier les résultats (Newbanks & Tattar, 1977; Piene *et al.*, 1984).

Depuis les années 1980, un phénomène de dépérissement forestier est apparu dans certaines parcelles de forêts vos-

giennes. Ce phénomène a été observé dans le Jura, les Ardennes, le Massif central et les Alpes du Nord. Dans ces forêts, ce dépérissement se caractérise en particulier au niveau des épicéas par des jaunissements, mais surtout par des chutes d'aiguilles plus ou moins importantes (Bonneau & Fricker, 1985; Schutt & Cowling, 1985; Garrec, 1986). De nombreuses recherches sont effectuées actuellement pour mettre au point des tests physiologiques permettant un diagnostic précis, spécifique et aussi rapide que possible de ce phénomène de dépérissement.

Dans le cas de défoliations plus ou moins importantes, suite à des attaques d'insectes, la mesure de la résistance électrique du cambium a été largement utilisée par les pathologistes forestiers et a montré ses possibilités pour estimer l'état physiologique des arbres (Davis *et al.*, 1980; Gagnon *et al.*, 1987; MacDougall *et al.*, 1987).

A partir de ces résultats, il nous a paru intéressant d'étudier les possibilités de la mesure de la résistance du cambium pour estimer la vigueur des arbres dépérissants qui se caractérise par des chutes d'aiguilles. Dans le cadre de ce travail, notre objectif a été d'établir des corrélations entre le niveau de dépérissement et la résistance électrique du cambium d'épicéas affectés par celui-ci, ceci après avoir évalué l'ensemble des facteurs qui modifient cette résistance électrique dans les épicéas sains.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Matériel végétal

Les mesures de la résistance électrique du cambium ont été effectuées durant l'été 1987 dans 8 parcelles d'épicéas dépérissants situées aux environs du col du Donon (Vosges). Cent seize arbres ont été analysés au cours de l'étude.

Une autre série de mesures a été réalisée sur 103 épicéas plus ou moins dépérissants répartis sur 11 placettes Deforpa disséminées dans le département de la Corrèze (Limousin).

La notation des différentes classes de dépérissement des arbres mesurés est celle adoptée dans le programme Deforpa (classe I : 0-10% de chute d'aiguilles (arbres sains); classe II : 10-25%; classe III : 25-60%).

Avant d'étudier la relation entre le niveau des pertes foliaires et la résistance électrique du cambium, il était nécessaire de rechercher les facteurs de variabilité de cette résistance dans les arbres sains et d'estimer, dans la mesure du possible, leur influence. Cette étude préliminaire de méthodologie a été effectuée sur 39 épicéas de la forêt d'Amance située à proximité du centre de recherches forestières de l'INRA à Nancy.

Mesure de la résistance électrique du cambium

La mesure dans le tronc de la résistance électrique des tissus ligneux au niveau du cambium a été effectuée au moyen d'un appareil baptisé «vitalomètre». Cet appareil a été mis au point à

l'initiative du cabinet R. de Legge et est basé sur le même principe que le «Shigomètre» américain (Skutt *et al.*, 1972).

Le «vitalomètre», comme son homologue américain, comprend 2 parties reliées entre elles par un câble électrique :

- une sonde de mesure, à enfoncer dans le tronc, constituée de deux électrodes conductrices sous forme de deux fortes aiguilles d'acier de 4,2 cm de long séparées de 1,8 cm. Ces aiguilles sont insérées à leur base dans un bloc de plastique comportant une poignée;

- un boîtier portable alimenté par batterie délivrant un courant pulsé de forme carrée (de façon à éviter les phénomènes de polarisation dans le bois). La résistance des tissus au courant entre les électrodes est lue sur un écran à affichage digital (valeurs comprises entre 0 et 200 k Ω).

RÉSULTATS

Méthodologie de la mesure de la résistance électrique du cambium dans les arbres

Facteurs liés à la méthode d'utilisation de l'appareil

Profondeur d'enfoncement de la sonde

Sur le Tableau I nous avons reporté pour 3 épicéas, les valeurs de résistance

Tableau I. Variations de la résistance électrique en fonction de la profondeur d'enfoncement des électrodes.

Profondeur d'enfoncement de la sonde (mm)	Résistance électrique (k Ω)		
	Epicéa 1	Epicéa 2	Epicéa 3
10	93	119	
15			75
20	88	100	
25	86		65

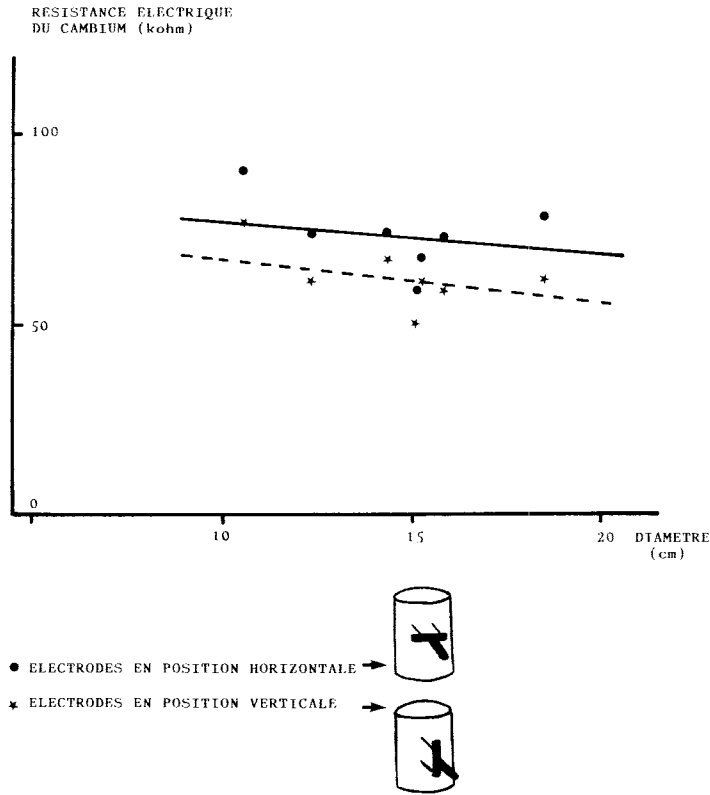


Fig. 1. Influence de la position des électrodes sur la mesure de la résistance électrique du cambium pour différents diamètres d'épicéas sains.

mesurées en fonction de la profondeur d'enfoncement de la sonde.

Nous constatons qu'il semble exister une relation entre la profondeur d'enfoncement des électrodes dans le tronc et la valeur de la résistance électrique (diminution avec l'enfoncement). Cependant, dans la pratique, ces variations en fonction de l'enfoncement restent faibles car, dans la majorité des cas, les électrodes pénètrent aux environs de 1 cm dans le tronc des épicéas, ce qui correspond en moyenne à une profondeur de 0,4 cm hors écorce.

Position horizontale ou verticale des électrodes de la sonde plantée dans le tronc

Sur la figure 1, nous avons indiqué les valeurs de la résistance obtenues suivant la position horizontale (les deux électrodes dans un même plan horizontal : plan radial) ou verticale (les deux électrodes dans un même plan vertical : plan axial) des électrodes sur 7 épicéas de différents diamètres.

Nous constatons que les résistances électriques mesurées sont plus importantes en position horizontale qu'en posi-

tion verticale qui correspond toujours à un minimum de la résistance.

Si la figure 1 met en évidence la diminution linéaire de la résistance avec l'augmentation du diamètre de l'arbre, elle montre surtout que la position verticale des électrodes entraîne une moins grande dispersion des résultats (coefficient de corrélation $r = 0,62$) comparativement à la position horizontale ($r = 0,42$). Par la suite, nous travaillerons exclusivement avec les deux électrodes placées dans un plan vertical.

Durée entre l'enfoncement de la sonde et la mesure de la résistance

Dès que la sonde est enfoncée dans le tronc d'un arbre, la valeur de la résistance augmente au cours du temps. Une première zone de stabilité relative apparaît

aux alentours de 8-9 s. Nous avons considéré 10 s comme la durée minimale requise avant d'effectuer les mesures de la résistance.

Facteurs liés aux caractéristiques de l'arbre

Hauteur de la sonde sur le tronc

Sur la figure 2, nous avons représenté un exemple des variations de la résistance en fonction de la hauteur de la sonde sur l'arbre. Ces mesures ont été effectuées sur une même génératrice du tronc. Dans la majorité des cas, la mesure de la résistance diminue lorsque l'on s'élève au-dessus du collet, pour se stabiliser à environ 1 m du sol. Par la suite, des fluctuations

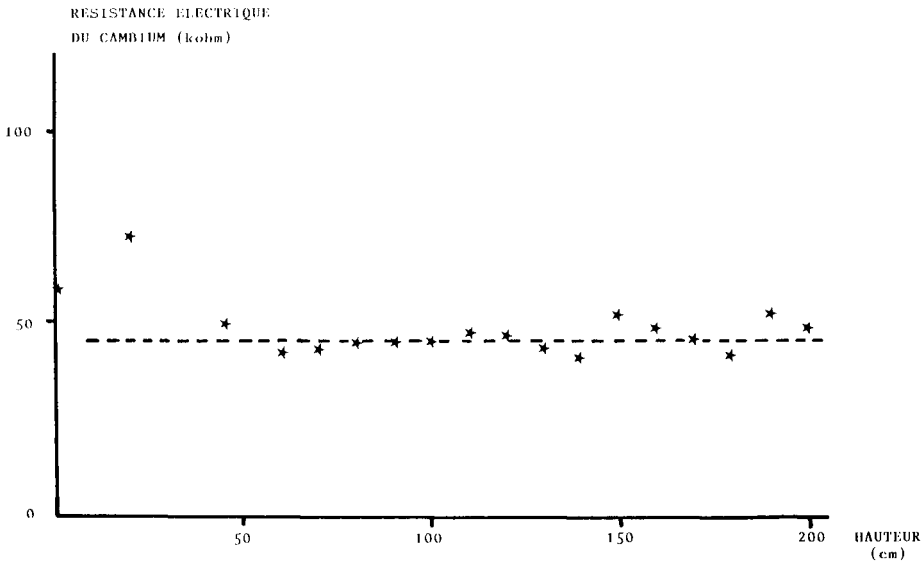


Fig. 2. Influence de la hauteur des électrodes sur le tronc sur la mesure de la résistance électrique du cambium.

plus ou moins importantes apparaissent sur cette mesure. A partir de ces résultats, les mesures de la résistance électrique seront effectuées systématiquement à une hauteur de 1,30 m au-dessus du sol.

Position de la sonde sur la circonférence du tronc

Sur la figure 3 est représenté un exemple des variations de la résistance électrique du cambium en fonction de 8 positions de la sonde sur la même circonférence d'un tronc. Ces mesures ont été effectuées à 3 hauteurs différentes.

Nous mettons en évidence que des fluctuations non négligeables de la valeur de la résistance électrique existent sur une même circonférence. Ses variations le long de la circonférence se retrouvent identiques à différentes hauteurs et apparaissent caractéristiques d'un arbre donné. Nous avons vérifié que ces fluctuations ne dépendaient pas de l'orientation des points de mesure par rapport aux points cardinaux.

Dans la pratique, les mesures de la résistance électrique du cambium seront effectuées suivant trois plans radiaux à 120° sur une même circonférence afin de neutraliser les phénomènes de dissymétrie le long de celle-ci.

Diamètre de l'arbre au niveau de la mesure

A partir de 39 mesures effectuées sur des épicéas sains (arbres dominants d'âges

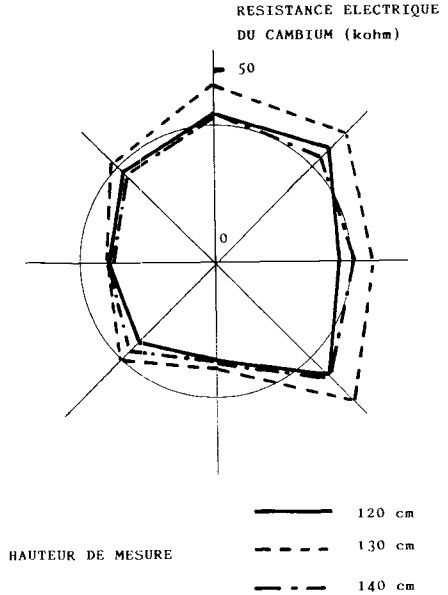


Fig. 3. Influence de l'emplacement des électrodes sur la mesure de la résistance électrique du cambium.

différents) dans la forêt d'Amance, nous avons mis en évidence qu'il existe entre la résistance électrique du cambium (R_c en Ω) et le diamètre des épicéas (D en cm) une relation linéaire :

$$R_c = 92,36 - 2,26 D$$

Cette relation montre que la résistance électrique du cambium est inversement proportionnelle au diamètre de l'arbre. Elle n'est valable que pour des arbres d'un diamètre supérieur à 10 cm. Au-dessous de 10 cm de diamètre, la résistance devient rapidement très importante (110 k Ω)

Tableau II. Limites de la résistance électrique en fonction du diamètre des épicéas (forêt d'Amance)

Diamètre des épicéas D (cm)	Résistance électrique (k Ω)	Nombre d'arbres
8 < D < 10	70-110	10
10 < D < 20	50-70	20
25 < D < 35	20-50	9

Ces mesures nous ont permis de classer les arbres à partir de leur diamètre, et le Tableau II résume les limites inférieures et supérieures de la résistance électrique du cambium relevées pour chaque catégorie de diamètre.

Statut social et âge de l'arbre

La valeur de la résistance électrique du cambium d'un arbre dominé a tendance à être plus importante que celle d'un arbre dominant. De même, la résistance d'un arbre jeune apparaît plus forte que celle d'un arbre âgé.

Cependant, ces variations, toujours faibles devant les autres facteurs de variabilité, sont difficilement dissociables des autres caractéristiques de l'arbre qui se répercutent sur son diamètre.

Facteurs liés au cycle végétatif, au cycle journalier et aux paramètres climatiques

Si les résultats de la mesure électrique du cambium sont variables au cours du cycle végétatif, nous avons constaté au cours de cette étude que les différences ne sont pas décelables au cours d'une campagne de mesures comprise entre 8 et 15 j.

Quant à l'influence des paramètres climatiques comme le vent, la pluie, l'humidité et la température qui pourraient agir en particulier sur l'état hydrique de l'arbre, leur influence est apparue négligeable tant que l'on ne travaille pas dans des conditions météorologiques extrêmes. Les résultats les plus reproductibles ont été obtenus au cours de la journée, en début d'après-midi, lorsque la température est stable.

Mesure de la résistance électrique du cambium dans les arbres de zones atteintes par le dépérissement

Etude dans les Vosges (col du Donon)

Sur 116 épicéas appartenant aux différentes classes de dépérissement établies de façon conventionnelle, nous avons relevé les mesures de la résistance électrique du cambium.

Pour chaque épicéa, trois mesures au bout de 10 s et séparées sur le tronc de 120° ont été effectuées à 1,30 m du sol (électrodes en position verticale).

Sur la figure 4 nous avons représenté les résultats moyens (\pm l'intervalle de confiance au seuil de 5%) obtenus pour différentes classes de dépérissement et pour des épicéas de deux catégories de diamètre : 10-15 cm et 20-30 cm.

Nous mettons en évidence qu'il existe une relation entre la résistance électrique du cambium et le niveau des pertes foliaires des épicéas, et que celle-ci augmente avec le dépérissement.

Cette augmentation est nettement plus marquée dans les arbres de 10-15 cm de diamètre, comparativement aux arbres de diamètre supérieur (20-30 cm).

Etudes dans le Limousin (Corrèze)

D'une manière générale, les placettes de Corrèze se caractérisent par un faible dépérissement des épicéas et par un grand nombre d'arbres sains.

S'il a été possible d'étudier la résistance électrique d'arbres de classe I (76) et de classe II (19), les arbres de classe III (8) étaient, eux, trop peu nombreux pour donner des résultats utilisables.

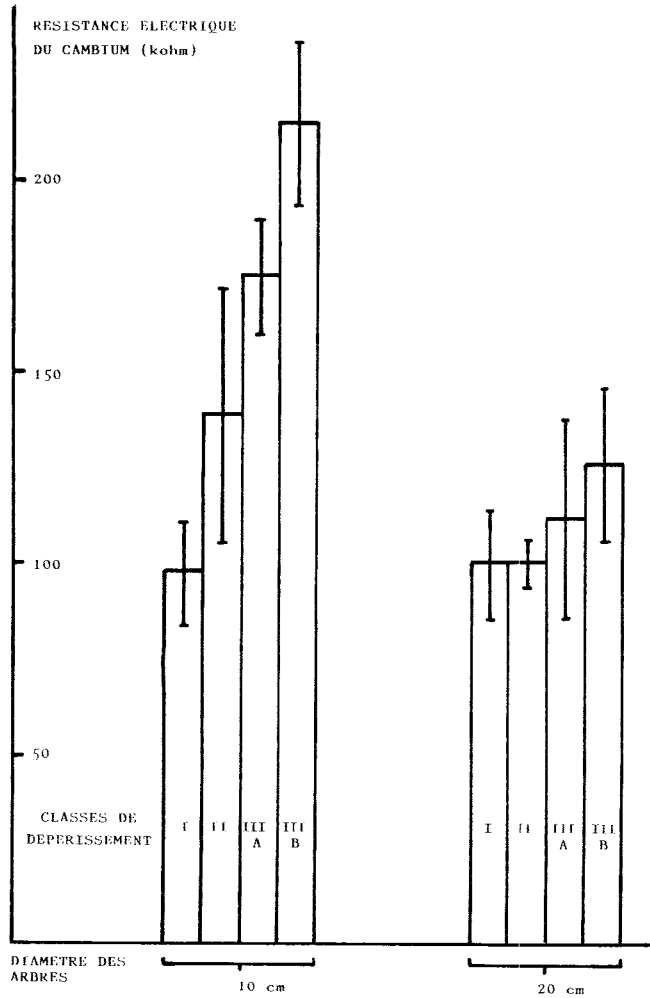


Fig. 4. Influence du «déperissement» des épicéas sur la mesure de la résistance électrique du cambium pour différentes catégories de diamètres (col du Donon).

Tableau III. Limites de la résistance électrique en fonction du diamètre des épicéas (Corrèze).

Diamètre des épicéas D (cm)	Résistance électrique (kΩ)	Nombre d'arbres
8 < D < 10	90-180	7
10 < D < 20	70-90	41
25 < D < 35	50-70	28

Sur la figure 5, nous avons représenté les valeurs moyennes (\pm l'intervalle de confiance au seuil de 5%) de la résistance électrique du cambium pour des épicéas de diamètre de 10-15 cm et 20-30 cm, appartenant aux classes I et II (classe I uniquement pour les arbres de diamètre 10-15 cm). Comme dans les Vosges, le dépérissement entraîne une nette augmentation de la résistance électrique du cambium.

Nous avons cherché la relation qui existe dans cette région entre la résistance électrique du cambium (R_c en $k\Omega$) et le diamètre (D en cm) dans les arbres dominants sains (classe I). Nous avons obtenu la relation linéaire :

$$R_c = 100,84 - 1,52 D$$

Ces mesures sur les épicéas sains, nous ont permis de classer comme précédemment les arbres en trois catégories de

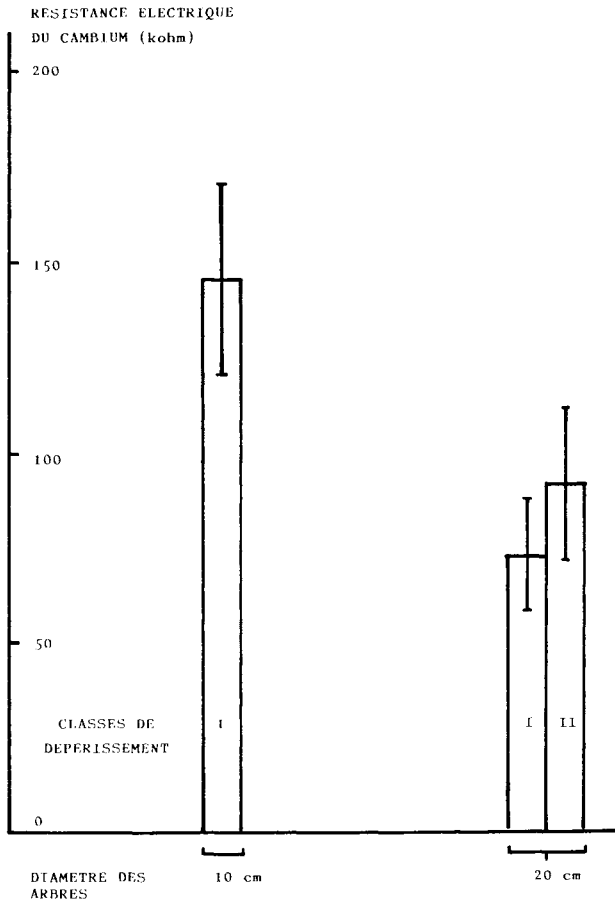


Fig. 5. Influence du «dépérissement» des épicéas sur la mesure de la résistance électrique du cambium pour différentes catégories de diamètres (placettes de Corrèze).

diamètre, et le Tableau III résume les limites inférieures et supérieures de la résistance électrique du cambium relevées pour chaque catégorie de diamètre.

Si nous regardons l'évolution de la résistance électrique du cambium (R_c en $k\Omega$) en fonction du diamètre (D en cm) dans les différents épicéas de la classe de dépérissement II, nous obtenons la relation linéaire :

$$R_c = 130,42 - 2,48 D$$

Sur la figure 6 nous avons représenté respectivement les courbes d'évolution de la résistance électrique du cambium en fonction du diamètre pour les épicéas des classes I et II. Nous avons reporté pour mémoire sur cette figure la courbe de l'évolution de la résistance électrique en

fonction du diamètre pour les épicéas sains (classe I) de la forêt d'Amance.

Nous constatons d'une part qu'au niveau des épicéas sains (classe I), la relation entre la résistance électrique du cambium et le diamètre des arbres n'est pas identique d'une région à l'autre, et d'autre part que l'augmentation de la résistance électrique sous l'effet du dépérissement va en s'accroissant lorsque le diamètre des arbres diminue.

DISCUSSION

L'étude méthodologique préliminaire de la résistance électrique du cambium dans

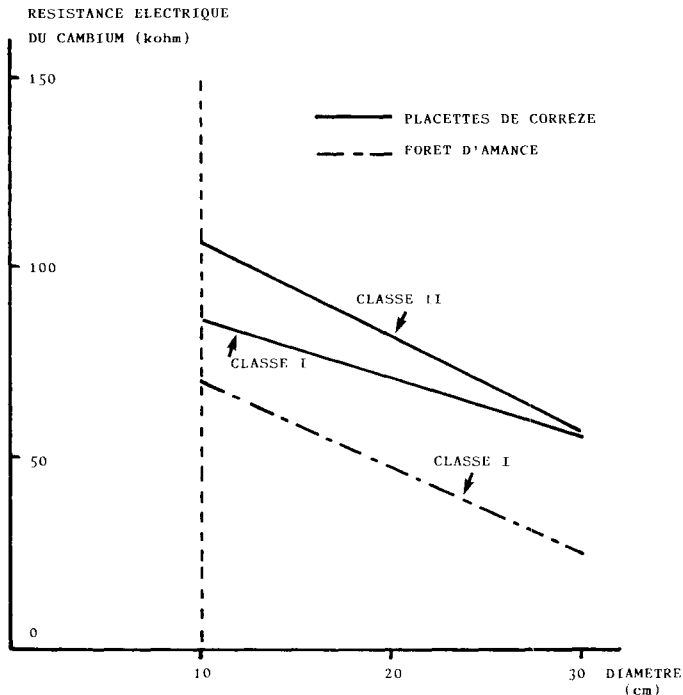


Fig. 6. Evolution de la résistance électrique du cambium en fonction du diamètre suivant les classes de dépérissement et l'emplacement des stations.

des arbres sains a montré que de nombreux facteurs internes ou externes à l'arbre pouvaient modifier les valeurs de cette résistance.

Lors des mesures, nous avons retrouvé les facteurs de fluctuation liés à l'insertion des électrodes, aux caractéristiques de l'arbre et aux effets de l'environnement qui avaient été déjà signalés par les auteurs qui avaient utilisé le «shigomètre» américain :

- une diminution de la résistance électrique avec l'enfoncement des électrodes suite à l'augmentation de la section de passage du courant (Newbanks & Tattar, 1977);

- la nécessité de plusieurs mesures sur une même circonférence de façon à neutraliser les effets provenant de l'excentricité du cœur, mesures effectuées avec des électrodes plantées verticalement dans le tronc à environ 1,30 m du sol (Tattar *et al.*, 1972); Shortle *et al.*, 1977);

- l'obligation d'effectuer les mesures sur une période de temps relativement courte de façon à éviter les fluctuations saisonnières de la résistance électrique (Piene *et al.*, 1984), et ceci dans des conditions extérieures de température et d'humidité aussi stables que possible (Gagnon *et al.*, 1987; Salema *et al.*, 1987), généralement en début d'après-midi.

La mesure de la résistance électrique du cambium peut être considérée comme une indication de l'activité cambiale de l'arbre, activité qui reflète le fonctionnement du houppier (photosynthèse, transpiration, etc.) et du système racinaire (nutrition minérale, alimentation hydrique, etc.) en fonction de paramètres physiologiques et environnementaux. Cette mesure confirme également que sur une même circonférence l'activité cambiale n'est pas homogène, irrégularité qui peut donner dans sa forme extrême le phénomène du «cerne manquant».

L'étude dans des épicéas sains (classe I) provenant de différentes régions (forêt d'Amance, col du Donon, Corrèze), de la relation entre résistance électrique du cambium et le diamètre des arbres a montré :

- une diminution de la résistance électrique du cambium avec l'augmentation du diamètre du tronc attribuée à une forte corrélation entre la résistance électrique et la croissance radiale annuelle (Wargo & Skutt, 1975). Il existe une relation linéaire entre ces deux paramètres, mais avec des coefficients variables. Nous obtenons la relation : $R_c = 92,36 - 2,26 D$ en forêt d'Amance, et la relation $R_c = 100,84 - 1,52 D$ dans les placettes de Corrèze;

- des valeurs différentes de la résistance électrique moyenne selon les régions et ceci pour une même gamme de diamètre. Ceci indiquerait que l'influence du diamètre sur la résistance est différente selon les stations (cf. fig. 6). En général, les arbres des stations sur sol pauvre (col du Donon, Corrèze) ont, comparativement à ceux des autres stations (forêt d'Amance), des résistances électriques plus élevées.

Ces résultats, qui pourraient être interprétés comme une indication sur l'indice de fertilité des stations, montrent qu'il est impossible, sans précautions, de comparer entre elles les mesures de la résistance électrique du cambium d'une forêt à une autre;

- une brusque augmentation, dans la plupart des cas, de la résistance électrique dans les arbres de diamètre inférieur à 10 cm. Nous pensons que cette augmentation des valeurs de la résistance provient du fait que nous avons alors à faire à des arbres ayant une forte proportion de bois juvénile (arbres âgés de moins de 20 ans) de faible densité et de faible texture (Polge, 1964). Il ne semble donc pas possible de comparer les valeurs obtenues avec les bois juvéniles à celles obtenues avec les bois adultes.

L'étude dans des épicéas présentant différents niveaux de défoliation provenant de peuplements «dépérissants» a montré que, dans ces arbres, la résistance électrique du cambium augmente de façon significative comparativement aux arbres sains.

Ce nouveau type de dépérissement où la pollution est fortement soupçonnée d'intervenir avec d'autres facteurs (climatiques, édaphiques, etc.) (Programme Deforpa, 1987) modifie de la même façon, au niveau des arbres, la résistance électrique du cambium que les fortes défoliations induites par les attaques d'insectes (Davis *et al.*, 1980).

Nous pouvons supposer que ces augmentations de la résistance électrique, avec le dépérissement, proviennent également de concentrations différentes en potassium (Tattar *et al.*, 1972; Blanchard *et al.*, 1983).

Les mesures de la résistance électrique du cambium des épicéas, dans des régions où le phénomène de dépérissement des forêts est plus ou moins important (col du Donon, Corrèze) ont permis de constater que :

- dans les arbres dépérissants de plus de 10 cm de diamètre (arbres adultes), il est possible dans la majorité des cas de discriminer assez facilement les différentes classes de dépérissement. En particulier, au col du Donon, il a été possible au niveau de la classe III de séparer les arbres avec 25–45% de chute d'aiguilles (III A) des arbres avec 45–60% de chute d'aiguilles (III B). Il apparaît donc que les mesures de la résistance électrique confirment en les quantifiant, les résultats sur les pertes de vitalité des épicéas obtenus à partir de l'observation du pourcentage de chute d'aiguilles;
- dans les arbres dépérissants, l'augmentation de la résistance électrique du cambium est plus importante pour les arbres

de petit diamètre que pour ceux de diamètre supérieur. Dans les placettes de Corrèze, pour les épicéas de la classe II, l'augmentation est de 23% pour les arbres de 10 cm, mais elle est pratiquement nulle pour les arbres de 30 cm de diamètre. Nous n'avons pas à ce jour d'explication de ce phénomène, mais ces résultats indiquent que la mesure de la résistance électrique du cambium devient de moins en moins efficace pour déterminer la vigueur d'un arbre lorsque le diamètre de celui-ci augmente.

Il faut signaler que cette mesure de la résistance électrique du cambium donne avant tout une indication de la vigueur globale de l'arbre (état physiologique). Cette vigueur est fonction de l'état apparent de l'arbre (chute d'aiguilles, statut social, etc.), mais elle intègre vraisemblablement d'autres facteurs, comme des modifications physiologiques et métaboliques non visibles. D'une certaine façon cette mesure ponctuelle pourrait nous renseigner également sur l'état à venir de l'arbre.

CONCLUSION

Ce travail montre que la mesure de la résistance électrique du cambium est corrélée avec l'état sanitaire apparent des épicéas (dépérissement). Si cette méthode peut présenter un grand intérêt au niveau d'un peuplement, par contre son utilisation systématique en symptomatologie pour indiquer rapidement sur une vaste étendue la vigueur relative des arbres reste problématique. En effet, il apparaît que la résistance est aussi fonction des conditions stationnelles.

Toutefois, de par la rapidité, la simplicité et la relative précision des mesures, cette méthode semble particulièrement prometteuse pour suivre dans le temps, en com-

plément d'autres méthodes (appréciation visuelle des houppiers, mesure de la croissance), la vitalité d'arbres ou de parcelles. De même, cette méthode pourrait être utilisée, par exemple, pour aider le forestier lorsqu'il procède au classement des parcelles lors de la révision d'un plan d'aménagement.

Dans la pratique, ces mesures de la résistance électrique du cambium ne seront considérées comme de bonnes indications de la vigueur des épicéas dépérissants que si des précautions sont prises au niveau de l'insertion des électrodes dans le tronc, du nombre de répétitions, du diamètre de l'arbre et des conditions extérieures.

RÉFÉRENCES

- Blanchard R.O., Schortle W.C. & Davis W. (1983) Mechanism relating cambial electrical resistance to periodic growth rate of balsam fir. *Can. J. For. Res.* 13, 472-480
- Bonneau M. & Fricker C. (1985) Le dépérissement des forêts dans le massif vosgien : relations possibles avec la pollution atmosphérique. *Rev. For. Fr.* 37, 105-126
- Davis W., Shortle W. & Shigo A. (1980) Potential hazard rating system for fir stands infested with budworm using cambial electrical resistance. *Can. J. For. Res.* 10, 541-544
- Gagnon R.R., Bauce E. & Pineau M. (1987) Relation between air water potential and cambial electrical resistance of balsam fir and white spruce after budbreak. *Can. J. For. Res.* 17, 105-108
- Garrec J.P. (1986) De la forêt polluée à la forêt dépérissante. *Pollut. Atmos.* 110, 142-143
- MacDougall R.G., Thompson R.G. & Piene H. (1987) Stem electrical capacitance and resistance measurements as related to total foliar biomass of balsam fir trees. *Can. J. For. Res.* 17, 1071-1074
- Malia M.E. & Tattar T.A. (1978) Electrical resistance, physical characteristics, and cation concentrations in xylem of sugar maple infected with *Verticillium dahliae*. *Can. J. For. Res.* 8, 322-327
- Newbanks D. & Tattar T.A. (1977) The relationship between electrical resistance and severity of decline symptoms in *Acer saccharum*. *Can. J. For. Res.* 7, 469-475
- Piene H., Fensom D.S., McIsaac J.E., Thompson R.G. & Alexander K.G. (1984) Electrical resistance and capacitance measurements on young, spaced and unspaced, defoliated and protected, balsam fir trees. *Can. J. For. Res.* 14, 811-817
- Polge H. (1964) Le bois juvénile des conifères. *Rev. For. Fr.* 6, 474-505
- Programme «Deforpa» (1987) *Dépérissement des forêts attribué à la pollution atmosphérique. Etat des recherches à la fin de l'année 1986*. Vol. 1-2-3, 696 p.
- Salemaa M., Jukola-Sulonen E.V. & Lappalainen T. (1987) On the usefulness of electrical impedance in estimating the vitality of Norway Spruce (*Picea abies*). *Aquilo Ser. Bot.*, 25, 161-166
- Schutt P. & Cowling E.B. (1985) Waldsterben, a general decline of forests in Central Europe : symptoms, development, and possible causes. *Plant. Dis.* 69, 548-558
- Shortle W.S., Shigo A.L., Berry P. & Abusamra J. (1977) Electrical resistance in tree cambium zone : relationship to rates of growth and wound closure. *For. Sci.* 23, 326-329
- Shortle W.C., Abusamra J., Laing F.M. & Morselli M.F. (1979) Electrical resistance as a guide to thinning sugar maples. *Can. J. For. Res.* 9, 436-437
- Shortle W.C. & Ostrofsky A. (1983) Decay susceptibility of wood in defoliated fir trees related to changing physical, chemical, and biological properties. *Eur. J. For. Pathol.* 13, 1-11
- Skutt H.R., Shigo A.L. & Lessard R.A. (1972) Detection of discolored and decayed wood in living trees using a pulsed electric current. *Can. J. For. Res.* 2, 54-56
- Tattar T.A., Shigo A.L. & Chase T. (1972) Relationship between the degree of resistance to a pulsed electric current and wood in progressive stages of discoloration and decay in living trees. *Can. J. For. Res.* 2, 236-243
- Tomiczek C. (1987) Stressuntersuchungen an «Ozon - begasten Fichten» mittels Digital - Impulsstromgerät (Conditometer AS-1). *Cbl. ges. Forstwesen*, 104, 219-224
- Wargo P.M. & Skutt H.R. (1975) Resistance to pulsed electric current : an indicator of stress in forest trees. *Can. J. For. Res.* 5, 557-561